POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Adeguamento della galleria del vento SEASTAR WT per prove di rilascio di idrogeno

Relatori

Prof. Andrea Carpignano
Prof.ssa Raffaella Gerboni
Dott.ssa Anna Chiara Uggenti
Dott. Alberto Moscatello

Candidato

Simone Zamengo

Ottobre 2022

ABSTRACT

Inserito in un contesto di estrazione Oil&Gas da piattaforme off-shore, la sicurezza industriale è uno dei temi più importanti. All'interno dell'analisi di rischio è necessaria una valutazione di possibili scenari di rilascio incidentale di gas in pressione, con il supporto di modelli di simulazione CFD. Al fine di effettuare una validazione sperimentalmente di un modello innovativo basato su questa tecnica, nasce nel 2020 la galleria del vento SEASTAR WT di Torino, che permette di analizzare gli effetti di un rilascio di metano su un modello di piattaforma in scala, all'interno di un flusso d'aria in regime laminare.

Oggi, l'attuale contesto di transizione energetica porta a valutare nuovi progetti per riconvertire le piattaforme a fine vita in un'ottica di sostenibilità. Diventa interessante considerare l'utilizzo dei giacimenti esausti per lo stoccaggio di miscele di metano e idrogeno, in un momento in cui si guarda sempre con più attenzione al nuovo vettore energetico visti i suoi vantaggi rispetto all'elettricità e al gas naturale.

Il lavoro di tesi nasce dalla volontà di valutare nuove possibilità per il laboratorio, che ne permettano un utilizzo per la sperimentazione di rilasci di miscele di idrogeno. Un adeguamento di questo tipo richiede valutazioni di tipo tecnico, normativo e gestionale, con particolare focus su quelli che sono gli aspetti di sicurezza.

Il primo punto dell'analisi è stato quello di partire dall'attuale asset del laboratorio, progettato per gestire rilasci controllati di una miscela povera di metano in aria (2,2% in volume, corrispondente al 50% del limite inferiori di infiammabilità) e di valutarne l'adeguamento della strumentazione installata, nonché eventualmente degli ambienti e delle misure di sicurezza, ipotizzando di voler passare all'utilizzo di una miscela di idrogeno a diverse possibili concentrazioni. I due scenari di principale interesse sono risultati essere quello di una miscela di idrogeno al 2% in volume in aria e quello di idrogeno puro.

Alle valutazioni di tipo tecnico su componenti e strumenti è seguito uno studio normativo volto a considerare gli aspetti di sicurezza indispensabili, il quale ha portato ad una verifica della normativa per l'antincendio e ad uno studio di sicurezza per il rischio esplosione di tipo ATEX, per ambienti interessati dalla presenza di gas infiammabile.

Il lavoro effettuato ha quindi permesso di eseguire una valutazione accurata di tipo tecnico e normativo al fine di evidenziare gli scenari di potenziamento del laboratorio (modifiche di progetto e/o delle condizioni di prova) che consentano l'utilizzo dell'idrogeno nella sperimentazione in sicurezza e nel rispetto della normativa vigente.

In the context of Oil & Gas extraction from offshore platforms, safety is one of the most important issues which is dealt with by risk analysis. An assessment of possible scenarios of accidental release of pressurized gas is required and it can be solved with the support of CFD simulation models. To experimentally validate an innovative model based on this technique, the SEASTAR WT wind tunnel was born in 2020 in Turin, which allows to analyse the effects of a methane release on a scaled platform model, within a flow of air in laminar regime.

Today, the current context of energy transition leads to the evaluation of new projects to reconvert the platforms at the end of their life in a sustainability way. It becomes interesting to consider the use of depleted reservoirs for the storage of methane and hydrogen mixtures, at a time when this new energy carrier is increasingly being looked at.

The thesis work comes from the need to evaluate new possibilities for the laboratory, to allow its use for the testing of releases of hydrogen mixtures. An adjustment of this type requires technical, regulatory and operating assessments, with particular focus on safety aspects.

The first point of the analysis was to start from the current laboratory asset, designed to manage controlled releases of a low-methane mixture in air (2.2% by volume, corresponding to 50% of the lower flammability limit) and to evaluate the adaptation of the installed instrumentation, as well as possibly of the environment and safety measures, to be able to switch to a mixture of hydrogen at different possible concentrations. Two scenarios of main interest were found to be a mixture of hydrogen at 2% by volume in air and pure hydrogen.

The technical assessment on components and tools were followed by a regulatory study aimed at considering the safety aspects, which led to a verification of the fire regulations and to a safety study for the ATEX-type explosion risk, applicable to environments characterised by the presence of flammable gas. The results allowed to highlight the fundamental modification measures for the two scenarios in exam, as well as the operational aspects to be considered in the management of the experiments should the adjustment be made.

This study led to an accurate technical and regulatory assessment highlighting the possible development scenarios for the laboratory (e.g. design changes and/or test conditions) which will allow safe and regulations complying tests involving hydrogen.

Indice

1 Introduzione 1
1.1 Scopo della tesi 3
1.2 Struttura della tesi 4
2 Contesto 5
2.1 Lotta al cambiamento climatico 5
2.1.1 Il ruolo dell'Europa 6
2.1.2 Il ruolo dell'Italia 8
2.1.3 Effetti della guerra Russia-Ucraina sulla transizione energetica 11
2.2 Idrogeno 12
2.2.1 Interesse e ruolo nella transizione 13
2.2.2 Infrastrutture di trasporto e stoccaggio 17
2.3 Riconversione delle piattaforme off-shore 19
2.3.1 Nuovi progetti per la produzione di Green Hydrogen 19
2.4 Sicurezza degli impianti off-shore 23
3 SEASTAR WT: la Galleria del Vento 24
3.1 Descrizione del laboratorio 24
3.2 Mock-up e sensoristica 28
3.3 Impianto di distribuzione del gas 31
3.4 Modalità operative e aspetti di manutenzione 34
3.4.1 Modalità operative 34
3.4.2 Manutenzione 36
3.5 Analisi di sicurezza 37
3.5.1 Analisi HAZOP e SIF associata 38
3.5.2 Analisi HAZID e raccomandazioni 39
4 Progetto di modifica: aspetti tecnici 40
4.1 Verifica legata alla sensoristica installata 41
4.1.1 Sensori "Microla" su piano sensorizzato 41
4.1.2 Sensori Beniat per il rilevamento di miscele di gas potenzialmente infiammabili in camera di prova 43
4.2 Verifica di compatibilità della rete del gas 44
5 Analisi degli aspetti normativi e di sicurezza 49
5.1 Verifica della normativa antincendio 49
5.2 Studio ATEX 50

5.2.1 Metodologia di classificazione delle aree 50
5.2.2 Ambienti analizzati e sostanze infiammabili 56
5.2.3 Sorgenti di emissione 59
5.2.4 Disegni di classificazione 60
5.2.5 Analisi dei risultati ottenuti: Aree Pericolose 61
5.2.6 Selezione delle apparecchiature 70
5.2.7 Considerazioni finali 70
6 Modifiche progettuali, costruttive e operative 71
7 Conclusioni 78
Bibliografia 80
Ringraziamenti 83

1 Introduzione

Negli ultimi anni l'Occidente ha avviato una transizione energetica senza precedenti, volta a sostituire le fonti fossili, non rinnovabili e in via di esaurimento, con fonti energetiche rinnovabili, ma anche e soprattutto a contenere gli effetti del cambiamento climatico in atto, che dimostra sempre più di avere una natura antropica. La diffusa presa di coscienza di questa condizione ha fatto sì che in tempi recenti gli obiettivi internazionali in questa direzione siano diventati sempre più ambiziosi. Quel processo di transizione che da decenni era considerato inevitabile, ma mai sufficientemente urgente, viene ora accelerato e costantemente aggiornato.

Ad oggi l'Europa è l'organizzazione più attiva in questo senso, grazie a politiche concrete ed ingenti finanziamenti per metterle in atto; infatti gli Accordi di Parigi siglati nel Dicembre 2015 dalla Conferenza delle Parti (COP21) hanno messo in atto misure e obiettivi definiti da scadenze volte a contenere l'aumento della temperatura entro 1,5°, principalmente attraverso una profonda riorganizzazione dell'intera filiera dell'energia verso fonti rinnovabili e basso-emissive, con lo scopo finale di raggiungere la Carbon Neutrality nel 2050 a livello globale.

In questa transizione l'Italia ha il potenziale per giocare un ruolo importante, grazie alla sua ampia disponibilità e diversificazione di fonti "pulite": dai bacini d'acqua nei paesi del nord, alle fonti geotermiche in alcune aree della Toscana, alla biomassa, al sole e al vento, soprattutto nelle regioni più a sud. Potrebbe quindi essere interessante per il paese sfruttare queste risorse rinnovabili per sopperire alla scarsità di fonti fossili e all'assenza di centrali nucleari, al fine di gettare le basi per una futura indipendenza energetica, o comunque una maggiore autosufficienza.

Lo sguardo verso la transizione non si limita tuttavia ai soli aspetti di produzione "verde", ma analizza l'intero sistema energetico attuale, cercando, dove possibile, di trovare soluzioni di sostenibilità ambientale ed economica a problemi come la necessità di utilizzare vettori energetici diversi dall'elettricità in alcuni settori (come verrà approfondito meglio nel Capitolo 2; si è in questo senso maturato un crescente interesse verso il biometano e l'idrogeno prodotti da fonti rinnovabili. Contemporaneamente si cercano tecniche che limitino l'impatto ambientale nell'utilizzo di fonti fossili attraverso tecniche di Carbon Capture and Storage (CCS), anch'esse approfondite nel presente elaborato.

Altro aspetto oggetto di interesse è il decommissioning delle piattaforme Oil&Gas, di cui un caso particolare è quello delle piattaforme di estrazione di gas naturale. Il decommissioning è infatti un'operazione di notevole impatto ambientale e si cercano soluzioni che prevedano il riutilizzo a beneficio delle azioni volte alla transizione energetica.

Il Politecnico di Torino, in collaborazione con l'ente privato Environment Park S.p.a di Torino, il Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) e la Fondazione Istituto Italiano di Tecnologie, è coinvolto in un progetto di valutazione di tre possibili scenari per il riutilizzo delle piattaforme di estrazione di gas metano [2], a seguito elencate:

1. Riutilizzo della piattaforma per generazione di energia da fotovoltaico per la produzione di acqua dissalata;
2. Riutilizzo della piattaforma per lo stoccaggio di una miscela di CH_4 e H_2;
3. Riutilizzo della piattaforma per lo stoccaggio di CO_2 iniettato all'interno del pozzo esaurito.

Il gruppo SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) del Politecnico di Torino, che vede coinvolti i dipartimenti DENERG, DIATI e DISAT, ha partecipato alla realizzazione di una galleria del vento chiamata SEASTAR WT, attraverso una collaborazione con il Parco Scientifico Tecnologico per l'Ambiente "Environment Park", dove il laboratorio trova la sua collocazione. SEASTAR (Sustainable Energy Applied Sciences, Technology & Advanced Research) è infatti un centro di competenza nato nel giugno 2018 nel campo della ricerca e dell'innovazione tecnologica del settore industriale italiano, allo scopo di favorire la transizione ecologica finora descritta [2].

La galleria è nata nel 2020 allo scopo di sperimentare rilasci di gas incidentali in geometrie complesse, fenomeni di inquinamento ambientale e prove su sistemi che operano in condizioni di bassa ventosità, ma la sua attuale configurazione consiste nella predisposizione di un modello in scala di piattaforma di estrazione di gas al centro del laboratorio e di una rete gas progettata per una miscela aria-metano che termina su tale modello, consentendo di studiare rilasci del gas a diverse condizioni operative.

Lo studio dei rilasci, come verrà analizzato dettagliatamente nel Capitolo 2, è infatti un tema chiave dell'analisi di rischio di una piattaforma off-shore, e richiede tecniche di simulazione avanzate, oggetto di ricerca da parte del Politecnico di Torino e di validazione sperimentale attraverso il laboratorio. Al fianco di analisi tradizionali di rilascio di gas metano diventa interessante estendere le valutazioni a scenari che considerino la transizione energetica in atto e le nuove possibilità aperte per l'utilizzo di tali piattaforme.

Proprio partendo da queste considerazioni nascono gli studi raccolti in questa tesi.

1.1 Scopo della tesi

L'importanza del presente lavoro, nonché la sua missione, consiste nel partire da un'analisi di dettaglio del laboratorio e della sua missione principale, per arrivare, in accordo con la valutazione del secondo scenario presentato per il decommissioning delle piattaforme, a sperimentare rilasci di miscele di idrogeno. L'utilità futura dell'utilizzo di tale gas per le prove sperimentali non è tuttavia limitato allo scenario di per sé, ma potrebbe permettere la sperimentazione per altri scopi, in considerazione del fatto che tale molecola si appresta ad avere un ruolo sempre maggiore nel panorama energetico.

Il punto di partenza è appunto l'idea di riconvertire le piattaforme a fine vita in storage temporanei di gas metano-idrogeno. Nel caso in cui l'idrogeno fosse presente a diverse concentrazioni all'interno dei giacimenti in mare, è importante studiare gli effetti di possibili rilasci di questo gas in piattaforma, al pari degli studi che riguardano il metano. Nasce quindi l'esigenza di predisporre il laboratorio alla sperimentazione di questo tipo di scenari, e SEASTAR WT si presenta come il candidato ideale, vista la flessibilità che era stata pensata per esso fin dal principio.

Ovviamente una modifica progettuale di una struttura che opera la gestione e il rilascio di gas infiammabili, oltre che ad aspetti tecnico-operativi, come la valutazione di compatibilità di ciò che è installato, comporta la necessità di un'adeguata valutazione degli aspetti di sicurezza per poter essere messa in atto. Da tali presupposti si articola e sviluppa lo studio seguente.

1.2 Struttura della tesi

Il lavoro di tesi si articola nei i seguenti capitoli:

- Il Capitolo 2 analizza il contesto di riferimento: partendo da una breve analisi della crisi climatica, individuata dai dati dell'IEA, analizza la politica energetica in atto e i suoi ultimi aggiornamenti, prima a livello europeo e poi in Italia, soffermandosi su quello che dovrebbe essere il ruolo dell'idrogeno all'interno del cambiamento e di quali progetti ne vedano il coinvolgimento, fino ad arrivare al ruolo che la molecola potrebbe ricoprire all'interno dei progetti di riconversione delle piattaforme off-shore.
- Il Capitolo 3 passa a descrivere nel dettaglio il laboratorio SEASTAR WT per quello che è oggi, con riferimento alle finalità del laboratorio e ai componenti installati. Verranno quindi presi in considerazione gli ambienti, la rete del gas, la camera di stoccaggio delle bombole, i sistemi di ventilazione ed estrazione e i dispositivi di sicurezza e rilevazione di gas, arrivando agli aspetti presi in analisi per l'adeguamento della galleria a lavorare con miscele di idrogeno e metano a diverse percentuali in miscela.
- Il Capitolo 4 entra nel vivo dello studio concentrandosi sugli aspetti tecnici oggetti di interesse per l'adeguamento: vengono quindi analizzati i sensori presenti sulla piattaforma, quelli di rilevamento gas in laboratorio e i singoli componenti della rete, per valutare tarature ed eventuali sostituzioni.
- Il Capitolo 5 si concentra sulla valutazione di sicurezza; dopo un'analisi iniziale della normativa antincendio, per escludere possibili vincoli iniziali legati al locale di stoccaggio del gas, si passa ad uno studio approfondito della normativa ATEX e alla sua messa in pratica attraverso una valutazione tecnica delle zone di pericolo e della loro estensione in funzione del tipo di miscela e delle quantità di rilascio controllate e non all'interno degli ambienti coinvolti, allo scopo di avere dati numerici realistici per i diversi scenari da cui partire per ragionare sull'adeguamento.
- Il Capitolo 6 analizza le modifiche progettuali, costruttive, operative necessarie per operare con H_2 puro a fronte delle valutazioni tecniche e normative svolte.
- Il Capitolo 7 riassume infine gli aspetti più rilevanti riscontrati nel lavoro e ragionando sugli obiettivi iniziali e sui risultati ottenuti prova a offrire delle soluzioni.

2 Contesto

2.1 Lotta al cambiamento climatico

Con l'avvento delle rivoluzioni industriali iniziate nella seconda metà del '700 e del conseguente utilizzo dei combustibili fossili, il sistema economico e sociale ha subito una profonda e irreversibile trasformazione, ma, a fianco degli aspetti positivi del cambiamento, le emissioni, soprattutto quelle climalteranti, hanno giocato un ruolo decisivo nel cambiamento climatico, portando all'attuale aumento della temperatura media globale di 0,98° centigradi. [3] Tale aumento, secondo la quasi totalità della comunità scientifica, è strettamente legato al progressivo aumento delle emissioni di CO_2 che sono dovute in larga parte a processi di combustione industriali. Come mostrano i dati dell'ultimo Report dell'IEA [4] i cui dati vengono riportati in Figura 1, tali emissioni sono via via cresciute, in particolare dagli anni '50 ad oggi, riassestandosi nel 2021 a valori pre-crisi Covid-19.

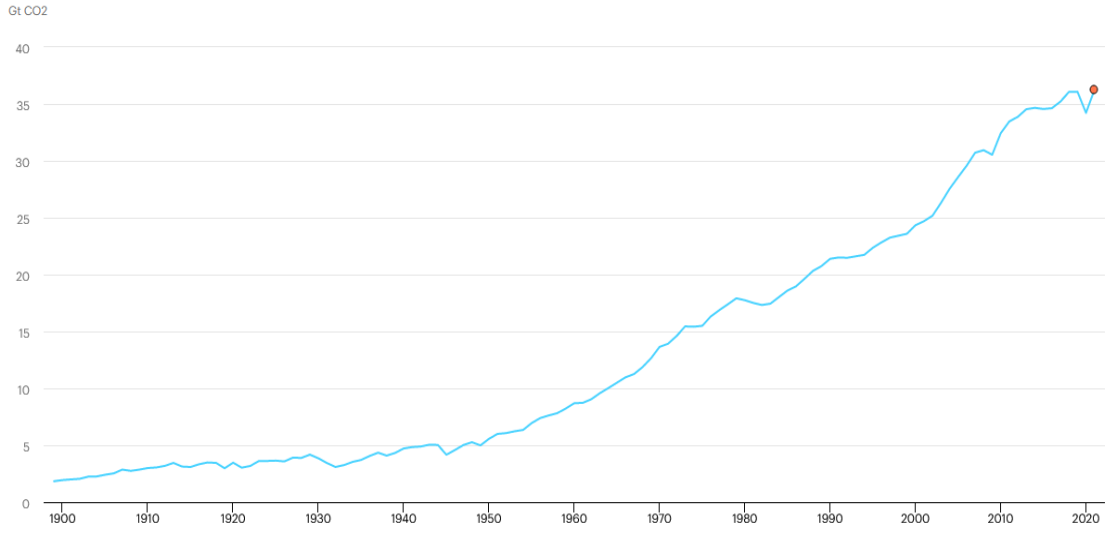

Figura 1 - IEA, CO_2 emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2021, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2021 [4]

Una politica di tipo Business-as-usual potrebbe portare a breve ad un ulteriore aumento della temperatura con conseguenze estremamente pesanti su più livelli, come la siccità in molte aree del mondo, lo scioglimento delle calotte polari ed eventi climatici come l'aumento in intensità e frequenza di fenomeni metereologici devastanti, che già si stanno verificando negli ultimi anni.[5] Diventa fondamentale quindi prevenire al meglio la crisi climatica in atto attraverso una politica sinergica a livello mondiale, che preveda obiettivi a breve termine e azioni concrete che partano da profondi cambiamenti nel settore energetico verso un'ottica sostenibile e sempre più Carbon-Neutral.

2.1.1 Il ruolo dell'Europa

La consapevolezza di dover agire verso la prevenzione di tale crisi climatica è però relativamente recente: nel dicembre 2015 a Parigi la Conferenza delle Parti (COP21) della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), ha siglato un accordo "che fornisce un quadro credibile per raggiungere la decarbonizzazione, con obiettivi a lungo termine per affrontare il cambiamento climatico e una struttura flessibile basata sui contributi dei singoli governi. I governi firmatari si sono impegnati a limitare l'aumento della temperatura al di sotto di 2° centigradi rispetto ai livelli preindustriali con sforzi per rimanere entro 1,5°". [3] L'obiettivo finale è quello di raggiungere la cosiddetta Carbon Neutrality, ovvero un equilibrio fra emissioni e assorbimento del carbonio in atmosfera.

Tale accordo fissava un primo step di obiettivi per l'anno 2020, con il principale traguardo di ridurre le emissioni del 20% rispetto ai livelli pre-industriali, e di aumentare della stessa percentuale la quota di energia prodotta da fonte rinnovabile. Nel dicembre 2019 tali obiettivi erano stati raggiunti e il Consiglio europeo ha approvato un pacchetto di iniziative che mirano ad una transizione verde con l'intento di muovere la crescita economica e creare posti di lavoro e sviluppo sostenibile, chiamato Green Deal europeo, che riesamina gli obiettivi per il 2050 già messi in campo dagli accordi di Parigi. [6]

Nello scenario previsto dal piano 'Net Zero by 2050' [7] i vede come al 2050 il mix energetico della domanda risulti estremamente diverso da quello attuale:

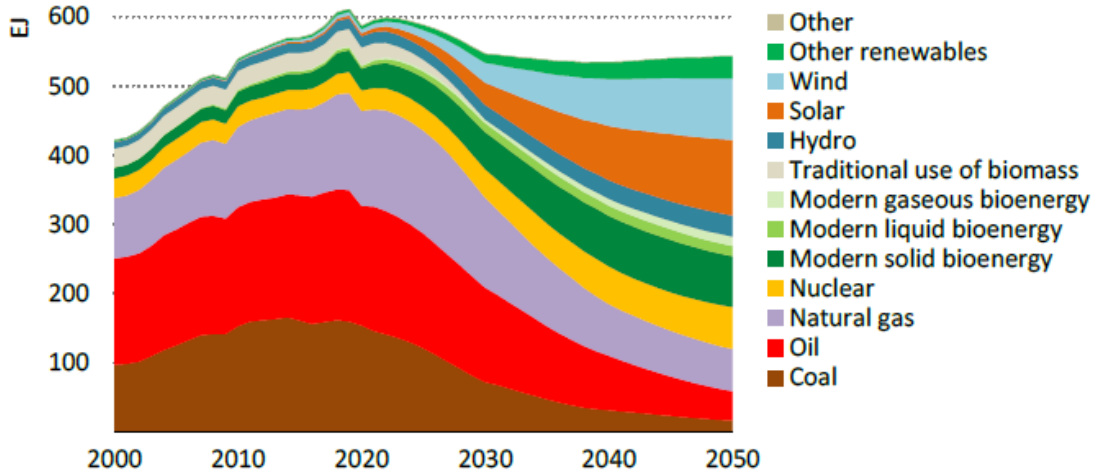

Figura 2 - Renewables and nuclear power displace most fossil fuel use in the NZE, and the share of fossil fuels falls from 80% in 2020 to just over 20% in 2050 - from NetZeroby2050 – IEA [7]

in Figura 2 si vede come le rinnovabili coprano i due terzi del fabbisogno energetico e come l'energia nucleare aggiunga una quota di potenza circa doppia di quella installata al 2020, mentre le fonti fossili riducono drasticamente le loro quote, senza annullarle, dall'80% al 20% al 2050.

La crisi del 2020 dovuta al virus Covid-19 è risultata essere un ulteriore campanello d'allarme e, unita ai movimenti giovanili contro la crisi climatica degli ultimi anni, ha portato ad una maggior consapevolezza sul tema da parte dell'opinione pubblica con effetti sulla classe politica di molti paesi. Il 28 giugno 2021 è stato approvato dalla Commissione europea un nuovo pacchetto per il 2030, ovvero il "Fit for 55", con i principali obiettivi [8] di:

- Ridurre i gas climalteranti (GHGs) del 55% rispetto ai livelli di emissione del 1990;
- Raggiungere il 40% di consumo energetico proveniente da fonti rinnovabili;
- Raggiungere valori di efficientamento energetico del 36-39% nei consumi finali di energia primaria;

stanziando per il raggiungimento di obiettivi così ambiziosi finanziamenti per il valore di 1000 miliardi di Euro nei prossimi 10 anni.

Infine, un ulteriore elemento fondamentale nel panorama europeo è rappresentato dal conflitto Russia-Ucraina, scoppiato nel Febbraio 2022, il quale ha provocato una profonda crisi energetica tutt'ora in atto. L'Europa, infatti, importava più della metà di gas per la produzione energetica dalla Russia e si trova oggi a dover riorganizzare nel breve termine il suo asset energetico per ovviare a questa dipendenza e far fronte ad una possibile riduzione o interruzione della materia prima, insieme a molte altre criticità legate al settore e dovute al conflitto.

L'insieme di tutti questi fattori sta provocando una trasformazione rapida e in continuo movimento in ambito energetico, favorendo tecnologie e progetti che possano fornire energia pulita nel breve e medio termine e accelerando sempre di più il cambiamento della filiera a lungo termine.

2.1.2 Il ruolo dell'Italia

A seguito dell'approvazione del Green Deal sono state stabilite le regole da seguire per gli stati membri per l'accesso al fondo di investimento Next Generation EU -NGEU, che conta 806,9 miliardi di Euro (a prezzi correnti) [9] : ogni stato membro deve infatti predisporre un Piano nazionale per la ripresa e la resilienza (PNRR) per il periodo 2021-2026, secondo l'articolo 18 del Regolamento n. 2021/241/UE [10] che ne fissa i criteri, tra i quali l'investimento di almeno il 37% dei fondi ricevuti in obiettivi legati al clima.

Il 13 Luglio 2021 è stato approvato in forma definitiva il PNRR dell'Italia, che getta le basi per un futuro aggiornamento del PNIEC (Piano Nazionale integrato Energia e Clima) e per una politica di forte sostegno alla transizione energetica del Paese (rappresenta un impegno giuridico); all'interno del documento si trova un'analisi della situazione attuale dell'Italia in termini di emissioni, un piano di suddivisione dei fondi di investimento per ogni settore della transizione e le riforme messe in atto in tal senso. La Figura 3 riassume il piano di investimenti legati alle politiche energetiche predisposte dal documento.

Il primo obiettivo è rappresentato dall'aumento della quota di rinnovabili al 30% dei consumi finali:

a. Attraverso l'agevolazione del potenziale degli impianti già in essere limitando i vincoli burocratici e facendoli lavorare a pieno regime;
b. Facendo leva sullo sviluppo dei sistemi distribuiti di piccola taglia e delle comunità energetiche;
c. Stimolando la crescita della filiera del biometano;
d. Spingendo e promuovendo l'innovazione sostenibile.

Accanto ad una crescita del settore produttivo si prevede un miglioramento della rete elettrica attraverso un aumento della capacità per 6GW, un miglioramento della resilienza di 4.000 km e la digitalizzazione delle sue infrastrutture.

M2C2 - ENERGIA RINNOVABILE, IDROGENO, RETE E MOBILITA' SOSTENIBILE

23,78 Mld

Totale

Ambiti di intervento/Misure	Totale
1. Incrementare la quota di energia prodotta da fonti di energia rinnovabile	5,90
Investimento 1.1: Sviluppo agro-voltaico	1,10
Investimento 1.2: Promozione rinnovabili per le comunità energetiche e l'auto-consumo	2,20
Investimento 1.3: Promozione impianti innovativi (incluso *off-shore*)	0,68
Investimento 1.4: Sviluppo biometano	1,92
Riforma 1.1: Semplificazione delle procedure di autorizzazione per gli impianti rinnovabili *onshore* e *offshore*, nuovo quadro giuridico per sostenere la produzione da fonti rinnovabili e proroga dei tempi e dell'ammissibilità degli attuali regimi di sostegno	-
Riforma 1.2: Nuova normativa per la promozione della produzione e del consumo di gas rinnovabile	-
2. Potenziare e digitalizzare le infrastrutture di rete	4,11
Investimento 2.1: Rafforzamento *smart grid*	3,61
Investimento 2.2: Interventi su resilienza climatica delle reti	0,50
3. Promuovere la produzione, la distribuzione e gli usi finali dell'idrogeno	3,19
Investimento 3.1: Produzione in aree industriali dismesse	0,50
Investimento 3.2: Utilizzo dell'idrogeno in settori *hard-to-abate*	2,00
Investimento 3.3: Sperimentazione dell'idrogeno per il trasporto stradale	0,23
Investimento 3.4: Sperimentazione dell'idrogeno per il trasporto ferroviario	0,30
Investimento 3.5: Ricerca e sviluppo sull'idrogeno	0,16
Riforma 3.1: Semplificazione amministrativa e riduzione degli ostacoli normativi alla diffusione dell'idrogeno	-
Riforma 3.2: Misure volte a promuovere la competitività dell'idrogeno	-
4. Sviluppare un trasporto locale più sostenibile	8,58
Investimento 4.1: Rafforzamento mobilità ciclistica	0,60
Investimento 4.2: Sviluppo trasporto rapido di massa	3,60
Investimento 4.3: Sviluppo infrastrutture di ricarica elettrica	0,74
Investimento 4.4: Rinnovo flotte bus e treni verdi	3,64
Riforma 4.1: Procedure più rapide per la valutazione dei progetti nel settore dei sistemi di trasporto pubblico locale con impianti fissi e nel settore del trasporto rapido di massa	-
5. Sviluppare una *leadership* internazionale industriale e di ricerca e sviluppo nelle principali filiere della transizione	2,00
Investimento 5.1: Rinnovabili e batterie	1,00
Investimento 5.2: Idrogeno	0,45
Investimento 5.3: Bus elettrici	0,30
Investimento 5.4: Supporto a start-up e venture capital attivi nella transizione ecologica	0,25

Figura 3 - Misure e risorse messe in campo per obiettivi energetici in miliardi di Euro - PNRR Italia, 13 Luglio 2021 - pagina 126 [11]

Un ruolo importante all'interno del piano di transizione energetica è rivestito dall'idrogeno, con finanziamenti da parte dello Stato per il valore di 3,2 miliardi di euro: la produzione di idrogeno da fonte rinnovabile, anche chiamato idrogeno verde, e il suo utilizzo in qualità di vettore energetico rappresenta una risorsa per la decarbonizzazione per quei settori dove l'elettrificazione non è una valida strategia e dove non vi sono migliori alternative. Le linee guida del PNRR delineano una strategia di promozione e utilizzo della molecola che prevede:

a. lo sviluppo di progetti industriali nei settori "hard-to-abate", in cui l'utilizzo di combustibili fossili è sempre stato di primaria importanza e di difficile sostituzione: primo tra tutti il siderurgico, ma anche quello chimico, siderurgico, della carta, vetro, ceramica, cemento e fonderie. Il settore hard-to-abate rappresenta nel suo complesso il 64% delle emissioni di CO_2 emesse dal settore industriale, ma allo stesso tempo è una risorsa italiana d'eccellenza rappresentando un valore di 88 Miliardi di Euro di Valore Aggiunto Lordo (5% del PIL), nonché 700 mila posti di lavoro [12] . In questo momento la crisi economica ed energetica dovute prima alla pandemia da Covid-19 e, nell'ultimo anno, alla guerra fra Russia e Ucraina, che ha provocato un aumento del prezzo del gas superiore al 500% in brevissimo tempo, mettono in crisi un settore fondamentale per l'economia italiana; ne consegue che l'obiettivo risulta essere ad oggi di primaria importanza e il settore necessita di interventi e investimenti immediati;
b. la spinta verso la creazione di "hydrogen valleys", ovvero aree che sfruttano l'idrogeno prodotto a km zero, soprattutto in presenza di siti industriali dismessi; all'interno del Piano Nazionale si trovano 5 regioni interessate da questo progetto: Piemonte, Friuli-Venezia-Giulia, Umbria, Basilicata e Puglia, dove gli interventi riguarderanno anche l'area dell'ex Ilva di Taranto, che avrà un ruolo nella sperimentazione delle tecnologie per uso di idrogeno anche nella fase industriale dell'acciaio, mentre il Piemonte ha individuato almeno 28 siti dismessi di interesse [13] ;
c. l'abilitazione all'utilizzo della molecola nel trasporto pesante e nel settore ferroviario ove non sia possibile l'elettrificazione;
d. il supporto al settore di ricerca e sviluppo anche attraverso un sistema regolamentario e di riforme che permettano l'evoluzione dell'intera filiera di produzione, trasporto e distribuzione.

Nel Capitolo 3 verranno analizzati i principali aspetti riguardanti l'idrogeno e il suo crescente interesse in ambito di stoccaggio e trasporto dell'energia.

2.1.3 Effetti della guerra Russia-Ucraina sulla transizione energetica

La guerra tra Russia e Ucraina iniziata lo scorso febbraio ha provocato una crisi energetica legata primariamente agli approvvigionamenti di gas naturale da cui l'Europa è strettamente dipendente, provocando un'impennata dei prezzi dell'energia e mettendo in discussione i piani di transizione energetica avviati, che vedevano nel medio termine il gas come fonte necessaria durante il percorso verso la decarbonizzazione. Tuttavia l'emergenza a livello energetico potrebbe avere effetti positivi portando ad una spinta più rapida verso fonti energetiche alternative; l'Europa si troverebbe di fronte ad una scelta fondamentale: investire ulteriormente verso una transizione verde oppure tornare indietro e utilizzare combustibili 'sporchi' come il carbone per far fronte all'emergenza in atto. Nel caso in cui ci si muova verso il primo scenario è stato analizzato da uno studio condotto dalla Aarhus University in Danimarca [14] come gli effetti di tale politica porterebbero ad un più rapido scenario di decarbonizzazione. Fondamentale in questo senso il nuovo piano approvato l'8 Marzo 2022 dal Consiglio Europeo detto *REPowerEU Plan*, in cui si pianifica un'uscita dalla dipendenza del gas russo entro 5 anni. La spesa per il gas russo, che costituisce per l'Europa un 40% di un fabbisogno annuo di 500 miliardi di metri cubi totali, è di 100 miliardi l'anno. Il piano prevede diverse strategie oltre ad investimenti sul potenziamento di approvvigionamenti da altri fornitori, come una spinta verso le rinnovabili per il 2030 dal 40 al 45%, un aumento dell'efficienza energetica dal 9 al 13%, un raddoppio della capacità fotovoltaica per il 2025, che arriva all'installazione di 600 nuovi GW entro il 2030 a modifica e potenziamento degli impegni presi con il 'Fit for 55'. Per l'ottenimento di questi risultati verranno stanziati dall'Europa ulteriori 210 miliardi di euro da ora al 2027 [15] .

Tra le misure messe in campo nel nuovo piano d'azione si trova anche una sezione dedicata alle pompe di calore, il cui azionamento elettrico potrebbe limitare il consumo di gas, oltre che a progetti legati allo sviluppo della filiera del biometano e dell'idrogeno. È stato fissato infatti un target di 10 milioni di tonnellate di idrogeno verde per uso domestico e altri 10 milioni di importazione per il 2030, al fine di sostituire l'utilizzo di gas naturale, petrolio e carbone nei settori industriali "hard to abate" precedentemente citati e nei trasporti, con dei finanziamenti di 200 milioni di Euro per favorirne il mercato e finanziarne i progetti. La commissione ha inoltre pubblicato due Delegated Acts che definiscono la produzione di idrogeno rinnovabile.

Il 26 Luglio 2022 l'Europa annuncia infine una riduzione delle importazioni di gas russo del 15% per l'inverno a venire.

2.2 Idrogeno

L'idrogeno (o più precisamente diidrogeno) è una molecola biatomica costituita dall'elemento più leggero della tavola periodica, che a livello elementare è il più abbondante presente nell'universo: circa il 75% della massa e più del 90% se guardiamo il numero di atomi [16] . L'atmosfera terrestre ne è tuttavia praticamente priva, in quanto la sua leggerezza non ne permette il trattenimento grazie alla gravità. L'idrogeno, a livello elementare, è invece abbondante sulla Terra in forma molecolare, legato ad atomi più pesanti come l'ossigeno, il carbonio e l'azoto.

La molecola di H_2 è estremamente interessante per via dei suoi possibili utilizzi: ad oggi è infatti principalmente utilizzata nell'industria petrolchimica e chimica nel processo di raffinazione dei combustibili fossili e in quello di sintesi dell'ammoniaca (processo Haber-Bosch), ma negli ultimi anni è di interesse anche il suo utilizzo come vettore energetico. La molecola di H_2 ha un forte potenziale, in quanto è una molecola estremamente reattiva che reagisce con l'aria in concentrazione tra il 4 e il 75% in volume, a pressione atmosferica e in presenza di innesco, liberando un'enorme quantità di energia per unità di massa, superiore a tutti gli altri combustibili comunemente utilizzati, ma con lo svantaggio di una bassa densità volumetrica che richiede grandi volumi ed elevate pressioni di stoccaggio.

Vettore energetico	Potere calorifico inferiore [MJ/kg]
Legna secca	17
Torba secca	13
Torba umida	6
Carbone	33,5
Olio combustibile	41,3
Gasolio	44,4
Cherosene	43,5
Benzina	43,6
GPL	46,1
Metano	50
Idrogeno	**120**

Tabella 1 - Poteri calorifici inferiori dei principali combustibili

A differenza degli altri combustibili, tuttavia, possiede l'enorme vantaggio di non provocare emissioni dirette di CO_2 in atmosfera, in quanto la sua reazione con l'ossigeno (prima fra tutte con quello contenuto nell'aria) ha come unici prodotti acqua ed energia:

$$2H_2(g) \ + \ O_2(g) \ \rightarrow \ 2H_2O(l) \ + \ 572\ kJ/mol$$

Per questa ragione negli ultimi anni si sta guardando all'idrogeno con grande interesse, per capirne ed analizzarne le reali potenzialità. Ma dove ci sono grandi possibilità ci sono anche limitazioni e fattori fondamentali da considerare affinché tale molecola si inserisca virtuosamente nel processo di transizione energetica.

2.2.1 Interesse e ruolo nella transizione

A seguito dello *European Green Deal* in cui l'UE si è formalmente impegnata a portare avanti l'obiettivo Net Zero per il 2050, il piano di decarbonizzazione avviato con gli Accordi di Parigi ha delineato nuove strategie e linee di investimento per finanziare progetti di diversa natura, e all'interno di questo piano trova spazio l'idrogeno. Da molti considerato il combustibile del futuro, si tratta più propriamente, come già accennato, di un vettore energetico, in quanto non è presente in atmosfera (o quasi) ma deve essere prodotto da altri combustibili come sottoprodotto di reazioni chimiche. A seconda della risorsa utilizzata per la sua produzione vengono associati colori diversi alla molecola.

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind, Solar, Hydro, Geothermal, Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS gasification + CCUS	Natural gas, coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

GCG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

Figura 4 - Figura illustrativa dello spettro di colori dell'idrogeno - Global Energy Infrastructure (GEI), 2021 – WORKING PAPAER – NATIONAL HYDROGENE STRATEGIES [17]

L'idrogeno GRIGIO è prodotto dal processo di steam reforming del gas naturale, mentre il TURCHESE da un suo processo di pirolisi; insieme costituiscono circa i tre quarti della produzione al 2020 emettendo10 tonnellate di CO_2 per ogni tonnellata di H_2 prodotta.

L'idrogeno NERO è prodotto dal processo di gassificazione del carbone, che rappresenta il 23% del totale nel 2020 e produce 19 tonnellate di CO_2 per tonnellata di H_2. L'idrogeno MARRONE deriva invece dalla gassificazione della lignite.

L'idrogeno BLU è di particolare interesse in quanto, sebbene prodotto dal gas naturale, alle reazioni chimiche che ne portano alla produzione segue un processo di Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) che ne prevede la cattura e lo stoccaggio della CO_2 prodotta dalla reazione. Tale processo ha sicuramente dei vantaggi rispetto alla semplice immissione dell'anidride carbonica in atmosfera, ma non è ancora un processo 'green', inoltre lo stoccaggio della CO_2 è un processo che per molti aspetti risulta essere tutt'oggi oggetto di studio e valutazione. Negli obiettivi del Net Zero Emissions parte dell'idrogeno prodotto nel 2050 è da considerarsi di questa tipologia.

Le tipologie di idrogeno GIALLO e VIOLA sono prodotte da tecnologie che sfruttano l'elettrolisi dell'acqua, ma la fonte energetica non è ancora di natura rinnovabile. L'idrogeno VIOLA in particolare è la tipologia di origine nucleare, e per quanto la sua impronta ecologia a livello di CO_2 prodotta dal processo diretto sia nulla, la filiera presenta tutti i rischi e le conseguenze in termini di smaltimento delle scorie caratteristiche dell'utilizzo di combustibili nucleari per la produzione di energia.

Infine è presente l'idrogeno GREEN che è la tipologia sul quale si concentra maggiormente l'interesse generale. Prodotto da processi di elettrolisi che sfruttano l'energia rinnovabile essenzialmente di fonti quali l'eolico e il solare, questa percentuale di idrogeno parte dall'essere quasi nulla ma mira a crescere e farsi strada con la progressiva permeazione di tali fonti all'interno del mix energetico dei vari paesi. L'idea alla base è quella di sfruttare la sovraproduzione energetica che si avrebbe in alcuni momenti del giorno, prime fra tutte le ore di picco solare dove la produzione da fotovoltaico arriverebbe a superare la domanda, per immagazzinare energia sotto forma di idrogeno, molecola leggera, più semplice da immagazzinare per lunghi periodi dell'energia elettrica e prima di emissioni all'utilizzo. La tecnologia dell'elettrolisi è matura e consolidata, ma il settore di ricerca e sviluppo è molto attivo in questo senso grazie ad ENEA, che studia nuove tecnologie di elettrolizzatori che abbattano i costi e che prendano in considerazione anche altre fonti rinnovabili per questi processi, come i biocombustibili. Altro enorme vantaggio, in questo senso, può essere visto nello sfruttare questa possibilità di immagazzinamento per gestire le irregolarità della rete che si avrebbero al crescere della produzione di fotovoltaico ed eolico, da sempre fonte di aleatorietà e difficile controllo in termini di immissione in rete; la necessità di trovare una soluzione ai crescenti problemi di bilanciamento della

rete elettrica, dovuta all'aumento di produzione da fonti rinnovabili quali solare fotovoltaico ed eolico, è infatti un aspetto di grande importanza negli ultimi anni. [18]

A fronte dei grandi vantaggi di questa tecnologia molti sono ancora gli ostacoli da superare per rendere competitiva sul mercato questa produzione, prima fra tutti la questione dei costi energetici; il Green Hydrogen non risulta conveniente rispetto alle altre tipologie in quanto la risorsa energetica da cui viene prodotto è sempre stata più preziosa. Delle 90 Mt di idrogeno prodotte nel 2020 il 99% è di tipo grigio o nero, ma questo aspetto può cambiare con la crescita del prezzo delle fonti fossili e soprattutto con l'abbattimento dei costi delle risorse rinnovabili. Per questo motivo sono fondamentali sforzi immediati da parte della politica, dove l'IEA identifica tre grosse sfide da affrontare:

- La necessità di una politica mirata agli obiettivi di crescita del settore attraverso grossi investimenti in progetti di produzione, per spingere nella crescita della domanda e nel settore di ricerca e sviluppo per abbattere i costi tecnologici il più possibile, che si affiancano a quelli della risorsa energetica;
- La creazione di un sistema di trasporto e distribuzione tale da permettere alla filiera di esistere e crescere;
- La necessità di un sistema di regolamentazioni chiaro e internazionale.

Questi obiettivi sono stati messi in luce e perseguiti dall'Europa, prima tra tutti, che si appresta a diventare organizzazione leader del settore con il raggiungimento dello scenario Net Zero al 2050. Analizzando ora il ruolo dell'idrogeno all'interno di queste politiche si vede come, nello scenario al 2050 fornito ancora una volta dal Report "Net Zero by 2050" [7] , le quantità di idrogeno prodotto crescano dalle 90 Mt nel 2020 a 200 Mt nel 2030, fino a superare le 500 Mt nell'anno target 2050, come mostrato in figura 5, in cui viene rappresentata la quota crescente in base al settore di usi finali.

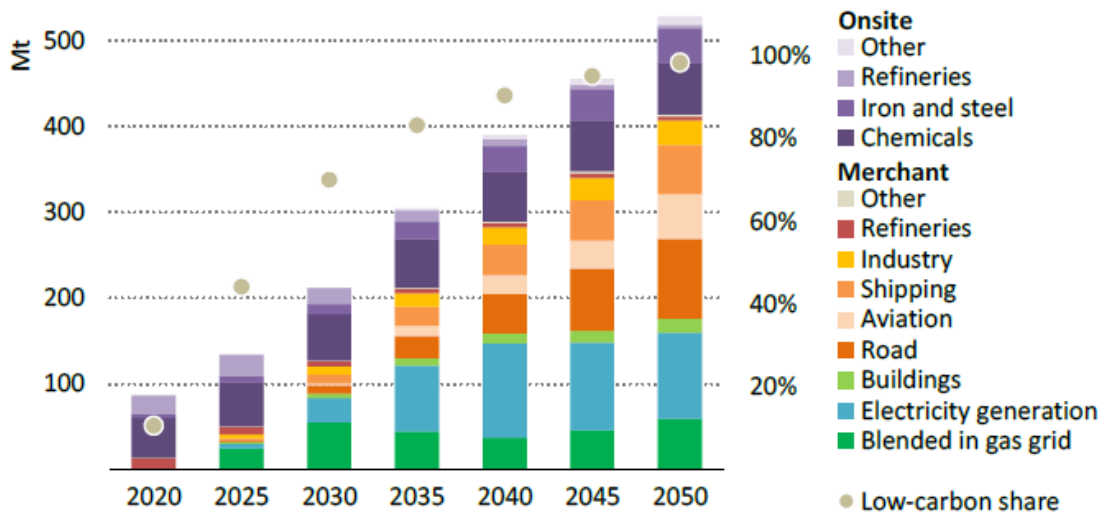

Figura 5 - Global hydrogen and hydrogen-based fuel use in the NZE - from NetZeroby2050 – IEA [7]

Sono inoltre riassunti in Tabella 2 i dati relativi agli scenari al 2030 e al 2050 di consumo e produzione di idrogeno e idrogeno-derivati: interessante notare come nella produzione al 2050 una quota pari al 38% del totale sia data dall'idrogeno blu proveniente dalle tecnologie di CCUS, mentre nel consumo finale il settore dei trasporti e quello dell'industria sono i più coinvolti dalla transizione passando da quote nulle o molto basse a rappresentare circa l'80% del consumo; più lenta la transizione per i trasporti al 2030.

Sector	2020	2030	2050
Total production hydrogen-based fuels (Mt)	87	212	528
Low-carbon hydrogen production	9	150	520
share of fossil-based with CCUS	*95%*	*46%*	*38%*
share of electrolysis-based	*5%*	*54%*	*62%*
Merchant production	15	127	414
Onsite production	73	85	114
Total consumption hydrogen-based fuels (Mt)	87	212	528
Electricity	0	52	102
of which hydrogen	0	43	88
of which ammonia	0	8	13
Refineries	36	25	8
Buildings and agriculture	0	17	23
Transport	0	25	207
of which hydrogen	0	11	106
of which ammonia	0	8	44
of which synthetic fuels	0	5	56
Industry	51	93	187

Tabella 2 - Dati di produzione e consumo di idrogeno e combustibili derivati in milioni di tonnellate per gli anni 2020-2030-2050 -from NetZeroby2050 – IEA [7]

Il documento "*Global Hydrogen Review 2021*" *[19]* , che mostra una panoramica aggiornata della situazione del vettore energetico a livello mondiale, riporta gli obiettivi al 2030 dove 350 nuovi progetti porteranno ad una capacità mondiale complessiva degli elettrolizzatori pari a 54 GW, la quale a metà 2021 si attestava a 300 MW. Progetti che coinvolgono la produzione di H_2 da fonte fossile con tecnologie di rimozione e stoccaggio dell'anidride carbonica sono invece 16 ad oggi e altri 50 in fase di progetto e, se realizzati, possono accrescere la produzione di idrogeno di più di 9 Mt entro il 2030.

2.2.2 Infrastrutture di trasporto e stoccaggio

Uno dei punti fondamentali richiesti dall'Europa e recepiti nel PNRR italiano è legato alle infrastrutture per il trasporto e la distribuzione. Oggi l'idrogeno è una realtà e per produrre e trasportare grandi quantità di idrogeno a basso costo il tema infrastrutturale diventa cruciale.

Secondo Cosma Panzacchi, EVP di SNAM in un'intervista rilasciata a "Il Sole 24 Ore" a marzo 2022 [20] l'idrogeno oggi per essere competitivo deve avere un costo compreso tra i 2 e i 4 Euro al kg: se la sua produzione fosse locale il costo salirebbe dal 50 al 100%, mentre se venisse prodotto in larga scala e trasportato attraverso infrastrutture efficienti si riuscirebbe ad avere un costo contenuto per via del basso costo di trasporto per unità di lunghezza; in questo senso la rete diventa un elemento fondamentale. Il settore dell'industria in Italia è di primaria importanza, e come già detto nel precedente paragrafo necessita in gran parte di un vettore energetico diverso dall'elettricità rendendo l'idrogeno un buon candidato a ricoprire un ruolo nella decarbonizzazione: l'impegno di SNAM è da un lato quello di certificare le reti di trasporto affinché siano compatibili con il nuovo vettore, dall'altra lavora sullo stoccaggio e su nuovi progetti sostenuti dal Recovery Plan e dal PNRR, che come si vede in Figura 3 prevede investimenti del valore di 2 miliardi nell'idrogeno per il settore degli "hard to abate" industriale. Le enormi risorse messe in campo consentono quindi lo sviluppo di progetti importanti messi in atto da molti dei principali player del settore energetico italiano.

A livello di trasporto del gas, il primo passo è quello di analizzare le infrastrutture presenti, per verificare come l'aggiunta di percentuali di idrogeno al gas man mano crescenti influenzino la rete, di proprietà di SNAM. A questo scopo la società, basandosi sullo standard ASME B31.12, che definisce i criteri per la compatibilità delle tubazioni in acciaio esistenti e nuove per il trasporto di H_2, sta conducendo studi di compatibilità in collaborazione con il RINA, società italiana leader nella certificazione a livello internazionale, valuta la compatibilità dei materiali per nuovi elementi della rete secondo una normativa interna e nell'aprile 2019 ha condotto delle sperimentazioni volte a valutare l'immissione di idrogeno al 5% in volume in miscela con il metano in rete a Contursi Terme, in provincia di Salerno, con fornitura per circa un mese della suddetta miscela a due imprese industriali della zona, replicando la sperimentazione nel dicembre dello stesso anno con percentuali del 10% di idrogeno in volume.

Secondo l'azienda infatti: "Applicando la percentuale del 10% di idrogeno al totale del gas trasportato annualmente da Snam, se ne potrebbero immettere ogni anno in rete 7 miliardi di metri cubi, un quantitativo equivalente ai consumi annui di 3 milioni di famiglie e che consentirebbe di ridurre le emissioni di anidride carbonica di 5 milioni di tonnellate." [21]

L'intento dell'azienda è quello di certificare la rete alla possibilità non solo di gestire miscele di biometano e idrogeno, secondo i progetti che mirano al trasporto di gas interamente de-carbonizzato nel 2050, ma anche di poter gestire in rete idrogeno puro.

All'interno di questo quadro generale un altro tema aperto è quello legato allo stoccaggio dell'idrogeno. La sfida che il sistema paese dovrà affrontare per svincolarsi dalle fonti fossili di energia, infatti, richiede tecnologie e soluzioni alternative e basso-emissive; nel panorama che va generandosi l'idrogeno potrebbe trovare il suo posto grazie ai suoi vantaggi e alle sue caratteristiche, così come altre soluzioni citate. Da qui l'idea di riutilizzare le piattaforme a fine vita in modo vantaggioso e sostenibile.

2.3 Riconversione delle piattaforme off-shore

Le coste italiane contano ad oggi 138 piattaforme off-shore: la maggior parte di esse si trova nell'Adriatico e qualcuna sulle coste della Sicilia, e delle 125 piattaforme in funzione solo 12 estraggono olio mentre tutte le altre estraggono gas. La loro costruzione iniziò a metà degli anni '60 a seguito di rilevazioni di giacimenti petroliferi e vedono coinvolte diverse compagnie, tra cui Shell, Total, Elf e altre, mentre gli operatori sono Eni e Edison, che molto spesso però non detengono il 100% delle piattaforme per questioni di gestione e di business. Il massimo periodo di realizzazione di queste strutture lo si ha tra gli anni '80 del novecento e i primi anni 2000, a cui è seguito uno stallo dovuto a problemi di natura burocratica e ambientale, nonché la crisi economica. Considerando una vita media delle piattaforme di 50 anni e i tempi di costruzione, le piattaforme ancora attive si troveranno presto nella condizione di fine vita; tuttavia le operazioni di decommissioning non sono banali e sono molto costose.

Nel 2019 si è arrivati a un piano di smantellamento con linee guida emanate dal decreto interministeriale di febbraio dello stesso anno per dismettere 34 delle 138 piattaforme italiane. Il Ministero dello sviluppo economico concede tuttavia la possibilità di riutilizzare alcune di queste piattaforme, a seguito di progetti che ne prevedano un riutilizzo in campo sostenibile.

Ma il problema del dare nuova vita alle piattaforme è più in generale di natura internazionale; soprattutto a livello europeo, a seguito della ricerca di soluzioni di sostenibilità e green economy, sono nati e stanno nascendo diversi tipi di progetto che prevedono un utilizzo sostenibile di tali strutture.

2.3.1 Nuovi progetti per la produzione di Green Hydrogen

Ponendo l'attenzione sull'idrogeno come nuova possibilità legata alla riconversione delle piattaforme off-shore, è interessante citare alcuni tra i nuovi progetti che coinvolgono la produzione di Green Hydrogen e il riutilizzo della rete di gas che le connette al sistema di trasporto e stoccaggio, attraverso l'integrazione di diverse tecnologie.

Il progetto PosHYdon [22] , della società Neptune Energy del Regno Unito, è il primo progetto di questo tipo a livello mondiale e sarà ospitato dalla piattaforma Q13a-A a tredici chilometri dalla costa olandese. L'elettricità generata dalle turbine eoliche offshore alimenterà l'impianto di idrogeno sulla piattaforma, convertendo l'acqua di mare in acqua demineralizzata, quindi in idrogeno tramite elettrolisi. L'obiettivo primario del progetto è quello di acquisire esperienza nell'integrazione di sistemi energetici funzionanti in mare e nella produzione di idrogeno in un ambiente

offshore. Inoltre sarà testata l'efficienza di un elettrolizzatore con una fornitura variabile dall'eolico offshore e si otterranno informazioni sui costi di installazione e manutenzione. L'idrogeno verde sarà miscelato con il gas e trasportato attraverso il gasdotto esistente fino alla costa. L'elettrolizzatore da 1 MW produrrà fino a 400 kg di idrogeno verde al giorno.

Un articolo [23] informa che i sussidi di 3,6 milioni di euro saranno forniti dalla Netherlands Enterprise Agency che consentirà al consorzio di avviare le attività sul progetto. Il costo del progetto pilota è stimato a 10 milioni di euro e ambisce alla produzione di idrogeno in 2 o 3 anni. Il resto della spesa di realizzazione verrà finanziata dai partner del consorzio, mentre i partner della piattaforma sono gli operatori Neptune (50%), EBN (40%) e Taqa (10%).

Figura 6- Fotografia della piattaforma legata al progetto PosHYdon - immagine tratta dall'articolo [23]

Secondo l'articolo l'amministratore delegato di Neptune per i Paesi Bassi, Lex de Groot, ha dichiarato: "Il settore olandese del Mare del Nord ha un futuro entusiasmante come 'nuovo hub energetico' e può svolgere un ruolo di primo piano nella produzione di idrogeno verde su larga scala per l'Europa nord-occidentale, dato che la sua infrastruttura che collega l'offshore con l'onshore", supportando gli obiettivi del Net Zero, e aggiungendo che l'ampia rete infrastrutturale collegata alle reti internazionali possa facilmente ospitare altri parchi eolici più al largo, convertendo la produzione di elettricità in idrogeno verde e trasportandola alla rete a terra.

Passando all'Italia, una collaborazione tra le società Saipem e Quint'x, ha promosso un nuovo progetto verde identificato come il primo progetto mondiale di produzione integrata di idrogeno verde da fotovoltaico ed eolico tramite l'elettrolisi, ovvero Agnes (Adriatic Green Network of Energy Sources). Il piano richiederà investimenti superiori al miliardo di euro e raggiungerà una potenza installata complessiva di 620

MW, a cui si aggiungeranno 4000 tonnellate di idrogeno prodotto ogni anno. Il progetto si lega ad uno dei più grandi parchi eolici del Mediterraneo, consistente in 65 turbine con una capacità di 520 MW; aerogeneratori disposti sui due siti di Romagna 1 e 2, a 10 e 13 miglia nautiche dalla costa. Altri 100 MW saranno generati da pannelli fotovoltaici galleggianti (solare flottante) costruiti da Moss Maritime, azienda norvegese legata a Saipem e specializzata nella progettazione di infrastrutture offshore e flottanti. "Il distretto energetico concepito interamente in ottica green produrrà 1.5 TWh di energia". [24]

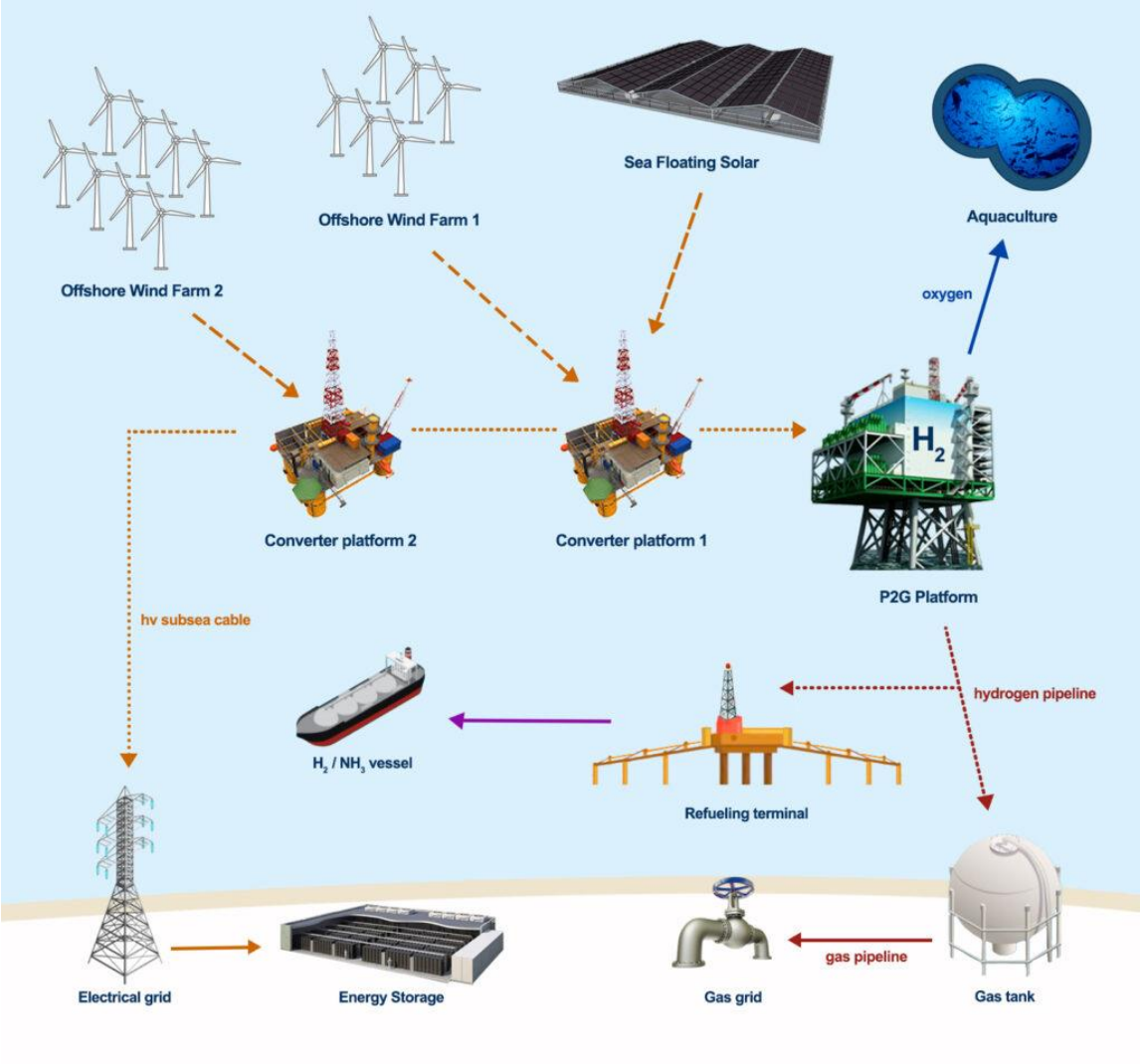

Figura 7 - Rappresentazione del progetto Agnes a largo delle coste di Ravenna -immagine presa dal sito del progetto [25]

In Figura 7 è rappresentato lo schema del progetto: P2G Platform è la piattaforma sulla quale, mediante l'elettrolisi dell'acqua, si avrà la produzione di ossigeno e idrogeno. Il processo è green in quanto l'energia elettrica utilizzata arriva in modo integrato dai parchi eolici e fotovoltaico ad essa collegati mediante altre piattaforme di raccolta. Il gas prodotto verrà immesso in un sistema di pipeline e stoccato prima di essere

immesso in rete o trasportato per via navale, mentre una parte dell'elettricità prodotta da fonte rinnovabile viene immessa sulla rete elettrica.

I progetti citati, entrambi nati nel 2021, mostrano una nuova direzione nell'ambito del decommissioning verso una transizione energetica sempre più ambiziosa, che vuole fare dell'idrogeno un fattore portante dell'economia emergente; è proprio all'interno di questo contesto che potrebbe inserirsi il progetto di trasformazione della Galleria del Vento SEASTAR.

2.4 Sicurezza degli impianti off-shore

La sicurezza è un tema centrale quando si parla di impianti di estrazione off-shore: a seguito dell'incidente avvenuto nel 2010 nel Golfo del Messico sulla piattaforma petrolifera Deepwater Horizon, che ha causato lo sversamento in mare di circa 4,2 milioni di barili di petrolio e la morte di 11 membri dell'equipaggio [26] , si è resa necessaria una maggiore regolamentazione in merito alle valutazioni di sicurezza necessarie per questo tipo di piattaforme. Il 12 giugno 2013 la Commissione Europea, con la Direttiva 2013/30/UE del Parlamento Europeo [27] , ha fissato degli standard minimi di sicurezza per la ricerca e produzione di idrocarburi in mare. La direttiva è stata recepita dall'Italia attraverso il D.lgs. 145 del 2015 e prevede, tra le altre cose, un'analisi di rischio di incedenti rilevati attraverso la valutazione di possibili scenari di rilascio di gas in piattaforma [28] .

L'analisi di rischio è necessaria in quanto il gas metano estratto è un gas in pressione infiammabile, e nello scenario in cui la riconversione delle piattaforme coinvolge l'utilizzo di gas con pericolo di incendio ed esplosione come l'idrogeno, tale analisi rimane necessaria. Uno dei metodi classici con cui analizzare i possibili rilasci consiste in simulazioni fluidodinamiche di tipo CFD. Queste tecniche tuttavia, sebbene molto sofisticate e precise nella modellazione, comportano lo svantaggio di possedere un elevato costo computazionale. Allo stesso tempo però è fondamentale, poiché svolge un'analisi accurata, migliore di modelli semi-empirici utilizzati nella pratica comune che, in un caso come quello in esame, sovrastimerebbero il rischio e di conseguenza i costi per la sua gestione. È stato quindi sviluppato un modello innovativo, che permettesse un approccio più rapido e leggero senza sacrificare eccessivamente l'accuratezza del modello.

L'approccio Source Box Accident Model, denominato SBAM, modella rilasci di gas offrendo un ottimo compromesso tra accuratezza e costo computazionale. Esso sfrutta "la scissione dei fenomeni multifisici e multiscala che caratterizzano l'incidente" [29] : vengono infatti analizzate due fasi separate, governate da fenomeni fisici differenti. Il rilascio avviene a velocità supersonica, ma tale velocità si riduce molto rapidamente in una distanza, detta disco di Mach, dove non può essere ipotizzata l'incomprimibilità del fluido; tale fase viene analizzata all'interno di un piccolo ambiente detto *Source Box*. Al di fuori di questo dominio il rilascio è subsonico e il fenomeno è analizzato separatamente utilizzando come input i risultati della Source Box. Disaccoppiando le due fasi e catalogando la prima in una libreria di possibili scenari, è possibile alleggerire la simulazione ottimizzando lo studio.

Trattandosi di un modello innovativo, si rende necessaria una sua validazione sperimentale, in modo da confrontare i risultati ottenuti dal modello. Per questa ragione si è resa necessaria la predisposizione di una galleria del vento, che verrà analizzata nel dettaglio nel Capitolo 3.

3 SEASTAR WT: la Galleria del Vento

Come accennato nel Capitolo 1, il progetto della galleria nasce da una collaborazione del Politecnico di Torino con il Ministero dello Sviluppo Economico allo scopo di validare sperimentalmente i risultati prodotti dallo studio di modelli CFD innovativi di rilasci di gas in pressione in impianti Oil&gas off-shore. Il laboratorio trova la sua collocazione all'interno del complesso di Environment Park a Torino, in uno spazio di circa 200 m^2 di superficie e 9 m di altezza, all'interno del centro di competenza SEASTAR (Sustainable Energy Applied Sciences, Technology & Advanced Research); con il supportato ministero dello sviluppo economico, i lavori di costruzione hanno seguito un periodo che va da Ottobre 2019 ad Aprile 2020. Nel Dicembre 2020 l'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) si è unito al progetto SEASTAR a supporto dello sviluppo e dell'innovazione tecnologica a basso impatto ambientale.

L'esperimento per la validazione del modello SBAM consiste nel rilascio del gas in pressione, simulando un rilascio incidentale a bordo di una riproduzione (in scala 1:10 rispetto alle dimensioni di un impianto reale) di una piattaforma off-shore. Il rilascio viene effettuato all'interno di uno dei piani del Mock-Up sperimentale predisposto, che viene monitorato attraverso sensori di concentrazione e di velocità, allo scopo di verificare la dispersione della nube di gas all'interno dell'ambiente congestionato sulle piattaforme petrolifere off-shore. La galleria permette di riprodurre in scala i livelli di ventosità caratteristici degli ambienti nelle quali le piattaforme sono inserite, riproducendo quindi la dispersione della nube prodotta dal rilascio. [30]

3.1 Descrizione del laboratorio

Il laboratorio SEASTAR WT è configurato per ottemperare i seguenti obiettivi:

- Avere un ambiente per simulare le condizioni ambiente di lavoro delle piattaforme.
- Prevedere un modello che simuli, a livello fluidodinamico, la piattaforma e la configurazione dei suoi principali elementi come ostacoli al moto del flusso di gas rilasciato.
- Simulare, in modo opportuno e con i giusti fattori di scala, i rilasci di gas attraverso una rete di distribuzione opportunamente dimensionata per arrivare fino al Mock-up.
- Prevedere una sala di controllo per gestire l'esperimento ed elaborarne i dati.

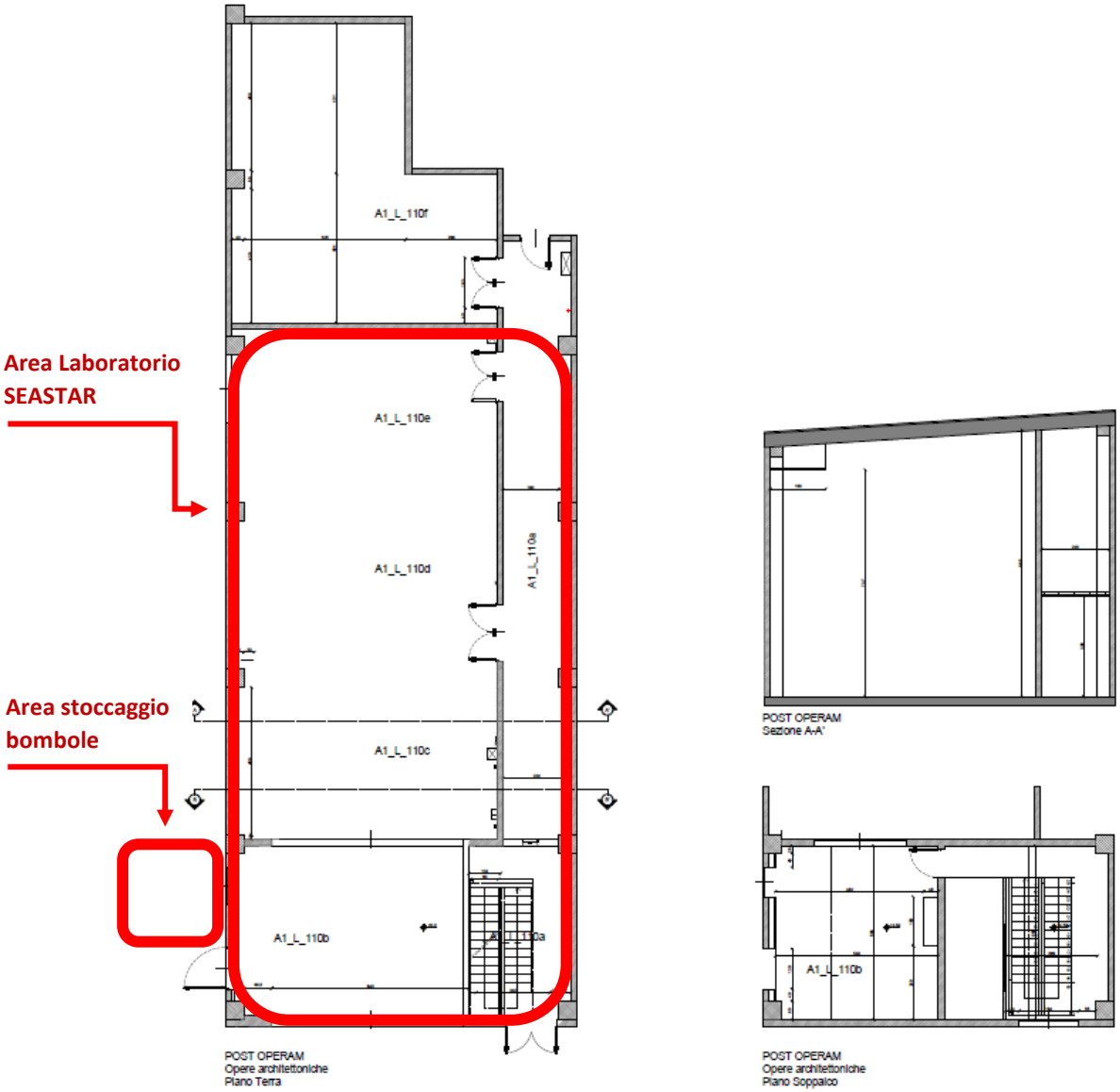

Figura 8 - Planimetria dei locali del laboratorio SEASTAR WT: a SX il livello 1, dove in rosso sono evidenziati i locali destinati allo svolgimento delle attività sperimentali; in alto a DX una sezione interna dei locali del laboratorio; in basso a DX la planimetria dei locali del livello 2 – dalle planimetrie Autocad di RAMS&E [31]

Per farlo è necessaria una galleria del vento che in uno spazio opportuno realizzi un flusso d'aria adeguato, controllato e generato da un banco di ventilatori installati all'interno della stessa, nonché di un sistema sensoristico di rilevazione di velocità e concentrazione del flusso adeguato a mappare il rilascio e la dispersione (in termini di velocità e concentrazioni) e poter confrontare i risultati ottenuti con quelli provenienti dalla simulazione CFD. In Figura 8 troviamo la configurazione del laboratorio dopo l'intervento, in cui sono evidenziate in rosso le due aree oggetto di valutazione, in quanto direttamente interessate dalla presenza di gas.

Figura 9 - Posizionamento del laboratorio SEASTAR WT all'interno del complesso di Environment Park di Torino – dalla relazione di progetto definitivo del laboratorio [30]

La Figura 9 mostra la collocazione del laboratorio all'interno del complesso di Environment Park.

I locali di interesse sono dotati di sistema di riscaldamento/condizionamento aria, gestito da un UTA posizionata nel corridoio adiacente ai locali, con una potenza in mandata di 15 kW e una portata di 22100 m^3/h, con possibilità di sezionamento del sistema di trattamento aria e di isolamento di un canale; punti di alimentazione elettrica trifase e monofase da 16A in ogni locale; potenza elettrica massima di 70kW da linee elettriche derivabili dal laboratorio adiacente. La galleria è progettata per range di velocità tra 0 e 6 m/s ed è di tipo subsonico a circuito aperto.

I componenti principali sono un condotto convergente, la camera di prova, un condotto divergente, il vano dei ventilatori all'interno della camera di prova, una camera di rotazione del flusso e un cavedio, e sono rappresentati in Figura 10 e Figura 11. Importante sottolineare come la distanza fra il condotto convergente e quello divergente sia pari a 8m, mentre quella tra l'inizio del condotto divergente e la batteria di ventilatori corrisponda a 4m da progetto. Operativamente è stato valutato che la distanza ottimale per il Mock-up all'interno della galleria è pari a 5m dalla superficie del condotto convergente, al fine di ottimizzare gli effetti fluidodinamici.

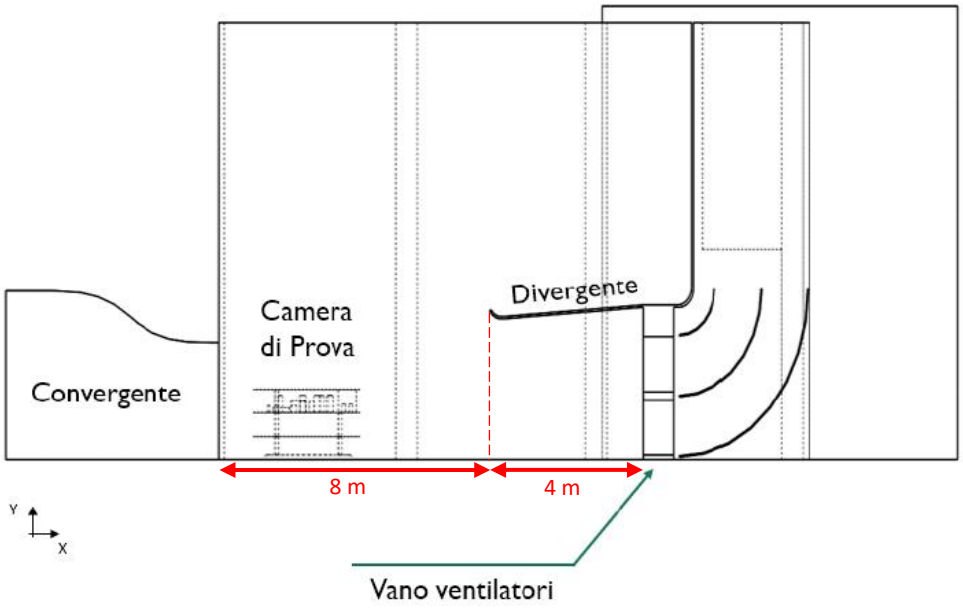

Figura 10 - Geometria della galleria del vento -1 [30]

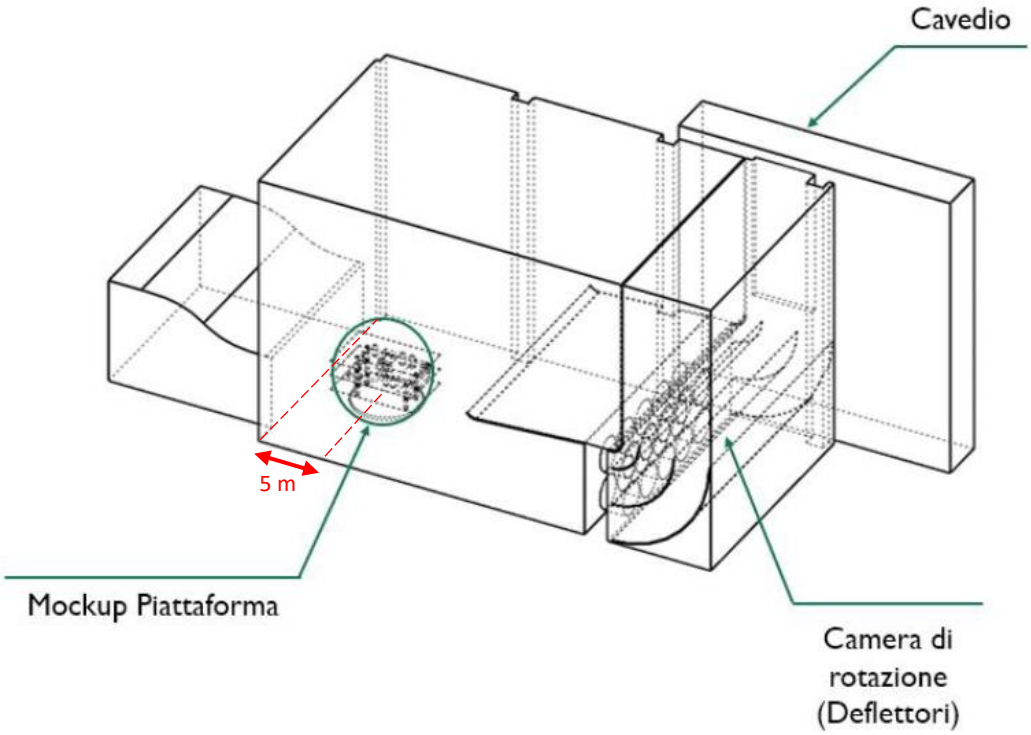

Figura 11 - Geometria della galleria del vento -2 [30]

I 10 ventilatori installati nella batteria, aventi possibilità di regolazione di velocità tramite regolazione in frequenza tra 10 e 50 Hz, aspirano l'aria dall'ambiente esterno tramite il condotto convergente, che verrà raddrizzato dal componente per entrare in camera di prova ed investire la piattaforma sperimentale in modo uniforme; dopodiché l'aria viene aspirata dai ventilatori ed espulsa attraverso l'apertura nel cavedio confinante con il laboratorio attraverso la camera di rotazione del flusso.

3.2 Mock-up e sensoristica

Il Mock-up utilizzato per la sperimentazione è un modello di piattaforma Oil&gas off-shore, in scala 1:10, che consiste di un carrello su cui, sostenuti da una struttura di 4 gambe, si trovano tre piani paralleli (o deck). Lo scopo di tale modello è infatti quello di riprodurre, ai fini del rilascio, le caratteristiche della piattaforma in termini di componenti installati nel piano reale, nel quale è più probabile che il rilascio avvenga, mentre il fattore di scala è legato alla necessità di avere un modello compatto per le analisi di laboratorio e per le dimensioni del foro di rilascio sperimentale, che presenta lo stesso livello di scala.

Sul piano più basso sono fissati gli ostacoli, ovvero ingombri di forma geometrica semplice (parallelepipedi o cilindri) sensorizzati, con l'obiettivo di ricreare ed analizzare l'area più critica della piattaforma, ovvero quella adibita al trattamento del gas, nonché le sale di controllo dove il processo viene monitorato. Il primo e il secondo piano (partendo dal considerare come piano zero il piano sensorizzato) rappresentano invece le aree della piattaforma superiori, con funzioni diverse e non coinvolte in una prima fase del rilascio. La piattaforma è mobile e posizionata su un carrello per permettere la simulazione di diverse angolature del vento, dal momento che la galleria permette il flusso lungo un'unica direzione perpendicolare alla batteria di ventilatori, ed è dotata di un sistema di blocco per fissarne la posizione ad un angolo definito durante l'esperimento. Essendo l'obiettivo quello di modellare una piattaforma reale di dimensioni 30 m X 20 m, le rispettive misure scalate saranno 3 m X 2 m in pianta per i piani del Mock-up. Per garantire un buon risultato dell'esperimento l'altezza del piano sensorizzato si trova a circa 1,25 m dal suolo.

Figura 12 - Fotografia del Mock-Up all'interno della camera di prova [32]

Gli ostacoli posizionati sul piano più basso contengono sensori di concentrazione e di velocità.

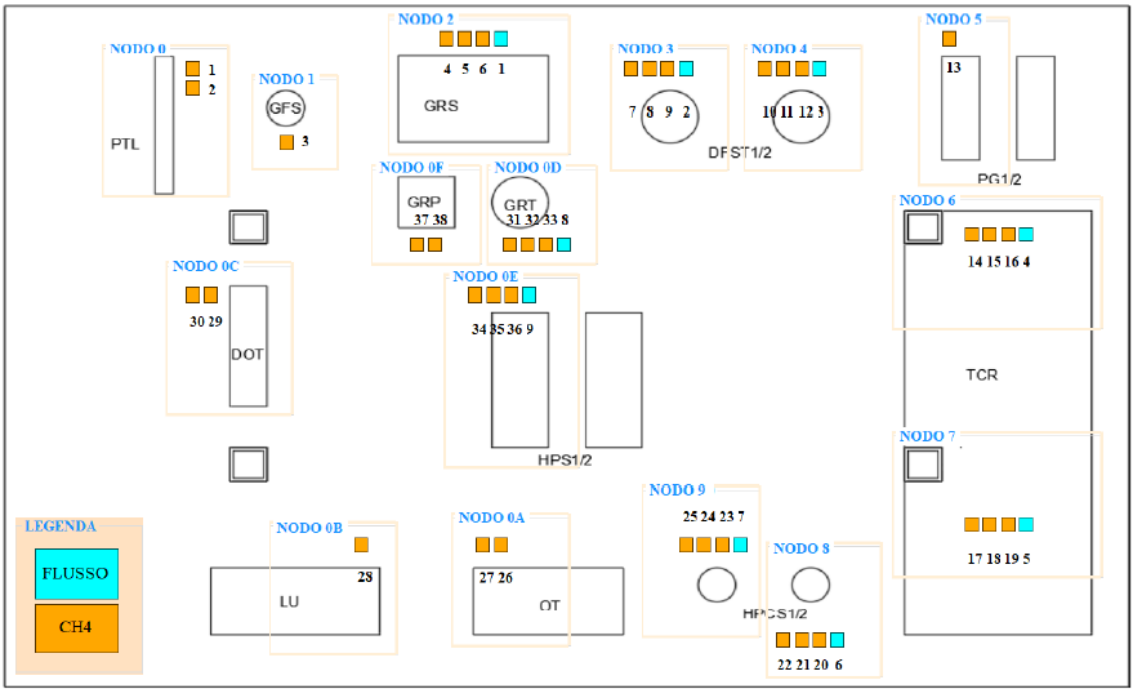

Figura 13 -Layout del piano sensorizzato contenente uno schema degli ostacoli e dei sensori [32]

In Figura 13 viene mostrata la configurazione del piano sensorizzato in cui sono elencati e numerati tutti i sensori presenti, distinti fra sensori di velocità in azzurro e di concentrazione in arancio. I sensori sono posizionati all'interno dell'ostacolo in modo che la parte sensibile al flusso di gas si trovi sulla sua superficie, mentre la struttura meccanica ed elettronica sia interna e non investita direttamente dal gas, da un lato per motivi di sicurezza, dall'altro per non modificarne la geometria disturbando la modellazione creata.

I sensori di concentrazione, forniti dall'azienda Microla s.r.l., sono in grado di leggere bassissime concentrazioni di gas in miscela con aria: requisito fondamentale considerando che il gas metano in uscita dall'ugello si trova già a concentrazione pari al 50% del LEL, ovvero 2,2% in volume, e che i sensori più lontani dal punto di rilascio, opportunamente tarati, devono fornire risultati attendibili e con tempi di risposta di 5-10 secondi.

I sensori di velocità a bordo del Mock-up rilevano velocità fino a 30 m/s e servono a verificare il flusso generato in camera di prova, mentre ulteriori sensori di tipo diverso sono adibiti alla misura del campo di velocità all'interno della camera di prova e sono posizionati all'interno dell'ambiente della galleria.

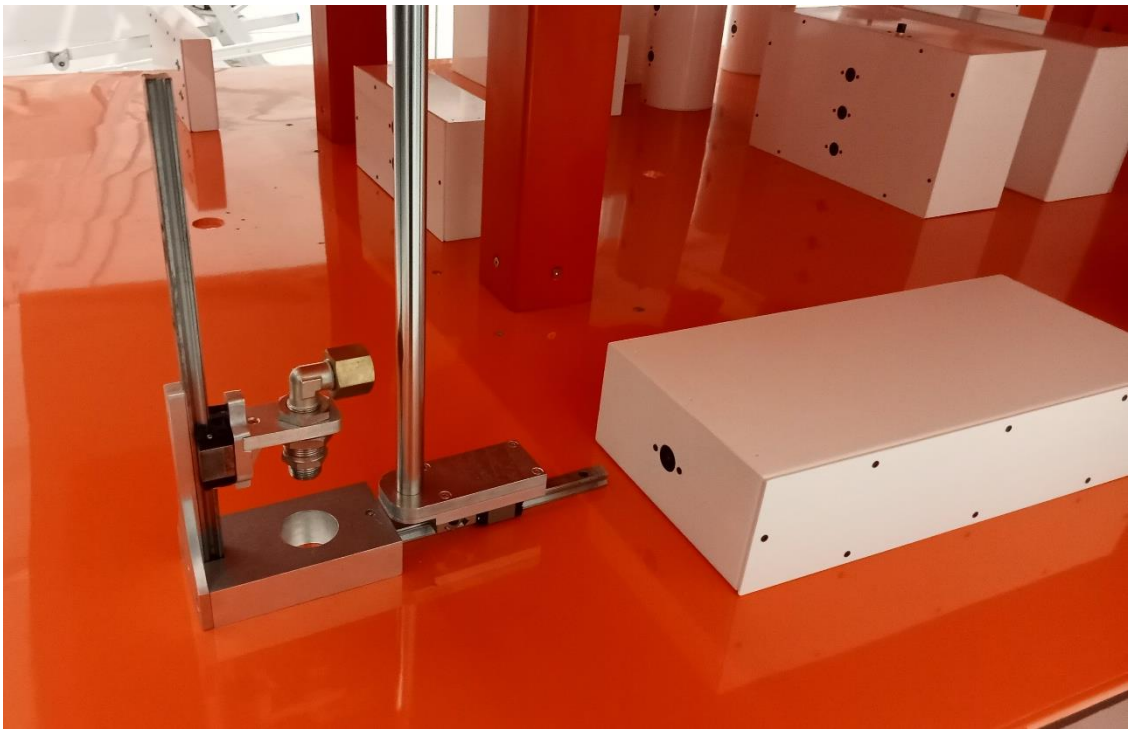

Figura 14 - Fotografia dell'ugello di rilascio e dell'ostacolo legato alla source box, a cui fanno seguito gli altri ostacoli sensorizzati

La Figura 14 mostra una fotografia dell'ugello di rilascio posizionato di fronte all'ostacolo della source box in una precisa configurazione. Come si vede dall'immagine il sistema è regolabile e permette di creare altre configurazioni a seconda della direzione relativa tra l'ugello e l'ostacolo. I componenti in bianco sono gli ostacoli sensorizzati, posizionati a seguito di un'analisi generale del posizionamento

dei principali componenti presenti sul piano corrispettivo delle piattaforme reali di interesse nello studio. I sensori e i componenti elettrici a cui sono connessi si trovano inseriti all'interno dei componenti in modo da non modificare la fluidodinamica del fenomeno.

3.3 Impianto di distribuzione del gas

Il sistema di distribuzione del gas che alimenta il rilascio dall'ugello è composto dai seguenti componenti:

- **Pacco bombole** comprensivo di 5 bombole contenenti una miscela al 2,2% di CH_4 in aria a una pressione di 150 bar e installato all'esterno del laboratorio in un'area dedicata con un'apertura di circa $1m^2$ di superficie verso l'ambiente esterno;
- **Linea di distribuzione principale del gas** che, dal locale bombole, attraversa la superficie esterne del laboratorio e arriva in camera di prova, con una lunghezza di circa 8 m; la sua funzione è quella di portare la miscela gassosa fino al muro perimetrale del laboratorio;
- **Tronchetto flessibile** costituito da un tubo flessibile di lunghezza circa 5 m che trasferisce la miscela gassosa fino all'ugello di rilascio, nel punto di interesse sul piano sensorizzato;
- **Ugello di rilascio** non calibrato di forma tronco-conica e di dimensioni pari a 1-3-5 mm.

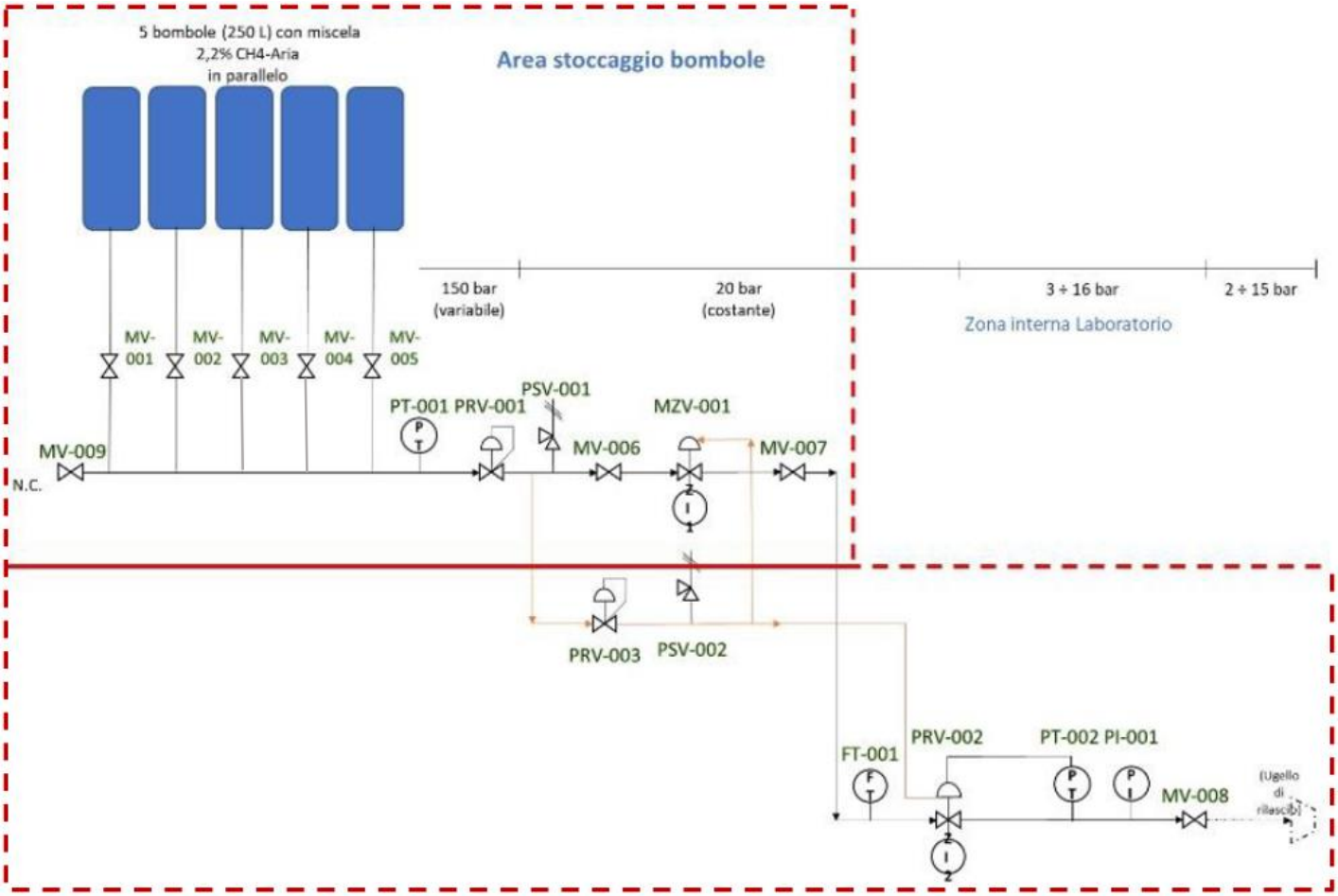

Figura 15 - Schema semplificato dell'impianto di distribuzione del gas [33]

Le 5 bombole, con la miscela aria-metano, sono collegate in parallelo e fanno capo ad un collettore; ognuna di esse possiede valvola manuale di intercettazione. Le bombole sono collettate su una linea a 150 barg lungo la quale sono presenti i componenti come mostrati in figura 14:

- Valvole di intercettazione manuale dalla sigla MV-00X e posizionate lungo tutta la linea;
- Due riduttori di pressione (PRV-001 e PRV-002): il primo compie un salto di pressione da 150 a 20 barg e lavora in autoregolazione mentre il secondo passa da 20 barg al range richiesto tra 3 e 16 barg ed è dotato di un controllore PID e gestito da remoto comandando la valvola dalla sala controllo del laboratorio SEASTAR;
- Un terzo riduttore di pressione (PRV-003) sulla linea dedicata al servizio delle valvole attuate pneumaticamente con riduzione di pressione a 5 barg.
- Due pressure safety valve (PSV-001 e PSV-002) settate a 27 barg e a 10 barg, rispettivamente sulla linea principale e sulla diramazione che serve per alimentare le valvole di aria compressa; entrambe sono collettate verso l'esterno tramite un canale diretto che dà su una griglia di collegamento.

- Una valvola di sicurezza On/Off attuata pneumaticamente (MZV-001) di tipo *Fail to Close* sul tratto di linea di media pressione, all'interno dell'area di stoccaggio bombole; questa ha l'obiettivo di intercettare la linea di distribuzione in caso di malfunzionamento del sistema; il segnale di allarme che comanda la chiusura della valvola MZV-001 è dato dalla centralina che gestisce i sensori di concentrazione CH_4 ambientali installati in camera di prova;
- Una valvola manuale con sfiato in atmosfera (MV-009) sulla linea in alta pressione;
- Due Pressure Transmitter (PT-001 e PT-002), che indicano i livelli della pressione sui tratti di alta e bassa pressione;
- Un Flow Transmitter (FT-001) sul tratto di media pressione all'interno della camera di prova;
- Un Pressure Indicator (PI-001) nel tratto di bassa pressione prima della partenza del tratto di tubo flessibile verso il Mock-up.
- Due indicatori di fine corsa (ZI-001 e ZI-002) posizionati rispettivamente sulla valvola MZV-001 (valvola ON/OFF attuata pneumaticamente) e sul riduttore di pressione di secondo stadio PRV-002. Entrambi gli indicatori sono equipaggiati di sensori di prossimità elettromeccanici che consentono la rilevazione dello stato corrente (apertura/chiusura) delle relative valvole.

Le linee tratteggiate in rosso rappresentano la divisione dei tratti di linea: la parte in alto è quella che si trova nel locale di stoccaggio delle bombole, mentre il tratto restante e i suoi componenti si trovano in camera di prova all'interno del laboratorio.

È infine importante sottolineare che per l'attuazione delle valvole pneumatiche non è predisposta una linea di aria compressa dedicata, ma è presente una linea di spillamento di gas dal tratto a media pressione 20 barg e ridotto a 5 barg tramite riduttore di pressione PRV-003. Lo stacco a bassa pressione è a servizio delle valvole a 3 vie necessarie alla movimentazione delle valvole MZV-001 e PRV-002.

3.4 Modalità operative e aspetti di manutenzione

3.4.1 Modalità operative

L'esperimento consiste nella predisposizione del laboratorio secondo la configurazione richiesta: il Mock-up deve essere posizionato all'interno della camera secondo le misure di progetto e direzionato in modo da avere uno specifico angolo di direzione del vento, secondo la geometria CFD oggetto della validazione. A seconda del diametro di rilascio da simulare, viene montato il rispettivo ugello legato al modello e scalato in diametro di un fattore 1:10. Attraverso il regolatore PID viene regolata la pressione di rilascio del modello, scalata di un opportuno fattore [33] : pressioni di interesse per gli esperimenti svolti sono 30-40-50 bar, a cui corrispondono pressioni scalate di 6,4 – 8,5 – 10,6 bar per il modello, ottenibili all'interno di un range che, come già citato, permette livelli di pressione tra i 3 e i 16 bar.

Viene quindi messa in funzione la batteria di ventilatori della galleria per ricreare un campo di moto uniforme, affinché il flusso d'aria così generato investa pienamente il Mock-Up. Per il caso reale preso in esame, un livello tipico di velocità del vento all'altezza di riferimento è di 6 m/s; uno studio basato sulla teoria dello scaling ha permesso di scalare opportunamente la velocità del modello sperimentale a 2,77 m/s. [34]

Prima della fase sperimentale deve essere eseguito un ricambio d'aria all'interno del laboratorio attivando i ventilatori. Questa fase, detta di lavaggio, è una procedura operativa necessaria in caso di cambio del set-up, al fine di garantire l'assenza di residui di gas derivante dalle prove precedenti, ed è regolata dalla procedura operativa e gestita tramite interfaccia GUI con l'inserimento preliminare del tempo di lavaggio e della velocità dei ventilatori.

L'avvio della prova sperimentale effettiva, che richiede il software dedicato accessibile dalla sala controllo, coincide con l'inizio del rilascio di gas, che durerà per il tempo scelto dall'operatore in funzione dell'esperimento. Viene quindi effettuato l'accesso alla procedura della prova sperimentale tramite interfaccia utente GUI (Gestione delle procedure operative) dove vengono esplicitati tutti i parametri caratteristici della prova: diametro ugello, distanza, forma e dimensione del primo ostacolo, velocità del vento in camera di prova, pressione di rilascio, tipo di gas. La procedura operativa prevede una verifica visiva dell'apertura delle saracinesche per il passaggio del vento in entrata e uscita e la conferma di tale avvenuta apertura da parte del software, a cui segue l'avvio dei ventilatori e il loro monitoraggio (a livello di singolo ventilatore) e l'avvio della sensoristica. L'avvio del rilascio di gas tramite valvole MV, presenti sulle bombole, coincide con l'inizio della prova sperimentale. Questa avviene mediante interfaccia GUI e viene verificata fisicamente dagli operatori.

I dati acquisiti e monitorati vengono poi raccolti, analizzati e confrontati con quelli ottenuti dalle simulazioni CFD che si intende validare; la prova termina al raggiungimento della durata di rilascio impostata alla definizione del setup di prova, oppure con lo stop manuale dell'operatore tramite GUI.

Sulla linea di distribuzione del gas quello che avviene, dopo l'apertura delle valvole MV delle bombole, è un rilascio di gas in pressione a 150 barg che raggiunge il collettore; da lì prosegue al primo riduttore di pressione PRV-001, dove viene ridotto alla pressione di 20 barg, per poi continuare lungo la linea verso lo stacco che convoglia una parte del fluido verso il riduttore di pressione PRV-003, dove il fluido passa a 5 barg. La PSV-001 sulla linea principale e la PSV-002, sulla diramazione a servizio delle valvole pneumatiche, sono progettate per intervenire in caso di sovrapressione e sono entrambe collettate verso l'apertura che da sull'ambiente esterno. Lo scopo dell'aria compressa è quello di azionare le valvole dei componenti MZV-001 e PRV-002: il primo è attivato dalla sala di controllo quando i sensori ambientali rilevano concentrazioni di gas in ambiente elevate e permette di interrompere il rilascio di gas; il secondo è gestito da PID e attua una regolazione sulla pressione di rilascio nel tratto finale della rete. Il componente MZV-001 è inoltre intercettabile tramite due valvole manuali il cui corretto posizionamento deve essere verificato prima dell'inizio dell'esperimento (MV-006 e MV-007). Giunto in camera di prova lungo la rete, il gas passa attraverso il secondo riduttore di pressione (PRV-002), attraversa un'ultima valvola on-off (MV-008), normalmente aperta, che viene utilizzata in fase di start-up del laboratorio per verificare il corretto funzionamento degli strumenti di controllo di pressione presenti sulla linea di distribuzione gas.

Per la gestione del rischio connesso all'utilizzo della rete è previsto l'intervento di un sistema di protezione composto da 2 Gas Detectors (sensori ambientali che intervengono in caso di superamento di una percentuale di soglia di gas definita in fase di taratura), un Logic Solver PLC e un sistema di intervento composto dal sistema di isolamento dell'impianto di distribuzione di gas (che ne prevede l'interruzione della fornitura tramite intervento della valvola MZV-001) e dal sistema d'aspirazione d'emergenza, che interviene solo in questo caso. [35] Per maggiori dettagli legati al funzionamento del sistema di sicurezza si rimanda al Capitolo 3.5.

3.4.2 Manutenzione

Fanno parte di questa procedura tutti i check specifici per la verifica del corretto funzionamento attraverso dei test funzionali dei componenti principali del laboratorio SEASTAR; in caso di malfunzionamento il piano prevede operazioni di manutenzione straordinaria. Il ripristino del corretto funzionamento dei componenti critici è necessario per poter procedere con la fase di prova sperimentale.

Costituisce quindi un requisito fondamentale per il corretto funzionamento delle prove un piano di manutenzione per tutti i componenti coinvolti, ideato in fase di progetto dalla società RAMS&E e descritto nel documento di riferimento [33] e suddiviso in 4 macro-blocchi:

- **Distribuzione Gas** di cui fanno parte tutti i componenti a servizio della linea che conduce il gas in pressione dalle bombole all'ugello sul piano sensorizzato;
- **Centralina Gas** che comprende la centralina gas e le due sonde di concentrazione;
- **Inverter** che comprende tutti i convertitori di frequenza a servizio dei ventilatori della galleria del vento e dell'estrattore aria a soffitto;
- **Galleria del Vento** che raggruppa le giranti e i motori di ogni ventilatore della galleria e la girante e il motore dell'estrattore aria a soffitto.

L'accesso alla procedura di manutenzione avviene tramite interfaccia GUI e dipende dal componente: se è critico per lo svolgimento della prova (ventilatori, e sistema di distribuzione e rilascio gas), vi è l'obbligo di effettuare la manutenzione obbligatoria; se non è critico si ha la possibilità di scegliere se effettuare la manutenzione "test" o procedere con le prove sperimentali.

Ciascun elemento, per ogni macro-gruppo, presenta poi una procedura di manutenzione dedicata, con cadenza che varia in base allo stato di usura e al rischio ad esso associato, secondo una tabella di scadenze a livello mensile, predisposto affinché l'operatore possa mensilmente individuare quali componenti necessitano di controllo e verifica e attuando la procedura operativa annessa.

3.5 Analisi di sicurezza

La progettazione del laboratorio nella sua configurazione attuale è stata oggetto di analisi di sicurezza. Tale analisi ha come scopo principale quello di valutare i rischi legati alle deviazioni di processo e quelli per i lavoratori che operano nel laboratorio, anche al fine di aggiornare il DVR (documento di valutazione dei rischi) secondo le prescrizioni di legge del D.lgs.81/08.

All'Articolo 2 di tale documento si definisce il rischio come "probabilità di raggiungimento del livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego o di esposizione ad un determinato fattore o agente oppure alla loro combinazione". [36]

Il rischio R può infatti essere considerato come prodotto di due fattori:

$$R = P * D$$

- P è la probabilità, che dipende dalla durata e dalla frequenza dell'esposizione;
- D è la gravità del danno prodotto al verificarsi dell'evento.

L'approccio ad un'analisi di questo tipo può essere di tipo: qualitativo, mediante l'utilizzo di una scala di valori categorici precedentemente stabilita: (es. piccolo, medio, grande); quantitativo, medianti l'utilizzo di valori numerici puntuali, con la caratteristica di essere più oneroso; oppure ancora di tipo semi-quantitativo, dove un'iniziale classificazione categorica viene convertita in valori numerici. Per il laboratorio SEASTAR WT l'analisi eseguita in fase di progetto è di tipo qualitativo.

Le tecniche di questo tipo utilizzate sono due:

- analisi HAZOP relativa alle deviazioni di processo;
- analisi HAZID per l'identificazione dei pericoli per i lavoratori sul luogo di lavoro, con particolare attenzione ad eventi esterni influenzanti le deviazioni di processo.

Lo studio HAZOP, definito dallo standard IEC 61882:2016 [37] , è una nota tecnica che prevede l'analisi del sistema nella sua interezza, per determinare cause e conseguenze legate a possibili scenari incidentali, analizzare le misure di prevenzione e protezione presenti, proporre azioni correttive e migliorative mediante commenti e raccomandazioni e individuare gli scenari a maggior rischio per ulteriori approfondimenti.

Lo studio HAZID è, invece, lo strumento utilizzato per l'identificazione dei pericoli non strettamente legati al processo, e ha avuto lo scopo di identificare i pericoli per i lavoratori.

3.5.1 Analisi HAZOP e SIF associata

Il documento atto a riassumere i risultati propone, come rischi per l'analisi HAZOP, i rilasci di gas in pressione sulla rete, con particolare attenzione a quelli legati al primo tratto di alta pressione (150 barg) [38]

Al fine di migliorare le condizioni di sicurezza dell'impianto è stato ideato un sistema di sicurezza automatico in grado di ridurre i rischi derivati da questi scenari incidentali: per farlo si è svolto uno studio di allocazione e verifica SIL (Safety Integral Level) in conformità con lo standard IEC EN 61508 [39] , che consiste essenzialmente nella determinazione di un valore di sicurezza da ritenersi tollerabile, a seguito del quale si progettano nuove protezioni attive che svolgono funzioni di sicurezza (SIF, Safety Integrated Funcion) in grado di ricondurre il rischio all'interno di tale soglia di tollerabilità, dopo opportuna verifica.

La funzione di sicurezza individuata è così strutturata:

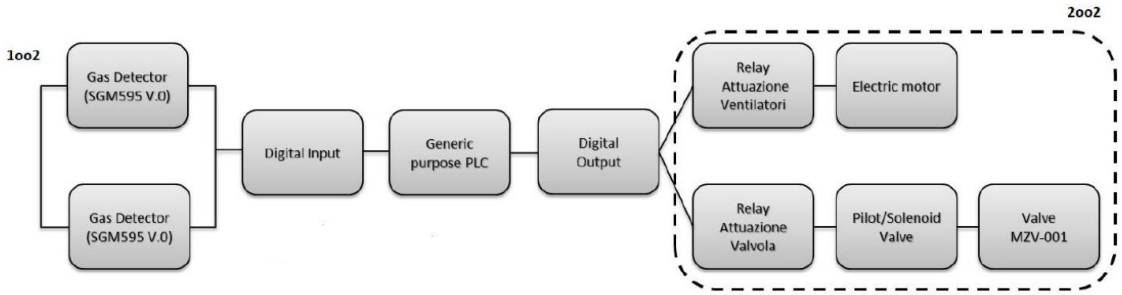

Figura 16 - Loop di sicurezza strumentato [38]

Due gas detector in configurazione 1oo2, dove è sufficiente che uno dei due sistemi rilevi il gas per attivare il sistema di protezione; una centralina PLC di controllo e attivazione; un sistema di chiusura della valvola MZ-001, per bloccare il rilascio di gas, unito ad un sistema di estrazione d'aria in camera di prova.

Al verificarsi di una delle cause di intervento del loop di protezione vi può essere la formazione di una miscela esplosiva di metano-aria nella parte alta della camera di prova; al raggiungimento del valore di concentrazione di metano del 40% del suo LFL, i sensori di gas rilevano il superamento del valore soglia inviando un segnale digitale al PLC; quest'ultimo elabora l'informazione e attiva il sistema di intervento, che chiude la valvola MZV-001 di isolamento del sistema di distribuzione di gas e aziona il motore elettrico del sistema d'aspirazione d'emergenza secondo una logica 2oo2 (entrambi i due sottosistemi devono intervenire con successo in caso di chiamata); il sistema di protezione prevede, in aggiunta, un allarme acustico/visivo, che al raggiungimento del valore del 10% dell'LFL di concentrazione del metano nella parte alta della camera di prova avvisa l'operatore del pericolo.

A seguito di tale studio è stata valutata una modifica progettuale che coinvolge la struttura della SIF [40] Il sistema di estrazione dell'aria, precedentemente pensato per intervenire secondo la logica 2oo2 presentata, è stato predisposto per lavorare in funzionamento continuo all'interno della camera di prova per tutta la durata dell'esperimento, contemporaneamente alla batteria di ventilatori che genera il flusso in galleria. Le ragioni sono essenzialmente due:

- la prima è legata ad un rafforzamento della logica di sicurezza derivante dalla nuova configurazione, che passando ad una logica per il sottosistema di attuazione di tipo 1oo1, mostrata in figura 17, riduce di fatto il rischio di fallimento.

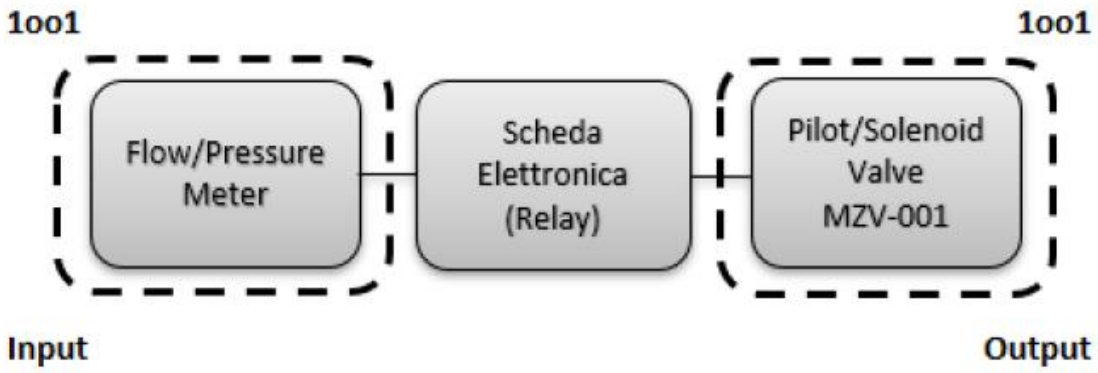

Figura 17 - SIF a seguito della modifica progettuale [40]

- la seconda riguarda la possibilità di installare un sistema di estrazione, non predisposto a lavorare con miscele potenzialmente esplosive (non ATEX); un funzionamento continuo del sistema, infatti, permette una fondamentale riduzione del rischio che si estragga metano a concentrazione elevata e pericolosa: rischio non eludibile nel caso precedente.

Il sistema di estrazione così installato risulta idoneo ad effettuare i ricambi d'aria richiesti a garantire la pulizia della camera di prova, escludendo completamente la possibilità di accumulo di miscela nella parte alta del laboratorio. La portata elaborabile dall'estrattore è di circa 20000 m^3/h, modulata però fino ad un massimo di 7000 m^3/h per evitare un'interferenza fluidodinamica con la corrente d'aria generata dalla batteria di ventilatori delle prove sperimentali.

3.5.2 Analisi HAZID e raccomandazioni

Allo stesso modo sono stati individuati i rischi più rilevanti secondo l'analisi HAZID [38] per gli operatori, nonché previste raccomandazioni per il miglioramento delle operazioni, al fine di ridurre il rischio.

4 Progetto di modifica: aspetti tecnici

Inquadrato il contesto di riferimento e descritta la galleria nella configurazione attuale, si entra nel vivo del lavoro analizzando gli aspetti da considerare per l'adeguamento. In questo Capitolo vengono analizzati gli aspetti tecnico operativi della modifica, attraverso lo studio dei componenti, per valutarne la compatibilità con la nuova miscela e la loro possibile sostituzione, nonché le precauzioni da adottare per l'adeguamento in termini di tarature strumentali.

A seguito di un'analisi preliminare del problema, sono stati proposti due diversi scenari di possibile interesse relativi alle miscele di stoccaggio in bombolaio e utilizzo in camera di prova:

1. Una miscela povera contenente il 2% in volume di idrogeno in aria, corrispondente al 50% del LEL, ovvero il limite inferiore di infiammabilità del gas in aria, in caso di innesco. Questo scenario si è presentato in prima analisi come il più cautelativo in termini di sicurezza e compatibilità con i sistemi installati attualmente in galleria, ma con la criticità di bassissime quantità di idrogeno disperse in camera di prova con probabile difficoltà della sensoristica installata di risultare idonea alla sua rilevazione.

2. Una miscela via via più ricca di idrogeno, potenzialmente fino ad arrivare ad idrogeno puro, da valutare attentamente in termini di componentistica, sistemi di sicurezza installati e rischio esplosione. L'analisi svolta ha avuto lo scopo di stabilire, in funzione dei parametri fisici considerati per l'esperimento, quali modifiche sarebbero da apportare e quali soglie limite di concentrazione in aria andrebbero prese in considerazione. Si tratta dello scenario più delicato ma anche di quello di maggiore interesse per possibili applicazioni future.

L'adeguamento della galleria all'utilizzo di miscele di idrogeno comporta una verifica della capacità degli strumenti installati, sia a livello della rete di distribuzione del gas che della sensoristica, di rilevarne la concentrazione del nuovo gas anche per basse quantità rilasciate. Il primo scenario proposto, oggetto di interesse per l'adeguamento, è legato alla valutazione delle conseguenze che una miscela ad una percentuale di idrogeno in aria, pari alla metà del sul LEL (H_2 al 2%), avrebbe sulla lettura dei sensori: non solo quelli installati sulla piattaforma, ma anche i sensori ambientali presenti nella galleria e legati alla sicurezza della stessa, in caso di percentuali troppo elevate del gas in aria, con conseguente rischio di esplosione.

In secondo luogo è stato fondamentale analizzare singolarmente i vari componenti presenti sulla rete di distribuzione, al fine di valutare in che modo il passare da metano a idrogeno in aria ne avrebbe impattato la compatibilità.

Infine sono state studiate e valutate le conseguenze legate alla possibilità di aumentare le percentuali di idrogeno all'interno della miscela, sia a livello di compatibilità che di sicurezza.

4.1 Verifica legata alla sensoristica installata

4.1.1 Sensori "Microla" su piano sensorizzato

Il primo passo all'interno dell'analisi tecnica è quello di verificare la compatibilità dei sensori di concentrazione di gas infiammabile installati sul piano sensorizzato. Utilizzati in asset attuale per rilevare il metano, essi sono in grado anche di rilevare la presenza di idrogeno, se tarati opportunamente. La difficoltà sta nel fatto che le concentrazioni presenti sono molto basse, in quanto la miscela di rilascio stessa è molto dispersa in aria (2,2% vol). La necessità di rilevare basse concentrazioni ha reso la scelta dei sensori e la loro taratura, in fase di progetto iniziale, molto accurata e specifica per gli esperimenti: tutti i sensori installati, infatti, dovevano poter leggere anche le quantità minime di metano.

Al passaggio da metano ad idrogeno il problema permane, ma il rilascio cambia la sua forma spaziale in termini di concentrazioni massiche: questo richiede che si faccia una verifica preliminare per capire se, in funzione di rilasci con distribuzione spaziale differente, i sensori più "svantaggiati" sulla piattaforma possano essere (dopo la taratura) ancora idonei alla lettura.

Si è quindi pensato di realizzare una simulazione CFD per il caso più sfavorevole di rilascio di idrogeno, ovvero quello che prevede la miscela di minor concentrazione ipotizzata, al 2% in volume in aria. Per il caso in esame si sono valutate pressioni di 6.4-8.5-10.6 bar già utilizzate per le simulazioni di metano, e si è visto come l'idrogeno si distribuirebbe nel caso simulato. Ovviamente tra la simulazione svolta e l'esperimento vero e proprio c'è una differenza da intendersi come errore, ma al fine di valutare la taratura dei sensori possiamo ritenerlo accettabile e basare le nostre assunzioni sui dati così raccolti.

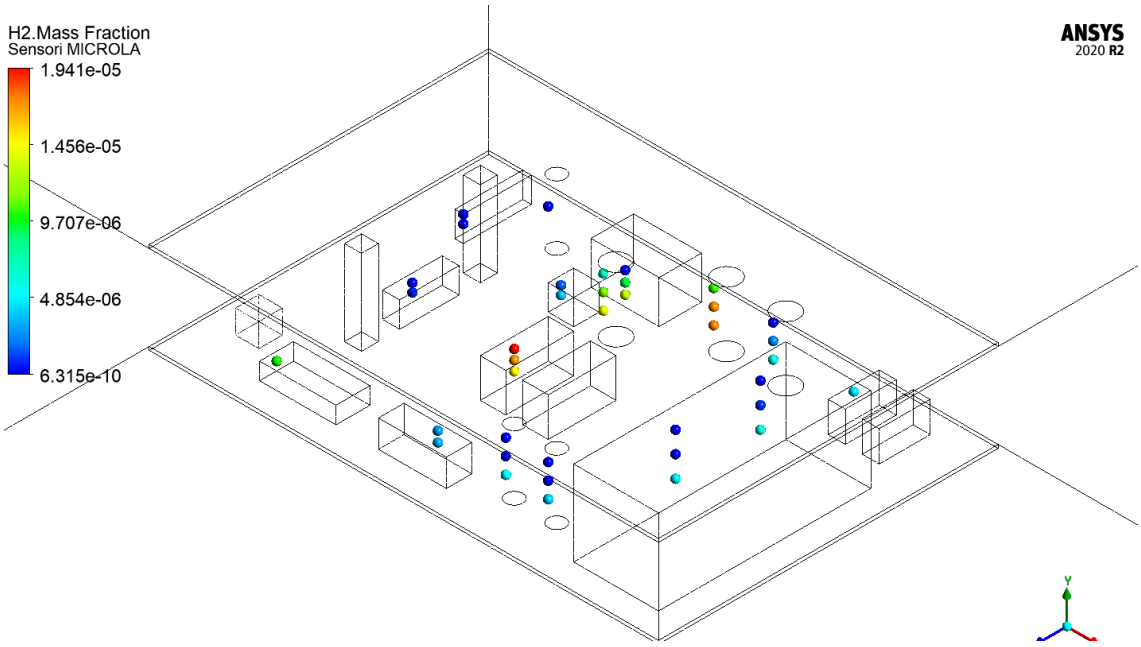

Figura 18 - Posizionamento dei sensori e concentrazioni per il rilascio di idrogeno al 2% a 6.4 bar

In Figura 18 troviamo riportati i risultati della simulazione con rilascio a 6.4 bar e diametro dell'ugello a 3mm. I punti colorati rappresentano la posizione dei sensori sul piano e la scala cromatica ne rappresenta la concentrazione. Tali dati puntuali sono stati raccolti per tutte e tre le simulazioni e inviati alla ditta Microla, responsabile dell'installazione e gestione di tali componenti strumentali, per verificarne l'idoneità.

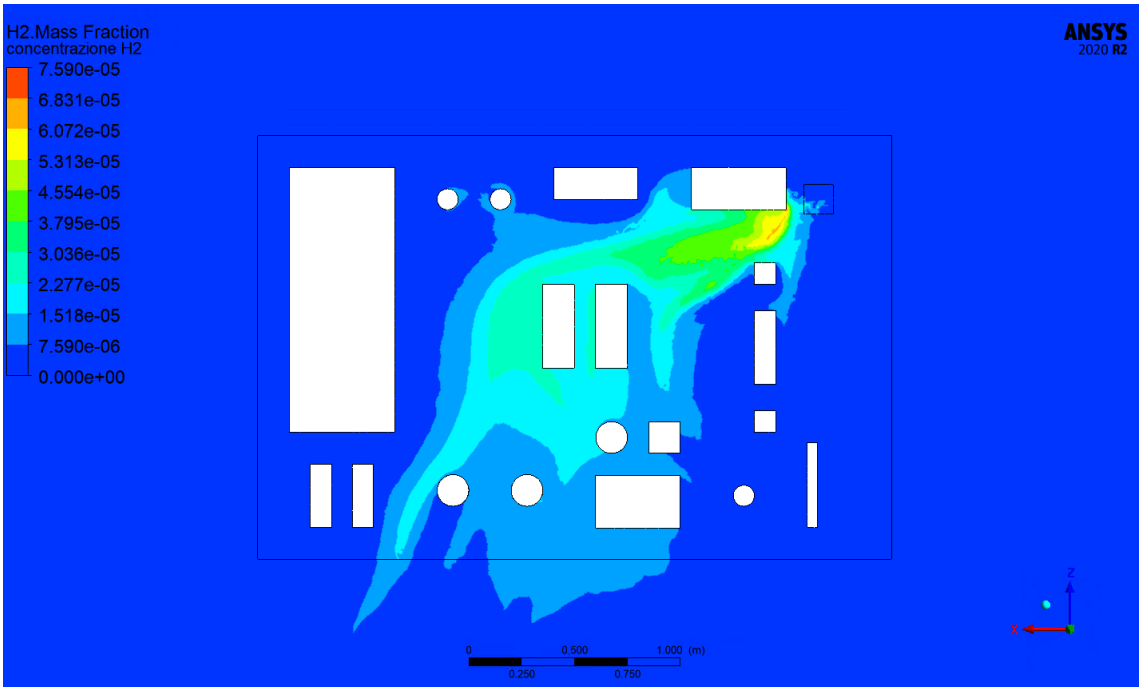

Figura 19 - Distribuzione spaziale su un piano rialzato di 10 cm dalla base del piano sensorizzato per rilasci di idrogeno al 2% in aria a 6.4 bar

In Figura 19 si è scelto di rappresentare il medesimo rilascio in termini di concentrazione massica all'interno del piano sensorizzato, per semplicità per il caso di

6.4 bar. I risultati prodotti hanno dimostrato una forte similarità tra i rilasci di metano al 2,2% in aria e di idrogeno al 2% in aria in termini di distribuzione spaziale. Tale similarità permette di confermare la bontà dei sensori installati per l'adeguamento a fronte di una loro ri-taratura, come confermato dal confronto con la ditta Microla.

4.1.2 Sensori Beniat per il rilevamento di miscele di gas potenzialmente infiammabili in camera di prova

Come analizzato nel Capitolo 3, all'interno della camera di prova sono presenti due sensori di rilevazione di gas con funzione di sicurezza (SG-1; SG-2) per attivare il blocco della rete in caso di formazione di miscele potenzialmente infiammabili nella parte alta del laboratorio. Essi sono settati sul rilevamento di gas metano, ma possono essere utilizzati anche per rilevare idrogeno e GPL, se opportunamente tarati.

Sonda convenzionale rilevamento gas	**SG-1 SG-2**	**Sonda a tecnologia catalitica per il rilevamento di gas infiammabili**	**Mod. SGM595**	**BEINAT**	

Tabella 3 - Dati relativi ai sensori di concentrazione di gas infiammabile installati

Figura 20 - Posizionamento sensori in camera di prova

La Tabella 3 e la Figura 20 riportano, rispettivamente, i dati principali relativi ai due sensori e il loro posizionamento all''interno della camera di prova della galleria.

4.2 Verifica di compatibilità della rete del gas

Altro aspetto fondamentale per l'analisi tecnica ha riguardato la linea del gas: ci si è interrogati inizialmente sull'idoneità della componentistica installata a fronte della modifica del tipo di gas utilizzato. Quello che si è fatto, è stato valutare le schede tecniche di tutti i componenti della linea, per trovare eventuali anomalie o non conformità in caso di passaggio da miscela aria-metano verso aria-idrogeno a diverse concentrazioni.

I dati relativi ai componenti sono stati ripresi e analizzati con maggiore dettaglio:

Figura 21 - Area stoccaggio bombole - rete del gas

In Figura 21 viene mostrato il primo tratto di rete, relativo all'area stoccaggio bombole, articolata come descritto nel Capitolo 3. Da un'analisi delle schede tecniche, i materiali della linea e dei sui componenti risultano compatibili con l'utilizzo di idrogeno, anche a concentrazione elevata. Diventa quindi importante svolgere una distinzione fra i due scenari presentati di idrogeno al 2% in aria e concentrazioni maggiori: salendo di concentrazione si presentano 2 problematiche principali: i componenti elettrici ed elettronici, come le elettrovalvole dei componenti MZV-001 e PRV-002, necessitano un adeguamento ATEX per la classe idrogeno, in funzione della zona di pericolo valutata nel locale; inoltre è necessario separare fisicamente il tratto di linea a servizio dell'aria compressa.

Figura 22 - Dettaglio rete: valvola manuale di decompressone, trasduttore e indicatore di pressione

In Figura 22 viene mostrata la valvola di sfogo del gas sul tratto di alta pressione, collegata ad un trasduttore di pressione e all'indicatore PT-001 della marca WIKA. I componenti risultano compatibili con idrogeno a basse concentrazioni, ma nel caso in cui si debba usare idrogeno più concentrato diventa necessario adeguare lo strumento e collettare la valvola verso l'esterno per prevenire la formazione di una nube di gas infiammabile nel locale.

Figura 23 - Dettaglio rete: riduttore di pressione del ramo relativo all'aria compressa

La Figura 23 mostra la diramazione che dalla rete principale passa attraverso il riduttore di pressone PRV-003 e da lì, attraverso il tubo flessibile azzurro, raggiunge le valvole pneumatiche. Tale riduttore di pressione, modello SP1125, è progettato per lavorare con gas inerti come l'aria, ma non come metano o idrogeno: concentrazioni superiori al 50% del LEL, infatti, ne richiederebbero la sostituzione. Discorso analogo è da farsi per il tratto di tubo flessibile in azzurro.

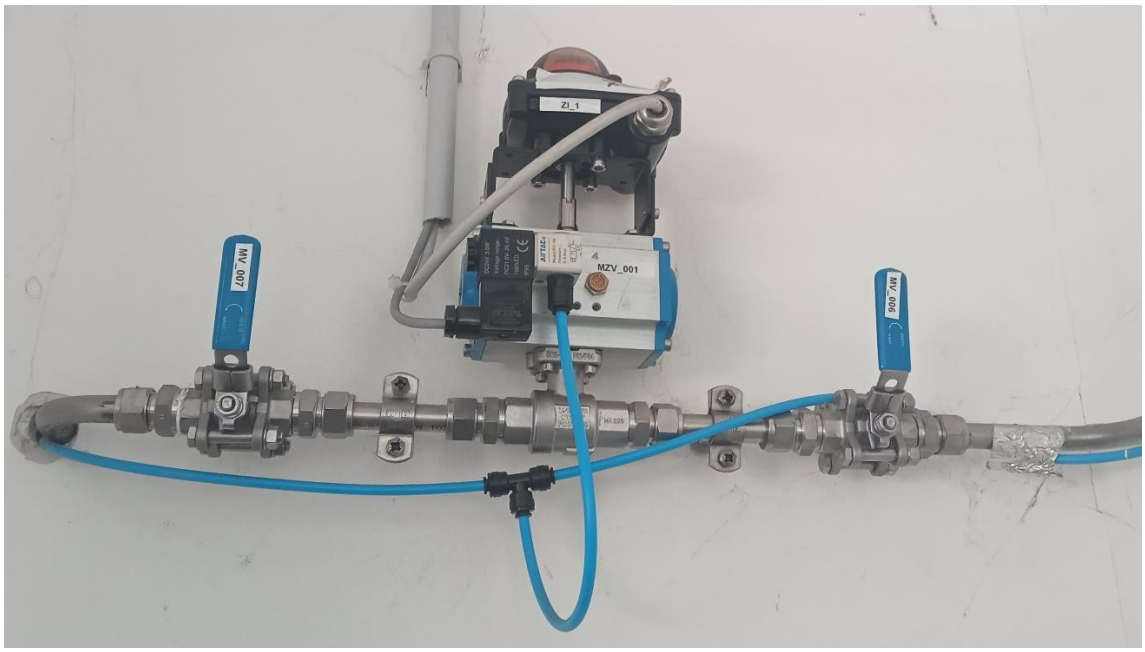

Figura 24 - Dettaglio rete: sistema di isolamento della rete gas mediante attuatore pneumatico, attivato dalla SIF

La Figura 24 mostra il sistema di sicurezza della SIF descritto nel Capitolo 3 paragrafo 5. Le valvole di intercettazione manuale MV-006 e MV-007 sono delle valvole a sfera in acciaio inossidabile modello S-60 e risultano, a livello di materiale, compatibili con l'idrogeno così come con il metano. Ancora una volta i componenti aventi parti elettriche quali l'elettrovalvola modello Serie 3V1 montata su MZV-001 e l'indicatore di fine corsa ZI-001 modello BE45 devono essere adeguati in funzione della percentuale di idrogeno in miscela.

Figura 25 - Dettaglio rete: collettamento verso l'esterno delle PSV

Si vede infine in Figura 25 come le due PSV montate rispettivamente sulla linea principale e sul tratto a servizio dell'aria compressa sono entrambe collettate verso l'esterno.

Al termine di una verifica iniziale sui componenti si è provveduto a contattare la ditta Tecno-delta, responsabile delle installazioni, per verificare direttamente con loro tali condizioni. Da tali valutazioni sono emersi alcuni aspetti importanti ai fini dell'adeguamento:

a. La miscela, inizialmente utilizzata a basso contenuto di metano (2,2% in volume in aria), ne permette lo sfruttamento diretto per l'azionamento delle valvole pneumatiche installate e analizzate nel capitolo seguente; in questo modo i componenti legati alla diramazione della linea ad utilizzo di aria compressa sono stati progettati per lavorare ad aria, e non sono formalmente idonei al passaggio di idrogeno. Dal confronto con la ditta Tecno-delta sembra che per basse percentuali di idrogeno in aria, cosi come di metano in aria, si possano mantenere i componenti già utilizzati in quanto idonei, mentre per percentuali via via crescenti di idrogeno si debba pensare ad una parte di linea adibita al passaggio di aria compressa, separatamente alla linea principale di passaggio della miscela.

b. A livello di materiale, la componentistica installata (limitatamente alla parte di linea non ad uso aria compressa), è idonea al passaggio di idrogeno, anche puro, con l'accortezza di settare il misuratore di flusso con i giusti dati di portata, pressione e concentrazione relativa dei gas presenti in miscela, per una corretta interpretazione del dato.

c. Nessuno dei componenti è targato ATEX per il caso dell'idrogeno, per cui è necessario, in caso di percentuali superiori al LEL in miscela o di idrogeno puro, eseguire una valutazione di tipo ATEX per capire se negli ambienti interessati (bombolaio e camera di prova) è possibile la formazione di miscele esplosive in caso di rilascio accidentale o controllato.

A seguito di tali considerazioni e a valle di un confronto con il gruppo di ricerca si è pensato di svolgere una valutazione ATEX per i due ambienti di interesse, seguendo la normativa di riferimento. Tale valutazione è l'oggetto principale del Capitolo 5.

5 Analisi degli aspetti normativi e di sicurezza

Oltre agli aspetti pratici di rilevazione del gas si sono dovuti prendere in considerazione gli aspetti di sicurezza nelle sue varie sfaccettature. La prima domanda che ci si è posti è a quali rischi l'utilizzo di idrogeno esporrebbe il laboratorio e le persone coinvolte; dall'altra parte un aspetto fondamentale da affiancare al problema è stata la valutazione di adeguamento della rete del gas e dei suoi componenti a livello di compatibilità sia per la sicurezza sia per i materiali coinvolti.

5.1 Verifica della normativa antincendio

Il primo problema considerato è stato quello di verificare se la normativa antincendio ponesse dei vincoli preliminari per il locale di stoccaggio dell'idrogeno. È stata quindi presa in considerazione il seguente documento: "*Testo coordinato del DPR 1 agosto 2011 n. 151 e del DM 07/08/2012*". [41]

Secondo tale regolamento il locale di stoccaggio delle bombole presente in laboratorio non rientra tra le attività soggette alle visite e ai controlli di prevenzione incendi in quanto il volume di gas stoccato nelle bombole è complessivamente inferiore a $0.75m^3$, superiore alle quantità presenti in stoccaggio. Le bombole infatti sono 5, ciascuna di capacità di $0.05m^3$ per un totale di $0.\ 25m^3$.

A questo punto, il passaggio successivo è quello di eseguire uno studio ATEX per valutare il rischio esplosione e le conseguenti contromisure in termini di apparecchiature da installare.

5.2 Studio ATEX

Il seguente studio definisce la Classificazione dei Luoghi con pericolo di Esplosione (o Aree Pericolose) per gli ambienti interessati dalla presenza di idrogeno, allo scopo di stabilire la possibile presenza, la tipologia e l'estensione delle aree con pericolo di esplosione nelle quali devono essere adottati provvedimenti di natura tecnica e/o organizzativa per rendere trascurabili i rischi derivanti dalla presenza di atmosfere esplosive e/o potenzialmente tali. La normativa e legislazione di riferimento per lo studio è la seguente:

- *CEI EN IEC 60079-10-1 (2021-09) - Atmosfere esplosive;* [42]
- *Guida CEI 31-35 (2012-02) Atmosfere esplosive - Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87),* utilizzata solo come riferimento tecnico per quanto non espressamente indicato nella norma CEI EN 60079-10-1, in quanto abrogata il 14-10-2018. [43]

5.2.1 Metodologia di classificazione delle aree

La classificazione delle aree rappresenta un metodo di identificazione di pericolo esplosione. L'impianto viene suddiviso inizialmente in ZONE, nelle quali la probabilità di trovare un'atmosfera pericolosa può essere alta, media, o bassa, oppure così bassa da essere considerata non pericolosa, con la definizione di "NE".

La metodologia di classificazione, in accordo alla norma CEI EN IEC 60079-10-1 [42] consiste nella analisi delle condizioni ambientali e di ventilazione dell'impianto in oggetto, nell'identificazione delle sostanze infiammabili e di tutte le possibili sorgenti di emissione di tali sostanze.

In base alle sostanze che possono essere rilasciate in atmosfera, si stima la probabilità di rilascio definendo i gradi di emissione, che possono essere continuo, primo o secondo.

Vengono definite il tipo di zona e la sua estensione tenendo conto di tutte le sorgenti di emissione, mediante l'applicazione dei metodi di calcolo suggeriti e, tenendo conto del grado e della disponibilità della ventilazione, che permette di fatto la diluizione nell'ambiente della sostanza pericolosa. Le equazioni e la metodologia usata sono riportate in dettaglio nella CEI EN IEC 60079-10-1. [42]

Allo scopo di classificare i luoghi con pericolo di esplosione, vengono analizzate le caratteristiche delle aree nelle quali è prevedibile la presenza di sostanze gassose infiammabili, sia durante il normale funzionamento dell'impianto che in caso di

funzionamento anormale (es. perdita da una guarnizione di una valvola o apertura accidentale di una PSV).

PORTATE DI EMISSIONE

Per il calcolo della portata di emissione sono state adottate le formule previste dall'Annex B della Norma CEI EN IEC 60079-10-1, paragrafo B.7.2 [42] con riferimento a rilasci di gas in condizioni critiche (rilascio sonico) in quanto in tutti i casi presi in esame il livello di pressione del gas è tale da superare il rapporto tra pressione ambiente e rapporto critico.
La portata volumetrica caratteristica è calcolata secondo la seguente formulazione:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot LFL \cdot K} \quad [m^3/s]$$

Dove:

- W_g è la portata volumetrica espressa in kg/s della sostanza infiammabile presente nella miscela;
- ρ_g è la densità della sostanza infiammabile riferita alle condizioni ambiente;
- LFL è il limite inferiore di infiammabilità [$\%vol/\%vol$];
- K è un coefficiente di sicurezza applicato al LFL (compreso tra 0,5 e 1). Tale valore è stato assunto, nel presente documento pari a 0,75.

La caratteristica di emissione Q_c è stata utilizzata sia per valutare il grado di diluizione necessario per identificare il tipo di zona pericolosa, sia per definire la distanza pericolosa come indicato negli Annex C e D della Norma.

GRADO DI DILUIZIONE

Il grado di diluizione è una misura della capacità della ventilazione o delle condizioni atmosferiche di diluire un'emissione ad un livello sicuro. Sono riconosciuti i tre gradi di diluizione seguenti, secondo le definizioni riportate nei documenti già citati. [42] [43]

- *DILUIZIONE ALTA*: la concentrazione in prossimità della sorgente di emissione si riduce rapidamente e, dopo l'arresto dell'emissione, non si ha praticamente persistenza di atmosfera esplosiva;
- *DILUIZIONE MEDIA*: mentre l'emissione è in corso, la concentrazione è controllata determinando una zona i cui limiti sono stabili e, dopo l'arresto dell'emissione, l'atmosfera esplosiva per la presenza di gas non persiste in modo ingiustificato;

– *DILUIZIONE BASSA*: mentre l'emissione è in corso, la concentrazione è significativa, e/o dopo l'arresto dell'emissione, c'è una persistenza significativa dell'atmosfera infiammabile.

Per la stima del grado di diluizione si è fatto riferimento all'Annex C, Figura C.1 della Norma:

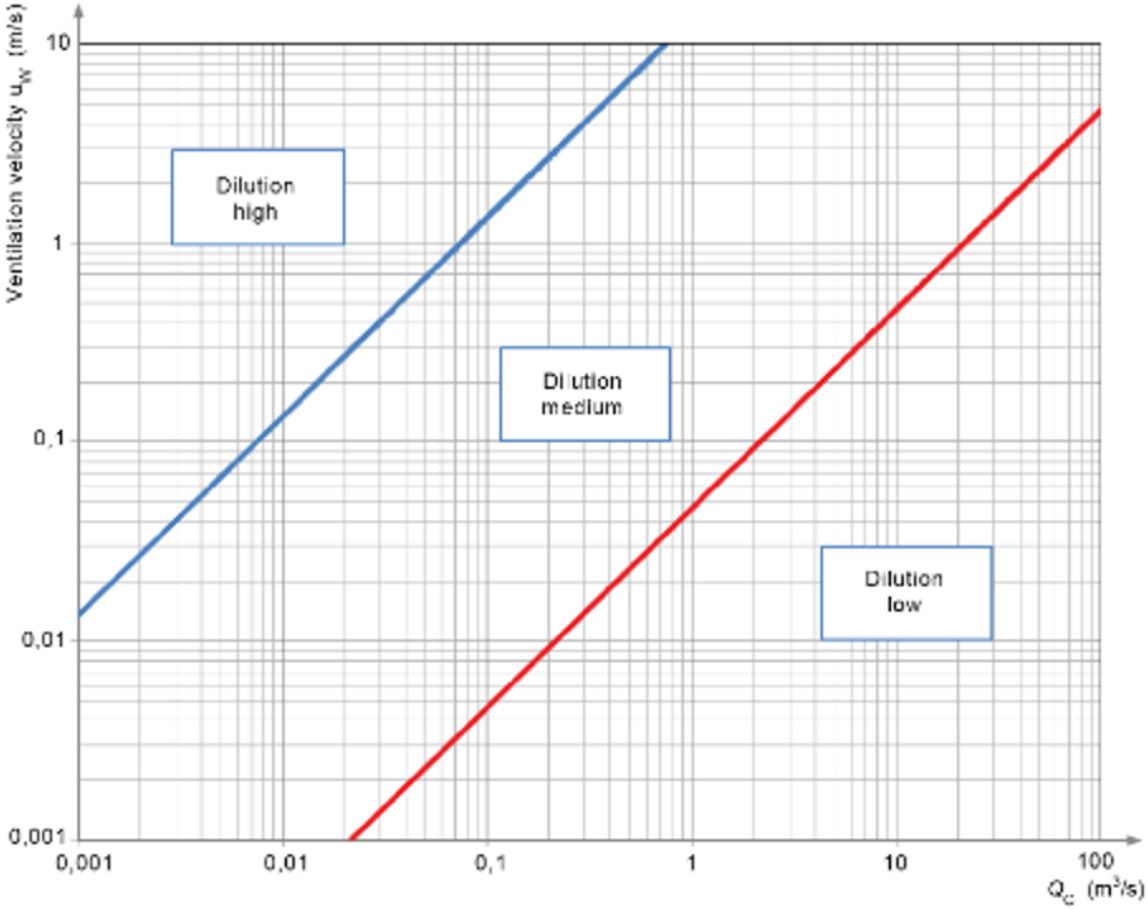

Figura 26 -Grado di diluizione [32]

Il grafico in Figura 26 riporta in ascissa la portata corretta calcolata al punto precedente dell'analisi e in ordinata la velocità del vento, indice della capacità dell'ambiente di diluire il rilascio.

DETERMINAZIONE DEL TIPO DI ZONA

Per ogni sorgente di emissione si determina il tipo di zona pericolosa 0, 1 o 2 in relazione al grado dell'emissione ed al grado e alla disponibilità della ventilazione o diluizione, come indicato nella Tabella D.1, Annex D della Norma.

Sono date le seguenti definizioni per la sua interpretazione direttamente dal documento: [42]

- *ZONA 0*: Luogo in cui un'atmosfera esplosiva per la presenza di gas è presente continuamente o per lunghi periodi o frequentemente.
- *ZONA 1*: Luogo in cui un'atmosfera esplosiva per la presenza di gas è probabile sia presente periodicamente o occasionalmente durante il funzionamento normale.
- *ZONA 2*: Luogo in cui un'atmosfera esplosiva per la presenza di gas non è probabile sia presente durante il funzionamento normale ma, se ciò avviene, è possibile esista solo per brevi periodi.

- *GRADO DI EMISSIONE*: Sono stabiliti tre gradi di emissione, qui di seguito elencati in ordine decrescente di frequenza e di probabilità di presenza di atmosfera esplosiva:
  - ✓ *CONTINUO*: emissione continua oppure che può avvenire frequentemente o per lunghi periodi;
  - ✓ *PRIMO*: emissione che può essere prevista avvenire periodicamente oppure occasionalmente durante il funzionamento normale;
  - ✓ *SECONDO*: emissione che non è prevista avvenire nel funzionamento normale e, se essa avviene, è possibile solo poco frequentemente e per brevi periodi.

  Una sorgente di emissione può dar luogo ad uno di questi tre gradi di emissione o ad una loro combinazione.

- *GRADO DI DILUIZIONE*: Si considerano i seguenti tre gradi di efficacia della ventilazione o diluizione.
  - ✓ ALTO: La concentrazione intorno alla sorgente di emissione si riduce velocemente e non c'è virtualmente alcuna persistenza dell'atmosfera esplosiva dopo l'arresto dell'emissione.
  - ✓ MEDIO: La concentrazione è controllata, determinando una zona limitata stabile, sebbene l'emissione sia in corso, e l'atmosfera esplosiva per la presenza di gas non persiste eccessivamente dopo l'arresto dell'emissione.
  - ✓ BASSO: C'è una concentrazione significativa mentre il rilascio è in corso e/o una significativa persistenza dell'atmosfera esplosiva dopo l'arresto dell'emissione.

- *DISPONIBILITA' DELLA VENTILAZIONE*: La disponibilità della ventilazione ha un'influenza sulla presenza o formazione di un'atmosfera

esplosiva per la presenza di gas. Pertanto, la disponibilità (come pure il grado) della ventilazione deve essere presa in considerazione quando si determina il tipo della zona. Si considerano i seguenti tre livelli di disponibilità della ventilazione:

- ✓ BUONA (B): la ventilazione è presente praticamente con continuità.
- ✓ ADEGUATA (A): quando la ventilazione è considerata presente durante il funzionamento normale. Sono ammesse delle interruzioni purché siano poco frequenti e per brevi periodi.
- ✓ SCARSA (S): quando la ventilazione non risponde ai requisiti di adeguata o buona, tuttavia non sono previste interruzioni per lunghi periodi.

Grado di Emissione	Grado di Diluizione						
	ALTO			MEDIO			BASSO
	Disponibilità di Ventilazione						
	B	A	S	B	A	S	B, A, S
CONTINUO	Non Pericoloso (Zona 0 NE) (a)	Zona 2 (Zona 0 NE) (a)	Zona 1 (Zona 0 NE) (a)	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
PRIMO	Non Pericoloso (Zona 1 NE) (a)	Zona 2 (Zona 1 NE) (a)	Zona 2 (Zona 1 NE) (a)	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 o Zona 0 (b)
SECONDO	Non Pericoloso (Zona 2 NE) (a)	Non Pericoloso (Zona 2 NE) (a)	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 e Zona 0 (b)

Tabella 3 – Zone per grado di emissione ed efficacia della ventilazione (ricavata dai dati della norma [42])

(a) Zona 0 NE, 1 NE o 2 NE indicano una zona teorica dove, in condizioni normali, l'estensione è trascurabile.

(b) Zona 0 se la ventilazione è così debole e l'emissione è tale che un'atmosfera esplosiva esiste praticamente in continuazione (cioè si è vicini ad una situazione di assenza di ventilazione).

DEFINIZIONE DI ESTENSIONE DELLE ZONE PERICOLOSE

L'estensione di una zona di pericolo per la presenza di gas infiammabili nell'atmosfera è la distanza, in ogni direzione, dalla sorgente di emissione verso il punto dove la miscela è stata diluita dall'aria, fino ad arrivare ad un valore trascurabile, al di sotto del limite inferiore di infiammabilità, che moltiplica un coefficiente di sicurezza K (tra 0.5 e 1). L'estensione di tali zone dipende dalle caratteristiche chimiche e fisiche delle sostanze infiammabili, oltre che dalle caratteristiche della sorgente di emissione, dalle modalità di emissione e dalla ventilazione o diluizione. Applicando le formule come da norma con riferimento alla Figura D.1 di seguito riportata, sono state definite le dimensioni della zona precedentemente classificata:

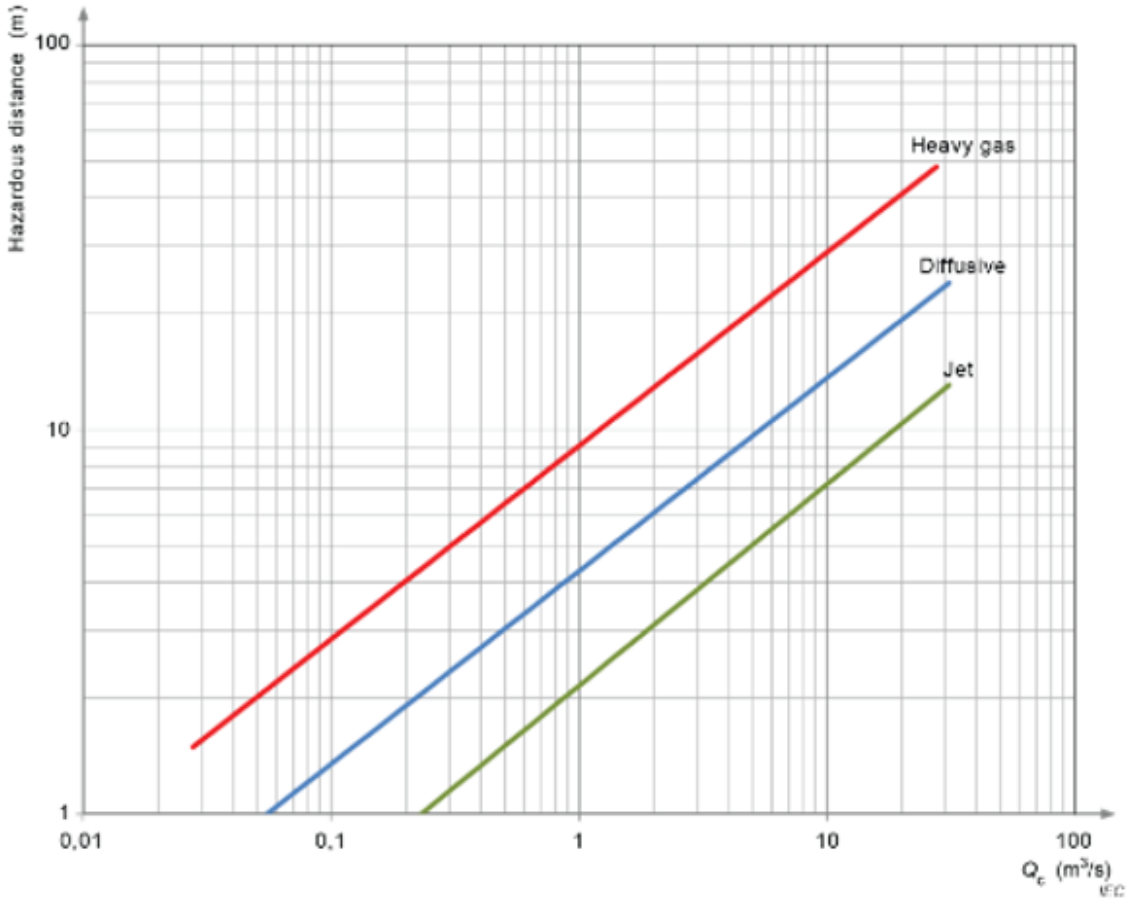

Figura 27 - Estensione della zona pericolosa [43]

Nel grafico in Figura 27 è presente in ascissa la portata corretta Q_c precedentemente calcolata e in ordinata la distanza di riferimento. In questo caso il processo di utilizzo del grafico è diverso, poiché data la portata corretta e conosciuto il tipo di emissione, e di conseguenza la retta di interesse, si trova il valore della distanza. Le tre rette rappresentate sono descritte come:

- JET: emissione non ostacolata sottoforma di getto ad alta velocità;

- DIFFUSIVE: emissione dispersiva sottoforma di getto a bassa velocità, oppure sottoforma di getto che perde la sua quantità di moto a causa della geometria dell'emissione, oppure a causa dell'impatto con superfici poste nelle vicinanze;
- HEAVY GAS: gas o vapori pesanti che si diffondono lungo superfici orizzontali.

Nell'analisi in oggetto le emissioni sono state tutte considerate di tipo "getto": infatti l'idrogeno è un gas molto leggero e per tutti i componenti analizzati la pressione interna rende la pressione di efflusso critica e la sua velocità sonica.

5.2.2 Ambienti analizzati e sostanze infiammabili

La classificazione dei luoghi di pericolo esplosione è da valutarsi anche in base alle condizioni ambiente, con particolare attenzione alle caratteristiche della ventilazione.

La linea dei gas infiammabili interessa due ambienti chiusi, quali area stoccaggio bombole e camera di prova, descritti approfonditamente nel Capitolo 3; le condizioni di ventilazione dei due locali sono diverse e da considerarsi separatamente.

SOSTANZA INFIAMMABILE

Devono quindi essere esaminate tutte le sostanze presenti nell'impianto che possano essere fonte di potenziale pericolo esplosione. Nel caso in esame l'unica sostanza con queste caratteristiche presente è l'idrogeno.

Si riportano a seguire le caratteristiche chimiche e fisiche della sostanza.

Sostanza	Stato	Temperatura Infiammabilità °C	LEL Volume %	Temperatura Ebollizione °C	Densità Relativa gas/aria	Temperatura di auto accensione °C	Gruppo gas e Classe di Temperatura
Idrogeno H_2	Gas	< 0	4,0	-252,7	0,07	500	IICT1

Tabella 4 -Caratteristiche chimico-fisiche idrogeno [42]

La Tabella 4 è stata costruita secondo le indicazioni della Norma CEI EN IEC 60079-10-1 (2021-09) Annex A, Tabella A.1. [42] I valori indicati sono stati ricavati dalla Guida CEI 31-35. [43]

AREA STOCCAGGIO BOMBOLE

Tale ambiente è un piccolo deposito di dimensioni approssimative [1m x 3m x 2.5m(h)], confinante con l'ambiente esterno e collegato ad esso tramite una finestra di superficie di circa $1m^2$.

Figura 28 - Area stoccaggio bombole – Finestra di collegamento ambiente esterno

Per la valutazione del tipo di zona di questo locale è necessario fare alcune considerazioni:

- È prevista un'ampia apertura con schermatura fissa di protezione dalle intemperie e che dà direttamente sull'ambiente esterno.
- Il locale e la sua apertura sono al piano terra.
- Non è presente un sistema di estrazione dell'aria e la ventilazione è naturale.
- Non è presente un sistema di controllo della temperatura, per cui non possiamo valutare la portata d'aria scambiata attraverso la finestra come dipendente da un gradiente termico imposto.

In tali condizioni la Guida CEI fornisce come valore indicativo di velocità del vento u_w=0.1 / 0.05 m/s appena misurabili, per cui considereremo nei calcoli il valore peggiorativo di 0.05.

La norma suggerisce inoltre, in caso di locale chiuso di ridotte dimensioni con numerose sorgenti di rilascio potenziali, di valutare l'estensione della zona pericolosa più critica calcolata come estensione del locale stesso.

CAMERA DI PROVA

Le dimensioni relative al locale sono riportate in figura seguente espresse in mm, in riferimento alla camera centrale ospitante il secondo tratto della rete di distribuzione del gas; le dimensioni effettive della camera sono state ricavate dalle planimetrie AutoCAD del locale Post Operam, e possono essere approssimate a:

$$L_{cp} \text{ x } B_{cp} \text{ x } H_{cp} = 16.6 \text{ x } 8.6 \text{ x } 8.6 = 1227.7 m^3 = V_{cp}$$

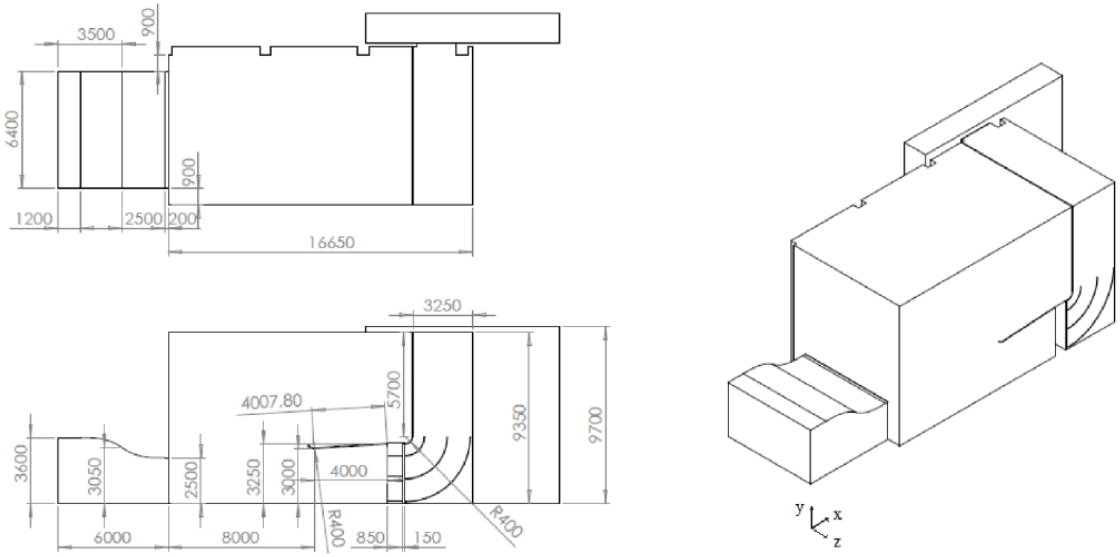

Figura 29 - Dimensioni camera di prova [30]

Per questo locale si prende in considerazione il caso in cui l'impianto sia in operazione e i ventilatori della galleria siano in attività, generando un flusso d'aria che nella zona in cui è situata la rete di distribuzione con relativa strumentazione è pari a 2.77 m/s, imposta dal sistema di ventilazione.

È inoltre presente un sistema di rilevazione di gas infiammabili collegato ad un sistema di estrazione dell'aria, nella parte superiore della camera, con portata di estrazione costante in caso di entrata in funzione e pari a 5000 m^3/h.

5.2.3 Sorgenti di emissione

Si elencano le tipologie di sorgenti di emissione individuate dall'analisi dei componenti sulla base delle ipotesi fatte riguardo al grado di emissione e al foro di rilascio, per ciascuna tipologia (Norma CEI EN 60079-10-1, Tabella B.1):

- Connessioni e accoppiamenti

Le connessioni e gli accoppiamenti sulle linee devono essere considerate delle sorgenti di emissione di secondo grado, in quanto un possibile rilascio sarebbe di natura incidentale. Per definire le dimensioni dell'area di rilascio si tiene conto di un eventuale guasto del dispositivo di tenuta (guarnizione), con un foro di emissione di 0.1 mm2. Fanno parte di questa categoria anche le connessioni per gli strumenti in linea (es. manometro).

- Tenuta valvole

Le tenute delle valvole si possono considerare sorgenti di emissione di secondo grado. Per le dimensioni del foro è stata considerata l'emissione con un foro di 0.25 mm2, sia per le valvole manuali (MV-00X) che per la valvola automatica di sicurezza MZV-001, che per le valvole di controllo della pressione (PRV).

- Valvole di sicurezza PSV

La valvola PSV-001 oggetto dell'analisi, in quanto direttamente interessata dal gas infiammabile, è collettata all'esterno, per cui non verrà considerata come possibile fonte di accumulo di gas in area stoccaggio bombole.

5.2.4 Disegni di classificazione

La norma CEI definisce inoltre le configurazioni di forma che possono presentarsi in caso di rilascio. Le distanze *r*, *r'* e *r''* sono riferite alle seguenti figure. La prima valida per tutti i componenti che rilasciano gas per guasto o usura (grado secondo); la seconda per l'ugello da cui si ha il rilascio controllato di gas in camera di prova. Nel secondo caso le tre dimensioni sono valutate, secondo le indicazioni della guida, considerando *r'* come pari a un decimo di *r*; mentre *r''* considera un angolo al vertice di 60°.

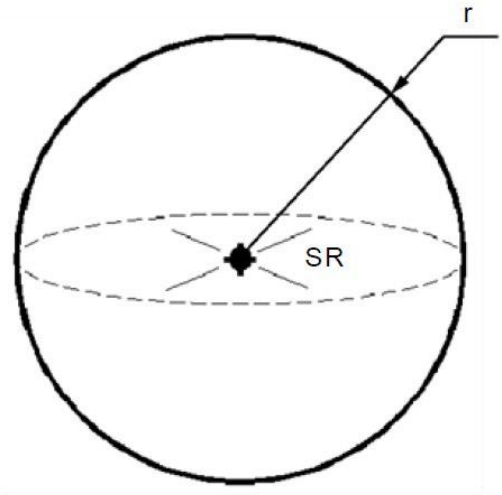

Figura 30 - Emissioni di Gas con direzione di emissione non nota [43]

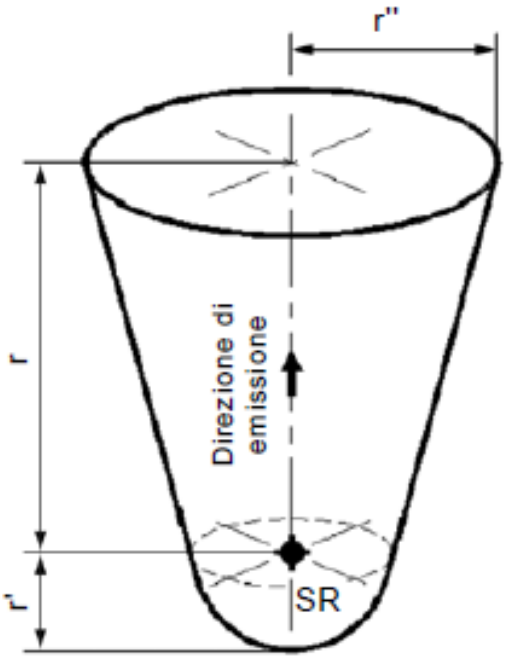

Figura 31 - Emissioni di Gas con direzione di emissione nota [42]

5.2.5 Analisi dei risultati ottenuti: Aree Pericolose

Nella Tabella 5 seguente sono elencate le sorgenti di emissione di gas e le estensioni delle relative zone pericolose che da esse hanno origine, suddivise per ciascun ambiente e raggruppate per tipologia.
Le estensioni delle zone pericolose, espresse in metri da ciascuna sorgente di emissione, sono state ricavate con i criteri e le formule riportate nella Norma CEI.

AREA STOCCAGGIO BOMBOLE	Valvole alta pressione	Connessioni manometro	Connessioni riduttore 1 livello di pressione	Valvole media pressione	Connessioni componenti media pressione
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	150	150	150	20	20
Grado di Emissione	Secondo	Secondo	Secondo	Secondo	Secondo
Tipo di ventilazione	Naturale	Naturale	Naturale	Naturale	Naturale
Disponibilità ventilazione	Scarsa	Scarsa	Scarsa	Scarsa	Scarsa
Velocità dell'aria [m/s]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Foro di rilascio [mm2]	0,25	0,1	0,1	0,25	0,1
Portata di rilascio [kg/s]	0,002311	0,000925	0,000925	0,000308	0,000123
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,9408	0,3763	0,3763	0,1254	0,0502
Diluizione	media	media	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto	getto
Forma	sfera	sfera	sfera	sfera	sfera
Estensione r [m]	2	1,2	1,2	1	1
Zona	ZONA 2	ZONA 2	ZONA 2	ZONA 2	ZONA 2

Tabella 5- Risultati analisi Area stoccaggio bombole

In questa prima area si vede come, indipendentemente dal componente analizzato, i risultati portano all'ottenimento della zona di pericolo 2, mentre per quanto riguarda l'estensione, come detto in precedenza, la Norma suggerisce il riconoscimento dell'estensione di tale zona all'interno del locale, in quanto lo spazio è ristretto e le sorgenti di rilascio sono diverse.

Considerazione fondamentale in questo senso va fatta per il caso delle valvole a pressione: in caso di perdita su una delle valvole di alta pressione, infatti, dove la portata caratteristica derivata è prossima al valore unitario, si deve tener conto che per velocità del vento inferiori a 0,05 m/s il grado di diluizione passa da medio a basso e, secondo la norma, la Zona da 2 diventa 0.

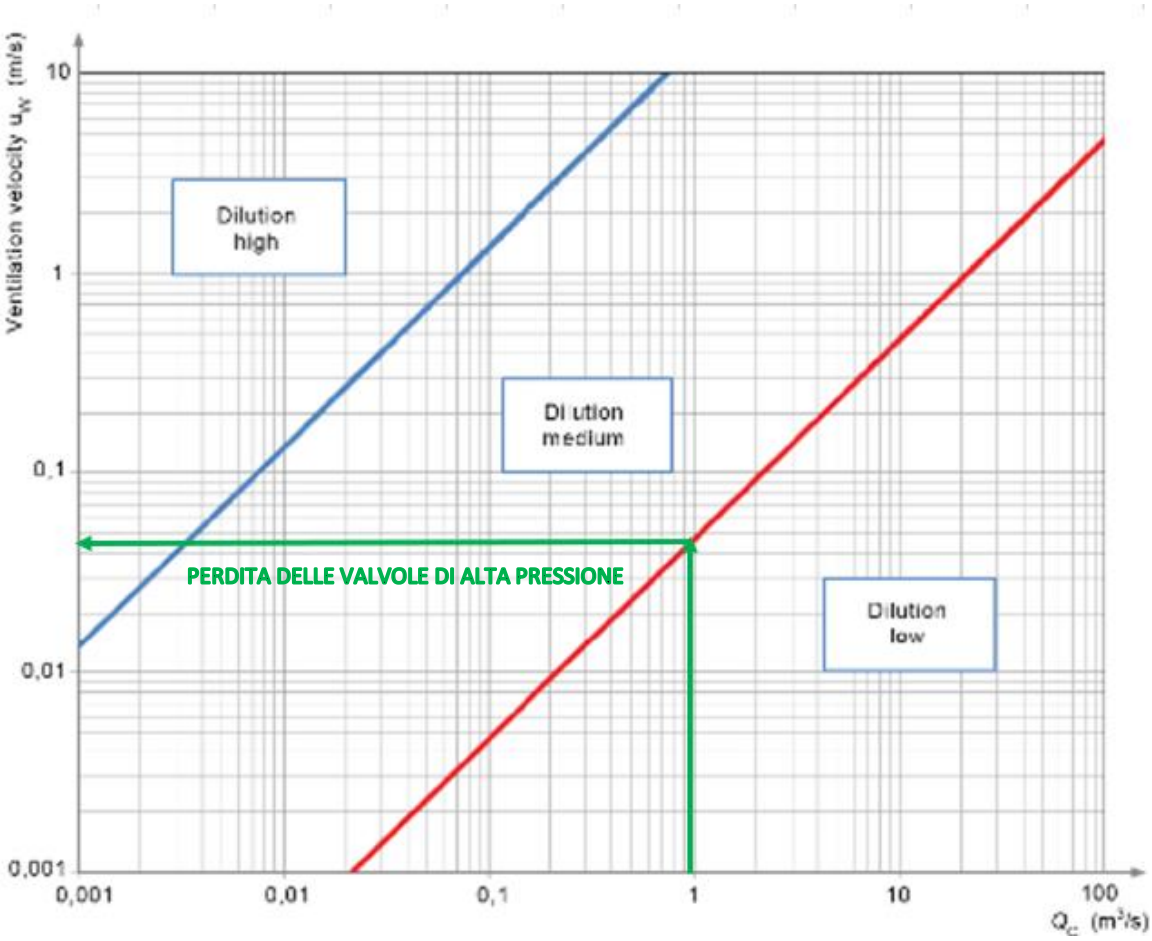

Figura 32 -Effetti della ventilazione in area stoccaggio bombole

Questo comporta la necessità di una gestione meccanica della ventilazione all'interno dell'aria, in modo tale che, in caso di perdita rilevata, sia possibile attuare un controllo della ventilazione tramite un sistema di estrazione dell'aria che garantisca di non scendere al di sotto della linea che separa la ventilazione media da quella bassa, e di conseguenza non elevi il livello di pericolo del locale.

Ovviamente, a fronte di tale controllo, non sarebbe possibile scendere sotto il livello di pericolo contraddistinto dalla Zona 2, per cui tutte le apparecchiature installate nel locale, come sarà descritto più avanti, dovranno essere di tipo ATEX con la sigla

corrispettiva. In camera di prova invece è trascurabile la possibilità che si presenti una perdita legata ad uno dei componenti della rete. Le condizioni analizzate in questo tratto sono quelle operative di lavoro, per cui se è presente gas nella rete vuol dire che stiamo effettivamente svolgendo l'esperimento e i ventilatori sono in funzione alla velocità imposta.

CAMERA DI PROVA	Connessioni media pressione	Riduttore 2 livello di pressione	Connessioni bassa pressione	Valvole bassa pressione	Ugello di rilascio controllato
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	20	20	16	16	16
Grado di emissione	Secondo	Secondo	Secondo	Secondo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77
Foro di rilascio [mm2]	0,1	0,25	0,1	0,25	19,63
Portata di rilascio [kg/s]	0,000123	0,000308	0,000099	0,000247	0,019363
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,0502	0,1254	0,0401	0,1003	7,8813
Diluizione	alta	alta	alta	alta	media
Tipo di rilascio	NE	NE	NE	NE	getto
Forma					cono
Estensione r [m]					6,5
Zona	Zona 2 NE	Zona 2 NE	Zona 2 NE	Zona 2 NE	ZONA 0

Tabella 6 - Risultati analisi Camera di Prova

Il rilascio controllato mediante l'ugello dà luogo ad un getto di gas con direzione imposta di forma conica che provoca la formazione di una zona 0 al centro della camera. Le condizioni analizzate in questo caso sono quelle peggiori possibili, ovvero quelle massime a cui la rete si può portare, ma gli esperimenti vengono fatti a pressioni

scalate fino a 10.6 bar e diametri dell'ugello rispettivamente di 5, 3 e 1 mm; questo porta ad una nuova serie di dati.

CAMERA DI PROVA	Ugello pressione di esercizio D5mm	Ugello pressione di esercizio D3mm	Ugello pressione di esercizio D1mm
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	10,6	10,6	10,6
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,77	2,77	2,77
Foro di rilascio [mm2]	19,63	7,07	0,79
Portata di rilascio [kg/s]	0,012825	0,004619	0,000516
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	5,22	1,88	0,21
Diluizione	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto
Forma	cono	cono	cono
Estensione r [m]	4,5	3	1
Zona	Zona 0	Zona 0	Zona 0

Tabella 7 - Risultati analisi diverse condizioni operative di rilascio

Anche in questo caso si vede come la situazione si modifichi solo per estensione della zona pericolosa 0, che non può essere estinta. Può rivelarsi interessante considerare il ruolo che la variazione della velocità del vento potrebbe avere nella definizione delle zone.

Risulta infatti possibile, all'interno del laboratorio SEASTAR WT, variare la velocità sino ad un massimo di 6 m/s, agendo sulla regolazione dei ventilatori. Utilizzando la velocità come variabile libera e considerando fissa la pressione dell'esperimento a pari a 10.6 bar, si vede come di fatto questa non comporti una modifica del tipo di diluizione e quindi del tipo di zona:

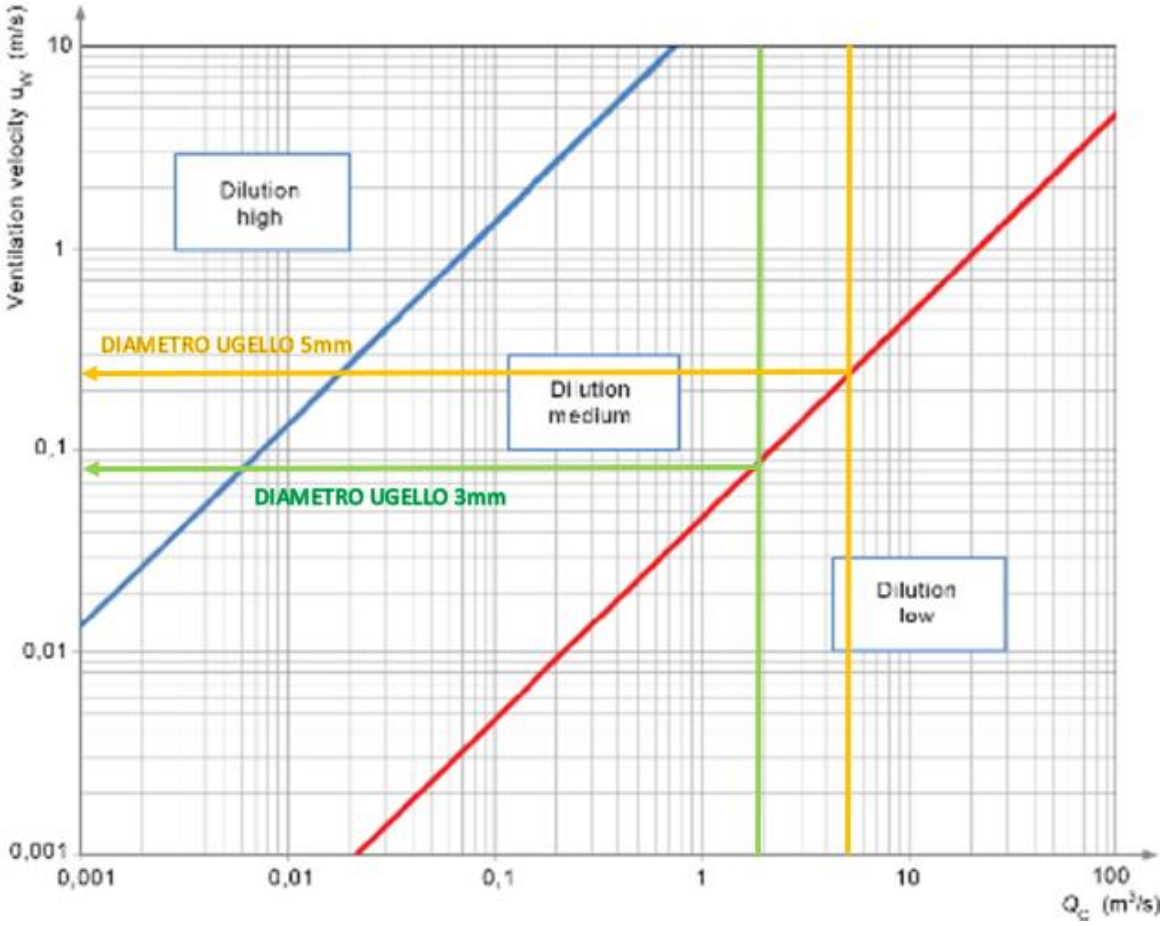

Figura 33 - livello di diluizione in funzione del diametro dell'ugello e della velocità del vento per ugelli di diametro 3 e 5mm

Possiamo vedere come, per diametri di 3 e 5 mm dell'ugello, il range di velocità del vento che va da 0.3 a 10 m/s comporti lo stesso grado di diluizione e di conseguenza lo stesso tipo di zona. Questo significa che un caso peggiorativo si avrebbe solo se si svolgesse l'esperimento settando la ventilazione a velocità inferiori.

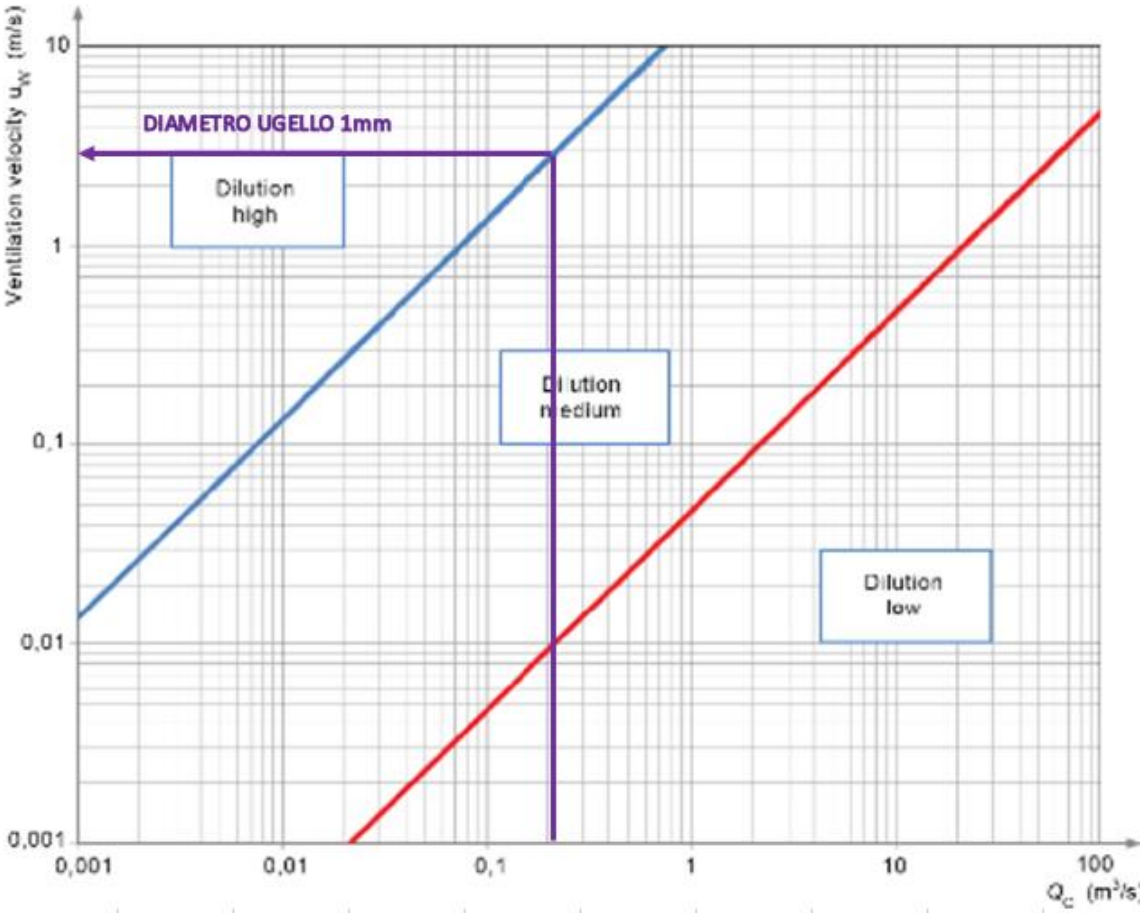

Figura 34 -- livello di diluizione in funzione del diametro dell'ugello e della velocità del vento per ugello di 1mm

Ragionando per il caso di diametro di 1 mm, invece, si vede come un livello migliore di diluizione sarebbe ottenibile per velocità superiori a 3 m/s, portando il livello della zona considerata da 0 a non pericoloso (Zona 0 NE), secondo la Tabella 3.

È utile infine considerare come variabile libera la concentrazione di idrogeno in galleria: per farlo dobbiamo tener conto del fatto che, all'interno della rete, la concentrazione di idrogeno nella miscela non dovrebbe trovarsi all'interno dei limiti di infiammabilità, che vanno dal 4 al 75% in volume, né è consigliata la fascia che va dal 75 al 100% in quanto, in caso di infiltrazioni d'aria e di innesco, si potrebbe dar luogo ad un'esplosione. Diventa quindi interessante valutare lo scenario in cui la miscela è al 50% del LEL, ovvero al 2% di idrogeno in aria. Riassumiamo quindi dati rilevanti per questo scenario:

CAMERA DI PROVA Miscela al 2% di idrogeno	**Ugello pressione massima D5mm**	**Ugello pressione di esercizio D5mm**	**Ugello pressione di esercizio D3mm**	**Ugello pressione di esercizio D1mm**
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	16	10,6	10,6	10,6
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,77	2,77	2,77	2,77
Foro di rilascio [mm2]	19,63	19,63	7,07	0,79
Portata di rilascio H_2 [kg/s]	0,000103	0,000068	0,000025	0,000003
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,00297	0,00197	0,00071	0,000079
Diluizione	alta	alta	alta	alta
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto
Forma	cono	cono	cono	cono
Estensione r [m]				
Zona	Zona 0 NE	Zona 0 NE	Zona 0 NE	Zona 0 NE

Tabella 8- Risultati rilasci miscela al 2% di Idrogeno

Anche in questo caso è possibile vedere come, anche con un livello di ventilazione basso confrontato con il range di velocità che siamo in grado di mantenere in camera di prova, il grado di diluizione rimanga alto e di conseguenza la zona risulti essere non pericolosa.

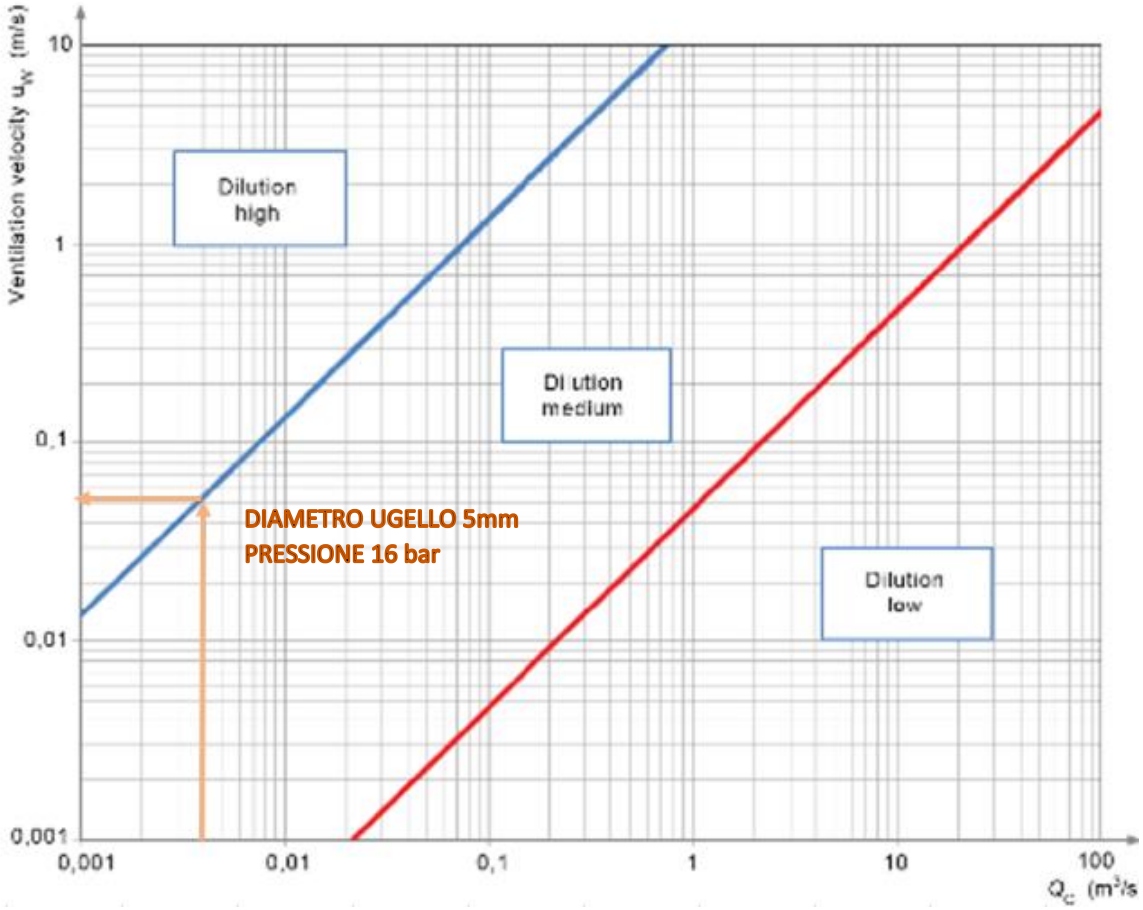

Figura 35 -effetti della ventilazione sulla miscela al 2%

Possiamo ancora valutare come la miscela al 2% di idrogeno modifichi la zona di pericolo in camera di prova considerando lo scenario peggiore, ovvero quello relativo ad una perdita sul lato alta pressione:

AREA STOCCAGGIO BOMBOLE2	Valvole alta pressione miscela al 2% H_2
Sostanza	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	150
Grado di Emissione	Secondo
Tipo di ventilazione	Naturale
Disponibilità ventilazione	Scarsa
Velocità dell'aria [m/s]	0,05
Foro di rilascio [mm2]	0,25
Portata di rilascio [kg/s]	0,000012
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,000355
Diluizione	alta
Tipo di rilascio	getto
Forma	sfera
Estensione r [m]	
Zona	ZONA 2 NE

Tabella 9 - Risultati miscela al 2% di idrogeno in bombolaio

In Tabella 9 si vede come la velocità dell'aria non influenza il livello di diluizione, purché sia minima.

5.2.6 Selezione delle apparecchiature

Le apparecchiature elettriche e non elettriche da installare nelle zone con pericolo di esplosione devono essere in accordo alla Direttiva 2014/34/UE [27] che richiede i seguenti adeguamenti per i prodotti marcati CE ATEX:

- Zona 0: Prodotti II 1G/D;
- Zona 1: Prodotti II 2G o superiori;
- Zona 2: Prodotti II 3G o superiori.

Il gruppo e la classe di temperatura delle apparecchiature da considerare devono essere almeno IIC (o IIB+H_2) T1, essendo le zone classificate per idrogeno.

5.2.7 Considerazioni finali

La classificazione delle zone pericolose per le aree considerate è stata svolta in conformità con lo standard internazionale CEI EN 60079-10-1 [42]

I risultati dell'analisi si basano su ipotesi cautelative e variabili soggette a modifiche impiantistiche, soprattutto per quanto riguarda l'area di stoccaggio bombole, dove è consigliabile, come detto nei capitoli precedenti, l'installazione di un estrattore d'aria che permetta l'espulsione sicura del gas accumulato in ambiente esterno.

Per il caso di rilascio controllato in galleria, per non avere zone pericolose, è necessario ridurre la concentrazione dell'idrogeno in miscela, portandoci ad avere una concentrazione del gas inferiore al LEL per evitare che, in caso di innesco, si abbia un'esplosione all'interno della rete del gas. In questa condizione infatti ricadiamo ampiamente fuori dalle zone di pericolo e non sono necessari particolari accorgimenti tecnici.

Va infine considerata la zona di pericolo e la sua estensione come indicativa del tipo di apparecchiatura elettrica da installare all'interno di essa, secondo le indicazioni riportate nel paragrafo 5.2.6.

6 Modifiche progettuali, costruttive e operative

Analizzando ora la possibilità di utilizzo di idrogeno puro in galleria, il capitolo analizza le modifiche necessarie a tale adeguamento.

Lo studio ATEX ha infatti permesso di capire quali aree del laboratorio sono soggette a cambiamenti necessari legati soltanto alla presenza di idrogeno, e quali invece sono le modifiche che dipendono dal tipo di rilascio controllato che siamo interessati ed effettuare, e quindi dall'esperimento.

Per quanto riguarda il locale di stoccaggio sono suggerite le seguenti modifiche in aggiunta al già citato adeguamento normativo dei componenti elettrici e non elettrici:

- Prevedere un sistema di estrazione meccanica dell'aria all'interno del locale stoccaggio bombole in modo tale da rimanere all'interno della Zona 2 di pericolo
- Considerare la possibilità per il tratto più critico di rete, ovvero quello di alta pressione (150 barg), di individuare misure di contenimento ad hoc: spostamento delle bombole fino al riduttore di primo stadio in un altro locale più adeguato, oppure la progettazione di un sistema di estrazione locale che, in caso di perdita, rimuova l'atmosfera che circonda il tratto.
- Separare fisicamente, come già detto, la linea di aria compressa a servizio delle valvole pneumatiche.

Per quanto riguarda la camera di prova le considerazioni da svolgersi dipendono anche dall'esperimento: se si analizzano i risultati dell'ATEX per il caso del rilascio controllato, si vede come il settaggio dei parametri fisici (come il diametro dell'ugello, la pressione e la velocità del vento) influenzino la zona di pericolo e la sua estensione, e di conseguenza il grado di sicurezza che la strumentazione necessita da normativa. Questo fa sì che, volendo porre dei vincoli a tali zone di pericolo, è possibile procedere a ritroso vincolando la "pericolosità" dei parametri dell'esperimento.

Contenendo infatti la pressione di rilascio e il diametro del foro, è possibile che le dimensioni del cono di rilascio non raggiungano dall'ugello alla batteria di ventilatori nel laboratorio, con la conseguenza di rendere ATEX solo la strumentazione del Mock-up: analizzando la configurazione operativa della galleria, il posizionamento del modello sperimentale, da cui si origina il rilascio, rispetto alla batteria di ventilatori è pari a 7m, come mostrato in Figura 36.

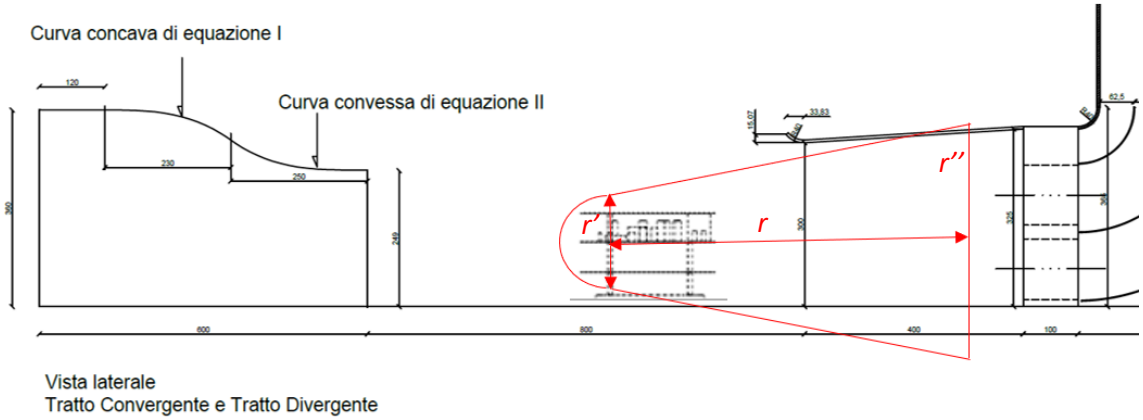

Figura 36 - Rappresentazione di un generico cono di rilascio dall'ugello del Mock-up, planimetria di base da [44]

Ne consegue che, per confinare il volume del cono di rilascio che determina la formazione della zona pericolosa 0, secondo quanto visto nel Capitolo 5, in un raggio inferiore al raggiungimento dei ventilatori, è necessario porre dei limiti alle variabili libere dell'esperimento. Le tre dimensioni del cono sono quelle indicate al Capitolo 5.

Partendo dalle considerazioni di progetto già citate al Capitolo 3, ovvero una distanza condotto convergente – piattaforma di 5m, la distanza fra il punto di rilascio individuato dalla posizione dell'ugello e la batteria di ventilatori, ovvero il primo componente in linea d'aria contenente strumentazione elettrica e non che necessiterebbe adeguamento secondo la normativa ATEX [27] per la Zona 0, risulta essere pari a 7 metri. Volendo cautelativamente restringere la lunghezza della direzione principale di rilascio del cilindro sotto una soglia di accettabilità, possiamo riassumere i risultati come segue:

CAMERA DI PROVA	pressione 16 bar	pressione 14 bar	pressione 12 bar	pressione 10 bar
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	16	14	12	10
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,77	2,77	2,77	2,77
Diametro di rilascio [mm]	5	5	5	5
Portata di rilascio [kg/s]	0,01936	0,01694	0,01452	0,0121
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	7,881	6,896	5,911	4,926
Diluizione	media	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto
Forma	cono	cono	cono	cono
Estensione r [m]	**6,5**	**6**	**5,5**	**5**
Estensione r' [m]	**0,7**	**0,6**	**0,6**	**0,5**
Estensione r'' [m]	**3,9**	**3,6**	**3,3**	**3,0**
Zona	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0

Tabella 10 - Estensione Zona 0 a pressione operativa variabile e diametro dell'ugello pari a 5mm

La Tabella 10 rappresenta le misure del cono che identifica la Zona 0 per una pressione variabile e un diametro dell'ugello fissato a 5mm. Importante sottolineare anche in questo caso come la velocità del vento in un intervallo 1-6 m/s non vari il tipo di zona. Si è quindi utilizzato nelle valutazioni il valore utilizzato nella sperimentazione attuale. Per alti valori di pressione (16-14 bar) le dimensioni del cono sono nei limiti ma comunque molto estese; per pressioni minori le dimensioni diventano man mano meno critiche.

CAMERA DI PROVA	pressione 16 bar	pressione 14 bar	pressione 12 bar	pressione 10 bar
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	16	14	12	10
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,77	2,77	2,77	2,77
Diametro di rilascio [mm]	3	3	3	3
Portata di rilascio [kg/s]	0,00697	0,0061	0,00523	0,00436
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	2,837	2,483	2,128	1,773
Diluizione	media	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto
Forma	cono	cono	cono	cono
Estensione r [m]	3,8	3,5	3,3	3
Estensione r' [m]	0,4	0,4	0,3	0,3
Estensione r'' [m]	2,3	2,1	2,0	1,8
Zona	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0

Tabella 11 - Estensione Zona 0 a pressione operativa variabile e diametro dell'ugello pari a 3mm

Considerazioni analoghe sono possibili per il caso un cui il diametro dell'ugello sia pari a 3 mm. Le dimensioni del cono, e di conseguenza della Zona di pericolo 0 entro la quale è richiesto un adattamento dell'attrezzatura, si ritirano in questo caso in un range di valori accettabile; ancora una volta non vi è una rilevanza del parametro velocità del vento per il range di interesse.

CAMERA DI PROVA	pressione 16 bar	pressione 14 bar	pressione 12 bar	pressione 10 bar
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	16	14	12	10
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,77	2,77	2,77	2,77
Diametro di rilascio [mm]	1	1	1	1
Portata di rilascio [kg/s]	0,000775	0,000678	0,000581	0,000484
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,315	0,276	0,236	0,197
Diluizione	media	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto
Forma	cono	cono	cono	cono
Estensione r [m]	1,2	1,1	1	1
Estensione r' [m]	0,1	0,1	0,1	0,1
Estensione r'' [m]	0,7	0,7	0,6	0,6
Zona	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0	ZONA 0

Tabella 12 - Estensione Zona 0 a pressione operativa variabile e diametro dell'ugello pari a 3mm

Nel caso in cui l'ugello passi a un diametro di 1mm questa tendenza non fa che accentuarsi, riducendo ulteriormente la zona di rischio fino al caso limite di 10 bar per una velocità del vento di 2,77 m/s. Quando si utilizza questo diametro, infatti, la velocità del vento influenza il passaggio da una Zona di pericolo 0 ad una non pericolosa secondo la guida ATEX [43] come detto nel Capitolo 5.

Se l'interesse operativo diventa quello di settare l'esperimento in modo che il rilascio non generi una zona di pericolo, è fondamentale considerare quale valore minimo deve essere assegnato alla velocità del vento affinché la norma consideri una Zona 0 NE, senza prescrizione di adeguamento. Tale possibilità si ha soltanto per rilasci con diametro dell'ugello pari a 1mm.

I risultati sono riassunti in Tabella 13 e Tabella 14:

CAMERA DI PROVA	pressione 16 bar	pressione 14 bar	pressione 12 bar	pressione 10 bar	pressione 9 bar
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	16	14	12	10	9
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	**4,3**	**4**	**3,5**	**3**	**2,8**
Diametro di rilascio [mm]	1	1	1	1	1
Portata di rilascio [kg/s]	0,000775	0,000678	0,000581	0,000484	0,000436
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,315	0,276	0,236	0,197	0,177
Diluizione	media	media	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto	getto
Forma					
Zona	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE

Tabella 13 - Velocità del vento minime per rimanere all'interno della Zona 0 NE - 1

CAMERA DI PROVA	pressione 8 bar	pressione 7 bar	pressione 6 bar	pressione 5 bar	pressione 4 bar
Sostanza	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno	Idrogeno
Pressione operativa [bar]	8	7	6	5	4
Grado di emissione	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Tipo di ventilazione	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica	Meccanica
Disponibilità ventilazione	Buona	Buona	Buona	Buona	Buona
Velocità dell'aria [m/s]	2,2	2	1,8	1,6	1,4
Diametro di rilascio [mm]	1	1	1	1	1
Portata di rilascio [kg/s]	0,000387	0,000339	0,00029	0,000242	0,000194
Caratteristica di emissione Qc [m3/s]	0,158	0,138	0,118	0,0985	0,0788
Diluizione	media	media	media	media	media
Tipo di rilascio	getto	getto	getto	getto	getto
Forma					
Zona	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE	ZONA 0 NE

Tabella 14 - Velocità del vento minime per rimanere all'interno della Zona 0 NE – 2

In verde sono indicati i valori minimi di velocità a cui è necessario settare i ventilatori della batteria in questo scenario.

Per quanto riguarda i rischi per la sicurezza dei lavoratori, l'analisi HAZID [38] rappresenta una giusta base di partenza e permette di individuare scenari totalmente compatibili con il nuovo asset, a fronte di un maggior rischio ad essi associato.

7 Conclusioni

Adeguare la galleria del vento SEASTAR WT all'idrogeno, con lo scopo di effettuare la validazione sperimentale per rilasci di questo gas in pressione, apre nuovi orizzonti verso una transizione energetica che guarda a questa molecola con sempre maggiore interesse.

Le valutazioni svolte hanno permesso di mettere in luce alcuni aspetti interessanti; il suo utilizzo in camera di prova per effettuare prove di rilascio incidentale di gas in percentuali confrontabili con quelle giù utilizzate in passato per il metano, ovvero 2% in volume di idrogeno in aria rispetto al 2,2% della molecola di CH_4, non comporta di per sé significative operazioni di modifica dell'asset attuale. L'idrogeno, in qualità di gas infiammabile, in un intervallo di concentrazioni molto simile al metano può essere rilevato dalla sensoristica già presente in galleria tramite una semplice ri-taratura degli strumenti. Considerazioni molto simili possono essere fatte per la rete del gas, i cui componenti risultano tutti idonei alla gestione della nuova miscela, sia da un punto di vista tecnico che di sicurezza.

Un discorso completamente diverso è da farsi nel caso in cui, durante le prove, si voglia salire con la concentrazione di idrogeno in aria, superando il limite inferiore di infiammabilità. Al crescere della percentuale di idrogeno, o per meglio dire di gas infiammabile, diventa necessario modificare il tratto di rete che è progettato a servizio dell'aria compressa, ma soprattutto gli aspetti di sicurezza legati al rischio incendio ed esplosione diventano sempre più importanti. La normativa prevede che tutte le apparecchiature elettriche e non elettriche all'interno delle zone con pericolo di esplosione debbano essere, per legge, certificate come sicure al fine di limitare la possibilità che forniscano inneschi alla miscela.

L'analisi ATEX effettuata si è quindi rivelata uno strumento fondamentale, non solo per verificare le zone di pericolo derivate dalla presenza di idrogeno puro, ma anche per verificare la non pericolosità che la normativa riconosce al primo scenario considerato (miscela aria-idrogeno al 2%).

Analizzando separatamente i due ambienti dell'area stoccaggio delle bombole e della camera di prova nella quale avviene il rilascio controllato, si vede come i risultati possano portare a diverse considerazioni possibili.

Nel primo caso lo scenario di rischio più gravoso è quello di un rilascio nel tratto di linea di alta pressione (150 bar), che, accompagnato dalla mancanza di una ventilazione meccanica all'interno del locale, potrebbe portarlo alla classificazione di pericolo più alta, e di conseguenza a notevoli costi di messa in sicurezza; diventa quindi interessante valutare un controllo sulla ventilazione e quindi sulla diluizione della miscela in caso di perdita.

Con riferimento alla camera di prova, la valutazione del rischio maggiore ricade sull'esperimento di rilascio gas vero e proprio, dove il rilascio è controllato e con esso le variabili di interesse; in questo caso la valutazione di sicurezza si affianca a quella gestionale e operativa di controllo dei parametri della simulazione, in funzione della zona di pericolo che si desidera mantenere e della sua estensione spaziale. Conoscere la sensibilità con cui parametri quali la pressione di rilascio, il suo diametro e la velocità del vento sono in grado di influenzare le zone che la norma ATEX riconosce come pericolose, permette di determinare a monte l'estensione di tali zone, e del relativo adeguamento tecnico.

Appaiono invece di minore interesse scenari di perdita sui componenti della rete in camera di prova, sia in termini di probabilità di accadimento che di portata rilasciata; quel tratto di rete è infatti interessato da minori pressioni, oltre che inserito in un ambiente molto più ampio e ventilato meccanicamente.

Il lavoro svolto ha quindi permesso di effettuare una valutazione accurata di tipo tecnico e normativo al fine di evidenziare gli scenari di potenziamento del laboratorio (modifiche di progetto e/o delle condizioni di prova) che consentano l'utilizzo dell'idrogeno nella sperimentazione in sicurezza e nel rispetto della normativa vigente.

Bibliografia

[1] A. Carpignano, R. Gerboni, "Oil&gas platforms decommissioning: the hydrogen based alternative way", World Hydrogen Energy Conference, 2018.

[2] "https://www.seastar.center/", last check August 2022.

[3] "https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica/cambiamento-climatico-cause-conseguenze", last check August 2022.

[4] IEA, "Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 - Flagship report", March 2022.

[5] IPCC, "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability", Report, February 2022.

[6] "https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/", last check August 2022.

[7] IEA, "Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector", May 2021.

[8] "https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC01", last check August 2022.

[9] "https://temi.camera.it/leg18/post/il-green-new-deal-europeo.html", last check August 2022.

[10] Parlamento Europeo, "REGOLAMENTO (UE) 2021/241 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO", 12 Febuary 2021.

[11] Parlamento Italiano, "Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR)", 30 April 2021.

[12] A. Gozzi, "L'importanza dell'industria hard to abate italiana", March 2022, "https://rienergia.staffettaonline.com/articolo/34934/L%E2%80%99importanza+dell%E2%80%99industria+hard+to+abate+Italiana/Gozzi", last check August 2022.

[13] "https://tg24.sky.it/economia/approfondimenti/pnrr-idrogeno-verde#00", last check August 2022.

[14] T. Tørnes Pedersen, E. K. Gøtske, A. Dvorak, G. B. Andresen, M. Victoria, "Long-term implications of reduced gas imports on the decarbonization of the European energy system", Joule, 20 July 2022.

[15] “https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131”, last check August 2022.

[16] “https://it.wikipedia.org/wiki/Idrogeno”, last check August 2022.

[17] World Energy Council, “Working Paper - National Hydrogen Strategies”, September 2021.

[18] M. Della Pietra, S. McPhail, L. Turchetti, G. Monteleone, “I ‘colori’ dell’idrogeno nella transizione energetica”, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, ENEA, Febuary 2020.

[19] IEA, “Global Hydrogen Review 2021”, October 2021.

[20] “https://virtualevent.ilsole24ore.com/hydrogen-forum-2022/”, last check August 2022.

[21] “https://www.snam.it/it/transizione_energetica/idrogeno/”, last check August 2022.

[22] “https://www.neptuneenergy.com/esg/poshydon-hydrogen-pilot”, last check August 2022.

[23] A. Battersby, “World’s first offshore green hydrogen project on working platform”, 22 July 2021 updated 26 July 2021, “https://www.upstreamonline.com/hydrogen/ world-s-first-offshore-green-hydrogen-project-on-working-platform/2-1-1043280”, last check August 2022.

[24] “https://www.rinnovabili.it/energia/eolico/saipem-agnes-hub-energetico-green-620-mw/”, last check August 2022.

[25] “https://www.agnespower.com/progetto-adriatico/”, last check August 2022.

[26] G.de Fraia, “Catastrofi ambientali: il caso della Deepwater Horizon”, 5 November 2019, “https://marinecue.it/catastrofi-ambientali-deepwater-horizon/12780/”, last check August 2022.

[27] Consiglio dell’Unione Europea, Parlamento europeo, “DIRETTIVA 2013/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO”, 2013.

[28] Parlamento Europeo, “DECRETO LEGISLATIVO 18 agosto 2015 n.145”, 2015.

[29] A. Moscatello, A.C. Uggenti, R. Gerboni, A. Carpignano, “A novel approach to high pressure gas releases simulations”, Elsevier, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 72, 2021.

[30] ENVIRONMENT PARK, “LABSEASTAR Progetto definitivo laboratorio SEASTAR Rev1.1”, Torino, 2019.

[31] ENVIRONMENT PARK, “Planimetria Laboratorio Post Operam Rev1.0”, Torino, 2019.

[32] P. Capozzoli, “Studio teorico-sperimentale di un rilascio come getto libero di un gas in pressione”, Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Energetica, Politecnico di Torino, Settembre 2021.

[33] ENVIRONMENT PARK, “LABSEASTAR MAINTENANCE Rev 1.0”, Torino, 2019.

[34] A. Moscatello, A.C. Uggenti, G. Iuso, D. D’Ambrosio, G.Cafiero, R. Gerboni, A. Carpignano, “Scaling procedure for designing accidental gas release experiment”, Engineering Computations, September 2020.

[35] ENVIRONMENT PARK, “Report analisi di sicurezza Lab SEASTAR Rev 1.0”, Torino, 2019.

[36] D.Lgs. 81 del 09/04/2008, “Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro - [Titolo XI – Protezione da Atmosfere Esplosive]”, Rev. January 2020.

[37] B.I 61882, “HAZOP guide”, 2016.

[38] ENVIRONMENT PARK, “Report analisi di sicurezza Lab SEASTAR Rev 1.0”, Torino, 2019.

[39] IEC/EN 61508, “Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.”, 2010.

[40] ENVIRONMENT PARK, “Integrazione report analisi di sicurezza Lab SEASTAR Rev 1.0” Torino, 2019.

[41] Ministero Dell’Interno, “Testo coordinato del DPR del 1 agosto 2011 n. 151 e del DM 07/08/2012”, May 2021.

[42] Norma CEI EN IEC 60079-10-1, “Atmosfere esplosive. Parte 10-1: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas”, September 2021.

[43] Guida CEI 31-35, “Atmosfere esplosive - Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87)”, Febuary 2012.

[44] ENVIRONMENT PARK, “Modello 3D Galleria del Vento per confronto fluidodinamico Rev1.0”, Torino, 2019.

Ringraziamenti

Ci tengo a ringraziare tutti coloro che direttamente o indirettamente hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro e che mi hanno sostenuto durante il percorso di laurea.

Il primo fondamentale ringraziamento va al professor A. Carpignano e alla professoressa R. Gerboni, che grazie al costante supporto, ai preziosi consigli e all'infinita pazienza sono riusciti nell'impresa non irrilevante di condurmi alla conclusione di questo percorso.

Ringrazio A. Moscatello, G. Ledda e A.C. Uggenti per il valido supporto tecnico e di validazione dei risultati ottenuti nelle varie fasi del lavoro.

Ringrazio S. Fiorot per il suo aiuto e la sua gentilezza durante il tirocinio in Environment Park, che mi hanno permesso di approcciarmi all'argomento con interesse.

Un grazie speciale va ad Alessandra, che è riuscita nell'ardua impresa di portare la giusta dose di leggerezza e distrazione nei lunghi periodi di studio e lavoro, e che mi ha sostenuto, sopportato, perdonato, sorriso e amato sempre, con costanza e coraggio, al di là delle incalcolabili zuffe da mercato del bestiame che abbiamo da sempre.

Ai miei genitori, fonte di ispirazione nonché di problemi, che ho svegliato un numero incalcolabile di notti di studio a causa della mia mancanza di quiete, e a cui devo più di quanto forse potrò mai comprendere davvero.

A mio fratello Davide, che forse più di tutti ha pagato il prezzo dei miei errori e dei miei momenti difficili, e nonostante tutto è sempre stato in grado di aiutare e comportarsi da fratello maggiore pur essendo quasi 10 anni più giovane.

Ai miei amici e colleghi, tutti quanti, ognuno a modo suo, ognuno in modo sincero, che hanno sempre saputo darmi tanto.

Spero di poter diventare, con il tempo, una persona più degna dell'affetto di tutti coloro senza i quali questo traguardo non sarebbe stato neanche lontanamente raggiungibile.