



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Ottobre 2025

**Applicazione dell'analisi del rischio alle
stazioni di rifornimento di idrogeno:
revisione critica e studio simulativo di
un caso impiantistico**

Relatore:

Prof. Romano Borchiellini

Candidato:

Pierluca Mastrantonio

Correlatore:

Prof. Davide Papurello

Correlatore esterno:

Ing. Rugiada Scozzari
(Cantene S.r.l.)

Sommario

Indice delle figure	3
Indice delle tabelle	11
Abstract.....	14
1. Il ruolo dell'idrogeno nello scenario energetico mondiale	16
1.1 Potenzialità, sfide e panorami futuri	16
1.2 Tipologie di impianto: le HRS	24
1.3 Sviluppo e diffusione nel contesto nazionale ed internazionale	28
1.4 Riferimenti normativi e standard per la sicurezza degli impianti a idrogeno	35
2. Il ruolo dell'analisi del rischio	39
2.1 Inquadramento teorico	39
2.2 Applicazione negli impianti a idrogeno	49
2.2.1 Obiettivi ed ostacoli	49
2.2.2 Tecniche e software impiegati	50
2.2.3 Database di riferimento.....	55
3. Evidenze dagli studi del settore	68
3.1 Casi studio rilevanti	70
3.2 Approfondimento sulle frequenze di accadimento	95
4. Studio simulativo di un caso impiantistico: analisi delle frequenze e delle conseguenze mediante HyRAM+ e PHAST	109
4.1 Descrizione dell'impianto.....	109
4.2 Metodologia simulativa	113
4.2.1 Analisi delle frequenze.....	114
4.2.2 Analisi delle conseguenze	119
4.3 Presentazione e discussione dei risultati	123
4.3.1 Caratteristiche di perdita e frequenze di accadimento	123
4.3.2 Analisi delle conseguenze mediante simulazioni semplificate	126

4.3.3 Analisi delle conseguenze mediante simulazioni CFD.....	136
4.4 Valutazione delle distanze di sicurezza.....	156
4.5 Applicazione del French Land Use Planning Method	159
5. Conclusioni	165
5.1 Sintesi del lavoro svolto e principali evidenze emerse	165
5.2 Implicazioni e sviluppi futuri.....	169
6. Bibliografia	172

Indice delle figure

Figura 1: Impatto sull’aumento globale di temperatura di diversi Paesi e comunità dal 1851 al 2023. Fonte: Our World in Data, “CO ₂ and Greenhouse Gas Emissions”, [https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions], data di accesso: 17/08/2025	17
Figura 2: Andamento delle emissioni pro-capite di GHG in diverse regioni del mondo dal 1850 al 2023. Fonte: Our World in Data, “CO ₂ and Greenhouse Gas Emissions”, [https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions], data di accesso: 17/08/2025	17
Figura 3: Andamento delle emissioni di CO ₂ per unità di PIL in diverse regioni del mondo dal 1850 al 2022. Fonte: Our World in Data, “CO ₂ and Greenhouse Gas Emissions”, [https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions], data di accesso: 17/08/2025	18
Figura 4: Diagramma di flusso relativo alle possibili conseguenze di una perdita di idrogeno [11].....	23
Figura 5: Legenda delle HRS, che si dividono in “in attività”, “programmate” e “progetti abbandonati” [17]	28
Figura 6: Distribuzione delle HRS in Europa [17]	28
Figura 7: Distribuzione delle HRS in Asia [17].....	29
Figura 8: Distribuzione delle HRS in Nord America e America Centrale [17]	29
Figura 9: Distribuzione delle HRS in Oceania [17].....	29
Figura 10: HRS Onsite di Bolzano [25].....	33
Figura 11: HRS Offsite di Venezia Mestre	33
Figura 12: HRS di Carugate Est	34
Figura 13: Infografica delle 36 stazioni delle quali risultano già approvati i progetti [28]	34
Figura 14: Curva F-N e rappresentazione su di essa delle tre categorie di rischio presentate [34].....	41

Figura 15: Indici qualitativi impiegati nella valutazione della probabilità di un evento [34]	43
Figura 16: Indici qualitativi impiegati nella valutazione dell'impatto di un evento sulla salute [34]	43
Figura 17: Matrice di rischio relativa alla salute e alla sicurezza delle persone [34]	44
Figura 18: Soglie di accettabilità per il rischio sociale ed effetto delle misure correttive [34]	45
Figura 19: Fasi principali del processo di analisi del rischio [34]	46
Figura 20: Struttura tipo di un albero degli eventi [34]	48
Figura 21: Processo di verifica della sicurezza per un'HRS mediante l'analisi del rischio [6]	51
Figura 22: Suddivisione argomentativa e geografica degli studi selezionati in Ref. [6]	52
Figura 23: Risultati statistici relativi al luogo dell'incidente [11]	60
Figura 24: Risultati statistici relativi all'elemento di origine dell'incidente [11]	60
Figura 25: Risultati statistici relativi alle cause d'incidente [11]	61
Figura 26: Risultati statistici relativi alle conseguenze dell'incidente [11]	61
Figura 27: Risultati statistici relativi alle cause d'incidente [35]	62
Figura 28: Catena del valore dell'idrogeno considerata in Ref. [8]	63
Figura 29: Risultati statistici relativi alle cause d'incidente [8]	64
Figura 30: Risultati statistici relativi all'elemento di origine dell'incidente [8]	64
Figura 31: Numero eventi che presentano ciascuna delle sottocause relative alle operazioni di gestione ordinaria [8]	65
Figura 32: Numero eventi che presentano ciascuna delle sottocause collegate all'errore umano [8]	65
Figura 33: Numero eventi che presentano ciascuna delle sottocause relative alla gestione del processo produttivo [8]	66
Figura 34: Posizione della stazione e dei complessi residenziali adiacenti [19]	70
Figura 35: Intensità di irraggiamento termico nei punti di calcolo definiti per il carro bombolaio [19]	72

Figura 36: Intensità di irraggiamento termico nei punti di calcolo definiti per il serbatoio di stoccaggio [19].....	73
Figura 37: Aree di influenza soglie di interesse sovrappressione per large leak (sx) e rottura catastrofica (dx) a partire dal carro bombolaio [19].....	74
Figura 38: Aree di influenza soglie di interesse sovrappressione per large leak (sx) e rottura catastrofica (dx) a partire dal serbatoio di stoccaggio [19]	74
Figura 39: Matrice di definizione del livello di accettabilità del rischio, tratta da [42] .	76
Figura 40: Layout della HRS analizzata e rappresentazione dei punti di rilascio e di quelli di valutazione del rischio [10]	77
Figura 41: Albero degli eventi nel caso di perdite coincidenti con il campo di controllo delle EFVs [10].....	78
Figura 42: Albero degli eventi nel caso di perdite non coincidenti con il campo di controllo delle EFVs [10].....	78
Figura 43: Condizioni simulative per l'analisi delle conseguenze [10].....	79
Figura 44: Zone del layout impiantistico caratterizzate da determinati livelli di IR [10]	80
Figura 45: Vista satellitare dell'impianto [9]	81
Figura 46: Curva F-N per i casi considerati [9]	88
Figura 47: Diagramma a farfalla per una perdita di idrogeno nella stazione con visualizzazione delle possibili conseguenze [5]	90
Figura 48: Diagramma bowtie a seguito della perdita con barriere di sicurezza [5]	92
Figura 49: Modello integrato per la progettazione di una HRS impiegato in Ref. [7] ...	93
Figura 50: ET conseguente alla perdita o alla rottura relativa al sistema di stoccaggio, tratta da Ref. [43]	96
Figura 51: Frequenze di perdita annue per vari componenti del sistema [43].....	97
Figura 52: ESD di riferimento per gli scenari considerati da HyRAM [44].....	97
Figura 53: Esempio di FT per le perdite casuali [44]	99

Figura 54: Grafico a scatola e baffi inerente alle frequenze annuali di default considerate per i vari componenti del sistema; in alto per idrogeno gassoso, in basso per idrogeno liquido [44]	100
Figura 55: Frequenze annuali dei componenti del sistema per le varie dimensioni della perdita: media, deviazione standard e mediana [44].....	101
Figura 56: FT impiegato per la valutazione delle perdite legate al dispenser [44].....	103
Figura 57: Distanze di sicurezza da garantire a partire dagli elementi pericolosi, tratte dal DM 07/07/23	111
Figura 58: Layout impiantistico, vista in pianta	112
Figura 59: Layout impiantistico, vista tridimensionale	113
Figura 60: Diagramma di flusso che rappresenta il processo di studio messo in atto ..	114
Figura 61: Condizioni di impiego del fluido nella prima configurazione, immagine tratta da HyRAM+	116
Figura 62: Condizioni di impiego del fluido nella seconda configurazione, immagine tratta da HyRAM+	116
Figura 63: Caratteristiche delle tubazioni nella prima configurazione, immagine tratta da HyRAM+	117
Figura 64: Caratteristiche delle tubazioni nella seconda configurazione, immagine tratta da HyRAM+	117
Figura 65: Combustibile scelto, immagine tratta da HyRAM+.....	118
Figura 66: Caratteristiche dell'impianto, immagine tratta da HyRAM+.....	118
Figura 67: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 0.01% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	126
Figura 68: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 0.01% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST.....	127
Figura 69: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 10% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	128
Figura 70: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 10% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST.....	128

Figura 71: Distribuzione delle aree di sovrappressione conseguenti all'esplosione per leak 10% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	129
Figura 72: Andamento della sovrappressione d'esplosione in funzione della distanza per leak 10% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	129
Figura 73: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 100% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	130
Figura 74: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 100% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	130
Figura 75: Distribuzione delle aree di sovrappressione conseguenti all'esplosione per leak 100% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	131
Figura 76: Andamento della sovrappressione d'esplosione in funzione della distanza per leak 100% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST	131
Figura 77: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 0.01% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST	132
Figura 78: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST	133
Figura 79: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST	133
Figura 80: Distribuzione delle aree di sovrappressione conseguenti all'esplosione per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST	134
Figura 81: Andamento della sovrappressione d'esplosione in funzione della distanza per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST	134
Figura 82: Legenda dei risultati grafici relativi alla distribuzione delle zone isotermitiche, tratta da PHAST	137
Figura 83: Legenda dei risultati grafici relativi alla distribuzione dei livelli di irraggiamento termico, tratta da PHAST	138
Figura 84: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	138
Figura 85: Superficie isotermitica e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	139

Figura 86: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	139
Figura 87: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	140
Figura 88: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	140
Figura 89: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST.....	141
Figura 90: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	141
Figura 91: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	142
Figura 92: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista frontale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST	142
Figura 93: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	143
Figura 94: Superficie isoterma e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	143
Figura 95: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST	144
Figura 96: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST	144
Figura 97: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST	145
Figura 98: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST	145
Figura 99: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST	146
Figura 100: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST	146

Figura 101: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista frontale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	147
Figura 102: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	147
Figura 103: Superficie isoterma e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	148
Figura 104: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST	148
Figura 105: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST	149
Figura 106: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST	149
Figura 107: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	150
Figura 108: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	150
Figura 109: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	151
Figura 110: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista frontale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	151
Figura 111: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	152
Figura 112: Superficie isoterma e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	152
Figura 113: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	153
Figura 114: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST	153
Figura 115: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	154

Figura 116: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	154
Figura 117: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	155
Figura 118: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST.....	155

Indice delle tabelle

Tabella 1: Caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno poste a confronto con quelle del gas naturale e della benzina [6].....	22
Tabella 2: HRS presenti nei principali Paesi del mondo e panorami futuri.....	31
Tabella 3: Suddivisione argomentativa e geografica degli studi selezionati in Ref. [6].	53
Tabella 4: Suddivisione degli studi selezionati sulla base degli approcci riscontrati [6]	54
Tabella 5: Database impiegati come fonti e numero di eventi tratti [8].....	63
Tabella 6: Presentazione studi raccolti e relative caratteristiche	70
Tabella 7: Dati relativi agli scenari accidentali tratti da HyRAM [19].....	71
Tabella 8: Soglie di interesse considerate per l'irraggiamento termico e la sovrappressione [19].....	72
Tabella 9: Numero di persone coinvolte nello scenario large leak [19]	75
Tabella 10: Numero di persone coinvolte nello scenario rottura catastrofica [19]	75
Tabella 11: Livelli di gravità definiti in Ref. [42].....	76
Tabella 12: Classi di frequenza riportate in Ref. [42]	76
Tabella 13: Caratteristiche operative dell'impianto [9]	82
Tabella 14: Diametri di rilascio e frequenze di accadimento per gli elementi considerati [9].....	82
Tabella 15: Portate di rilascio per i vari elementi e i vari scenari di perdita [9]	83
Tabella 16: Probabilità di fallimento e tempo per l'intervento per le tre tipologie di valvole [9].....	83
Tabella 17: Risultati CA legati al jet fire a seguito di scenari di perdita [9].....	84
Tabella 18: Risultati CA legati alla VCE a seguito di scenari di perdita [9]	84
Tabella 19: Risultati CA legati a fireball a seguito di rottura catastrofica [9]	85
Tabella 20: Risultati CA legati a VCE a seguito di rottura catastrofica [9].....	85
Tabella 21: IR legati ai vari scenari e alla presenza di dispositivi mitigativi [9].....	86

Tabella 22: Rischio individuale totale per operatori e persone esterne nei vari casi [9]	87
Tabella 23: Rischio di perdita di vita legato ai diversi componenti secondo RISKCURVES [36].....	89
Tabella 24: Distanze di sicurezza necessarie nelle varie zone dell'impianto [5].....	91
Tabella 25: Effetto delle barriere di sicurezza sulle frequenze di accadimento [5].....	92
Tabella 26: Valori di default per le probabilità di accensione immediata e ritardata impiegati in HyRAM [44].....	98
Tabella 27: Caratteristiche delle probabilità di guasto associate ai componenti del dispenser [44].....	104
Tabella 28: Caratteristiche delle distribuzioni delle frequenze degli incidenti legati al dispenser [44].....	104
Tabella 29: Frequenze annuali di perdita per gli elementi considerati in Ref. [36].....	105
Tabella 30: Frequenze annuali legate agli elementi del diagramma a farfalla [5].....	107
Tabella 31: Frequenze di accadimento delle perdite di H ₂ e dei possibili eventi consequenziali per varie dimensioni della perdita [5]	107
Tabella 32: Caratteristiche dello scenario di perdita nei casi con maggior tasso di evento	124
Tabella 33: Portate di rilascio e frequenze di accadimento nei casi con maggior tasso di evento.....	124
Tabella 34: Caratteristiche dello scenario di perdita nei casi peggiori in termini di quantità di rilascio.....	124
Tabella 35: Portate di rilascio e frequenze di accadimento nei casi peggiori in termini di quantità di rilascio.....	125
Tabella 36: Caratteristiche dello scenario di perdita nei due casi legati all'attività di rifornimento	125
Tabella 37: Portate di rilascio e frequenze di accadimento nei casi legati all'attività di rifornimento	125
Tabella 38: Distanze massime dall'origine di raggiungimento dei valori soglia per l'irraggiamento termico nei vari scenari	135

Tabella 39: Lunghezza di fiamma e area dell'ellisse isovalore di irraggiamento termico per i vari scenari di rilascio.....	135
Tabella 40: Distanze massime dall'origine di raggiungimento dei valori soglia per la sovrappressione nei vari scenari	135
Tabella 41: Diametri delle circonferenze isovalore di sovrappressione per i vari scenari di rilascio.....	136
Tabella 42: Parametri di input per le simulazioni CFD	137
Tabella 43: Confronto tra le distanze di sicurezza indicate in: DM 07.07.23, DM 23.10.18 e NFPA 2	156
Tabella 44: Confronto tra le distanze indicate dal DM 07/07/2023 e quelle determinate mediante le simulazioni semplificate e CFD svolte tramite PHAST.....	158
Tabella 45: Livelli considerati per irraggiamento termico e sovrappressione e relativi effetti sulla popolazione.....	160
Tabella 46: N° persone nelle potenziali aree di impatto dei vari scenari di jet fire	161
Tabella 47: N° persone nelle potenziali aree di impatto dei vari scenari di esplosione	161
Tabella 48: Catalogazione scenari secondo classi di frequenza.....	162
Tabella 49: Classificazione per gli scenari di jet fire	163
Tabella 50: Classificazione per gli scenari di esplosione.....	164

Abstract

L'attuale panorama energetico mondiale risulta fortemente influenzato dalla necessità di ridurre l'impiego dei combustibili fossili, dato il loro impatto sulle condizioni climatiche e sull'inquinamento ambientale. In questo scenario l'idrogeno emerge come vettore energetico strategico grazie all'elevato potere calorifico inferiore (143 MJ/kg) e alla versatilità di stoccaggio che lo caratterizzano e che ben si sposano con le nuove necessità del settore. A fronte di ciò, recentemente numerosi Paesi - su tutti quelli asiatici (Cina, Corea del Sud e Giappone) - hanno investito in maniera significativa nello sviluppo della filiera dell'idrogeno, comportando la diffusione dell'idrogeno in diversi settori. Ne è un esempio il consistente sviluppo a livello globale delle stazioni di rifornimento a idrogeno (*Hydrogen Refueling Station*, HRS), dettato principalmente dalla volontà di sfruttare le potenzialità dell'idrogeno stesso nel campo dei trasporti mediante i veicoli a celle a combustibile (FCEV).

La crescente diffusione di tali impianti richiede necessariamente l'adozione di normative e standard opportuni, in modo da garantire livelli di sicurezza adeguati. Ciò è reso significativamente complesso dalle particolari caratteristiche dell'idrogeno, la cui pericolosità si scontra con la limitata esperienza nella sua gestione e con la conseguente scarsità di dati storici e statistici affidabili. In questo contesto, l'analisi del rischio riveste un ruolo cruciale per supportare lo sviluppo di una progettazione sicura e l'integrazione sociale delle infrastrutture a idrogeno, evitando l'incorrere di incidenti e migliorando la gestione delle emergenze. La presente trattazione, figlia di un'accurata attività di analisi bibliografica, si propone dunque di introdurre i concetti chiave dell'analisi del rischio, illustrandone in particolare le metodologie applicabili al contesto delle HRS, i principali ostacoli e i casi studio maggiormente meritevoli di interesse. Particolare attenzione viene inoltre dedicata alle metodologie tipicamente adottate per la determinazione delle frequenze di accadimento degli eventi accidentali, rappresentando un aspetto fortemente complesso dell'analisi, a causa delle poche informazioni a disposizione.

A completamento del lavoro d'analisi si presenta lo studio di un caso applicativo, realizzato mediante software specialistici (HyRAM+ e PHAST), avente l'obiettivo di vedere applicate ad una nuova casistica alcune delle tecniche riscontrate negli studi precedentemente illustrati. Le simulazioni condotte permettono inoltre di definire le aree di influenza degli eventi accidentali e conseguentemente di confrontarne le dimensioni

con le distanze di sicurezza suggerite dai decreti ministeriali e dalle normative di riferimento.

Infine, una visione critica dei risultati raccolti viene presentata nella sezione conclusiva della trattazione, nella quale si riassumono anche le sfide e le possibilità future, mettendo in risalto le possibili vie da intraprendere per uno sviluppo delle tecnologie legate all'idrogeno efficacemente supportato da un'accurata analisi dei rischi.

1. Il ruolo dell'idrogeno nello scenario energetico mondiale

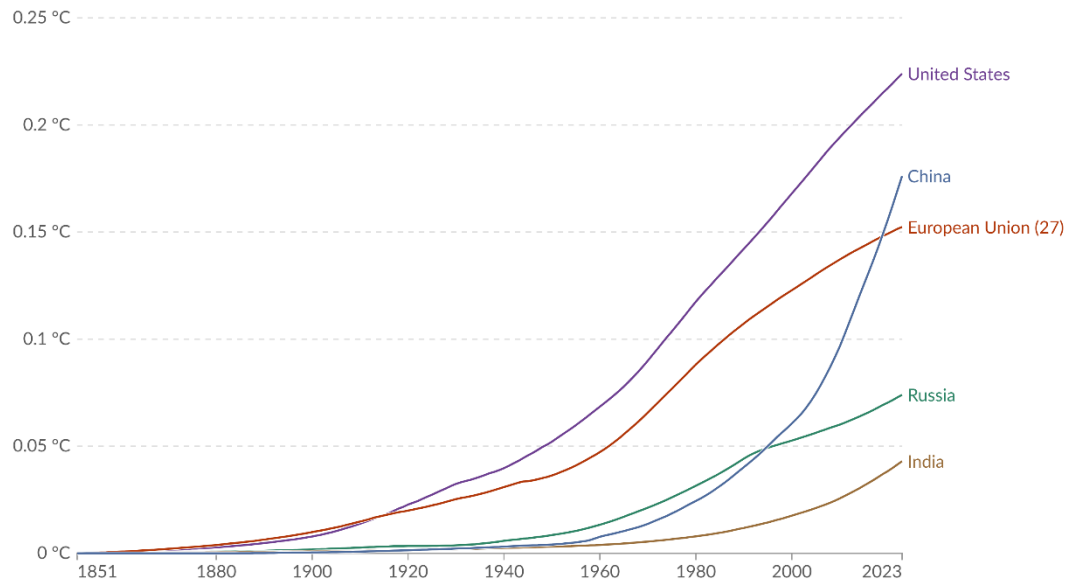
1.1 Potenzialità, sfide e panorami futuri

A partire dall'inizio del ventunesimo secolo lo scenario energetico mondiale è stato investito con veemenza dal crescente interesse della collettività per l'impatto ambientale dei processi di produzione e sfruttamento dell'energia. Tale interesse si è ben presto tradotto nella volontà di ridurre l'impiego dei combustibili fossili, individuati come principali colpevoli dello sviluppo di sostanze nocive e dei cambiamenti climatici globali. Secondo lo scenario STEPS (*Stated Policies Scenario*) delineato nel *World Energy Outlook 2024* dell'*International Energy Agency* (IEA), il quale tiene conto solamente delle politiche energetiche e climatiche attualmente in vigore o ufficialmente dichiarate dai governi, le emissioni globali di gas serra continueranno a crescere fino a metà secolo, determinando un incremento della temperatura media globale di circa 2.4 °C entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali (dunque circa +1.2 °C rispetto ad oggi), con conseguenti effetti critici sulla popolazione mondiale [1]. La necessità di mitigare tali effetti, oltre a quella di soddisfare una richiesta sempre più elevata, ha spinto il settore energetico ad una rapida evoluzione, che ha trovato manifestazione nello sviluppo di tecnologie alternative in grado di ridurre l'impatto e le conseguenze della produzione di energia, figlie della stretta collaborazione tra le principali aziende del campo e la comunità scientifica. Va notato che il processo evolutivo del settore ha avuto luogo principalmente nei Paesi occidentali, nei quali il cambiamento climatico connesso all'inquinamento derivante da fattori umani rappresenta ad oggi un vero e proprio tema sociale, mentre in altre regioni del mondo, come la Cina e l'India, il sistema produttivo persiste nell'impiego di fonti altamente inquinanti [2] [3]. A supporto di quanto detto finora vengono riportati, rispettivamente in *Figura 1*, *Figura 2* e *Figura 3*, gli andamenti relativi a: impatto sul riscaldamento globale dei principali sistemi produttivi mondiali, produzione pro-capite di gas serra e quantità di CO₂ emessa per unità di PIL. Risulta evidente, in particolare dal grafico relativo alla produzione pro-capite di GHG, che a partire dall'inizio del ventunesimo secolo USA ed UE stiano tentando di ridurre l'impatto dei propri sistemi produttivi facendo affidamento su tecnologie aventi conseguenze ambientali meno nefaste, mentre altri protagonisti dello scenario globale continuano ad essere caratterizzate da un andamento di forte crescita delle emissioni.

Contribution to global mean surface temperature rise from fossil sources, 1851 to 2023

Our World
in Data

The global mean surface temperature change as a result of a country or region's cumulative emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. This is for fossil fuel and industry¹ emissions only – it does not include land use or agriculture.



Data source: Jones et al. (2024)

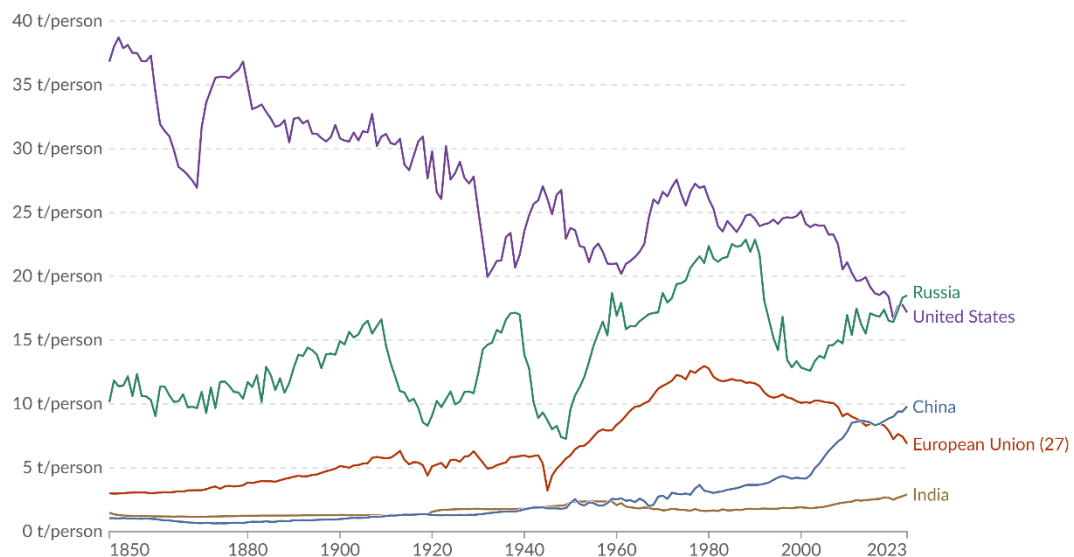
OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

*Figura 1: Impatto sull'aumento globale di temperatura di diversi Paesi e comunità dal 1851 al 2023.
Fonte: Our World in Data, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions", [https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions], data di accesso: 17/08/2025*

Per capita greenhouse gas emissions

Our World
in Data

Greenhouse gas emissions¹ include carbon dioxide, methane and nitrous oxide from all sources, including land-use change. They are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.



Data source: Jones et al. (2024); Population based on various sources (2024)

Note: Land-use change emissions can be negative.

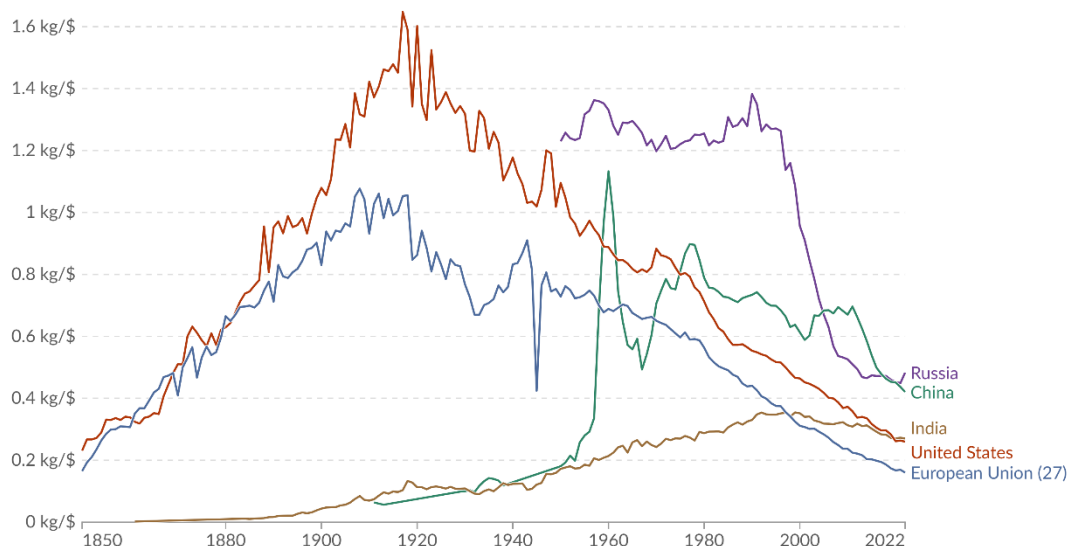
OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

*Figura 2: Andamento delle emissioni pro-capite di GHG in diverse regioni del mondo dal 1850 al 2023.
Fonte: Our World in Data, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions", [https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions], data di accesso: 17/08/2025*

Carbon intensity: CO₂ emissions per dollar of GDP



Kilograms of CO₂ emitted per dollar of GDP. Fossil fuel and industry emissions¹ are included. Land-use change emissions are not included. GDP data is adjusted for inflation and differences in living costs between countries.



Data source: Global Carbon Budget (2024); Bolt and van Zanden - Maddison Project Database 2023

Note: GDP data is expressed in international-\$² at 2011 prices.

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Figura 3: Andamento delle emissioni di CO₂ per unità di PIL in diverse regioni del mondo dal 1850 al 2022. Fonte: Our World in Data, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions", [\[https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions\]](https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions), data di accesso: 17/08/2025

Si specifica che gli andamenti riportati nelle figure sono aggiornati al 2023, in quanto per il 2024 e il 2025 non sono ancora disponibili dati consolidati; essi potranno essere prontamente integrati in studi successivi non appena risulteranno disponibili.

A livello politico, il cambiamento di approccio in merito al tema ambientale avvenuto negli ultimi quindici anni ha trovato compimento nella stipulazione dell'Accordo di Parigi del 2015, il quale consiste in un trattato internazionale avente l'obiettivo di limitare l'innalzamento della temperatura al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali mediante l'adozione di misure funzionali alla riduzione dell'emissione di gas serra; l'accordo è stato stipulato da 195 enti. Risulta in generale evidente l'andamento politico dell'Unione Europea, la quale mira a diventare il capofila globale verso la sostenibilità ambientale; ne è un ulteriore esempio la stipulazione del *Green Deal*, che consiste in una serie di politiche ed iniziative promosse dalla Commissione Europea con l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 [4].

All'interno del contesto appena descritto il ruolo dell'idrogeno (H_2) risulta emergere convintamente mostrando spiccate potenzialità; esso si propone infatti come vettore energetico in grado di assecondare la necessità di ridurre (e poi eliminare del tutto) l'impiego di combustibili fossili e conseguentemente di abbattere emissioni ed inquinamento annesso, minimizzando l'impatto della produzione energetica sull'ambiente. Ciò è reso possibile dalla forte versatilità dell'idrogeno, data dalle sue caratteristiche, che lo rende impiegabile con ruoli differenti in diversi ambiti e settori, anche in quelli più complessi dal punto di vista dell'evoluzione del processo, come i trasporti pesanti e le industrie chimiche, siderurgiche e del cemento [5]. In particolare, risulta spiccatamente adatto alle applicazioni industriali grazie a due proprietà:

- Elevato potere calorifico inferiore, pari a 143 MJ/kg: risulta nettamente superiore rispetto a quelle, ad esempio, del gas naturale e della benzina, pari rispettivamente a 53.6 e 46.4 MJ/kg;
- Adattabilità a diverse opzioni di stoccaggio: le modalità più impiegate sono sotto forma di gas compresso o di liquido criogenico, ma stanno emergendo anche tecniche differenti come lo stoccaggio su superfici solide, sfruttando l'adsorbimento da parte di materiali porosi, e lo stoccaggio in liquidi organici [6].

Come già anticipato, tali caratteristiche lo rendono perfettamente in linea con le necessità dettate dalla transizione energetica, facendogli assumere un ruolo di prim'ordine in associazione allo sfruttamento delle fonti rinnovabili. Queste risultano infatti caratterizzate da una forte intermittenza e dall'impossibilità di stoccare l'energia da esse ricavata, divenendo complessamente adattabili al soddisfacimento della richiesta energetica comune. L'idrogeno, potendo essere prodotto mediante diverse tecniche a partire dall'energia derivante dalle fonti a zero emissioni, può subentrare come vettore energetico e mezzo di stoccaggio: l'energia in eccesso, nei momenti di bassa richiesta, può essere impiegata per la produzione di idrogeno, che andrebbe stoccato al fine di essere utilizzato in momenti di richiesta elevata e/o scarsa disponibilità delle fonti rinnovabili [6].

Anche il settore dei trasporti potrebbe beneficiare notevolmente di un maggior impiego dell'idrogeno, che permetterebbe di svincolarlo dal massiccio utilizzo dei combustibili fossili. Ne risulta un'evidente dimostrazione il crescente sviluppo dei veicoli a celle a combustibile (*Fuel Cell Electric Vehicles*, FCEVs), che negli ultimi anni ha attratto gli investimenti di case automobilistiche tra le più importanti al mondo, come Toyota e

Hyundai. Tale tecnologia potrebbe rappresentare nei prossimi decenni un'opzione valida per la sostituzione parziale dei veicoli a combustione interna; a conferma di ciò, alcuni studi prevedono che nel 2050 gli FCEVs copriranno il 20% del mercato mondiale dei veicoli leggeri [7].

Tali aspetti hanno condotto numerosi Paesi ad investire copiosamente negli ultimi anni nello sviluppo di tecnologie legate alla filiera dell'idrogeno con l'obiettivo di realizzare le infrastrutture necessarie alla completa e definitiva integrazione nel contesto produttivo e in quello sociale. Gli investimenti sono trainati principalmente dall'individuazione dell'idrogeno come fattore chiave per conseguire la neutralità climatica entro il 2050, obiettivo ormai largamente condiviso a livello internazionale. Si stima di conseguenza che la richiesta globale di idrogeno crescerà vorticosamente nei prossimi decenni, passando dagli attuali 100 milioni di tonnellate annue a valori compresi tra i 500 e i 680 milioni entro il 2050, con una percentuale di aumento annua che si aggirerà attorno al 9.2% fino al 2030 secondo il rapporto *The Future of Hydrogen* dell'IEA. Al momento la richiesta è legata principalmente all'utilizzo nella raffinazione e nell'industria chimica, mentre la tendenza di crescita sarà fortemente spinta dalle quantità necessarie per il supporto alle nuove tecnologie. Dal punto di vista europeo, l'interesse dei governi è testimoniato anche dalla strategia sull'idrogeno dell'UE (COM/2020/301) adottata nel 2020; questa si sviluppa attorno alla programmata azione politica in cinque aree: sostegno agli investimenti, sostegno alla produzione e alla domanda, creazione di un mercato e di infrastrutture per l'idrogeno, ricerca e cooperazione e cooperazione internazionale [8]. Emergono con merito anche le politiche del Regno Unito e della Corea del Sud, due tra i Paesi che stanno puntando con maggiore convinzione sull'idrogeno come vettore energetico chiave per il sistema produttivo nazionale. Il governo UK mira infatti ad essere completamente indipendente dai combustibili fossili entro il 2050 e ha dichiarato, mediante il *UK Hydrogen Strategy Policy Document*, stilato dalla *Health and Safety Executive (HSE)*, che l'idrogeno dovrà coprire una percentuale compresa tra il 20% e il 35% del consumo energetico totale del Paese entro tale data [4]. La Corea del Sud, dal canto suo, ha proclamato nel 2019 la sua *Hydrogen Economy Activation Roadmap* nella quale dichiara gli step fondamentali per l'integrazione dell'idrogeno nel sistema energetico nazionale, tra i quali spicca la volontà di produrre e distribuire 2.9 milioni di FCEVs entro il 2040 [9].

La diffusione dell'idrogeno all'interno del settore energetico e produttivo, nonostante i vari punti di forza già discussi, risulta frenata a causa delle caratteristiche fisico-chimiche

dell'idrogeno stesso che lo rendono una sostanza fortemente complessa da gestire, aumentando le difficoltà nello sviluppo degli strumenti, delle infrastrutture e in generale delle tecnologie destinate al settore. L'idrogeno, infatti, nonostante l'elevato potere calorifico inferiore, presenta una densità energetica volumetrica molto ridotta (9.9 MJ/m^3) che comporta numerose sfide nelle fasi di immagazzinamento e fornitura, imponendo la necessità di adottare pressioni molto elevate. Le piccole dimensioni molecolari e la bassa viscosità dinamica conducono inoltre con facilità al danneggiamento dei materiali di costruzione dei contenitori di stoccaggio, delle tubazioni, delle valvole e delle altre apparecchiature attraverso il meccanismo dell'infragilimento da idrogeno, portando ad avere perdite frequenti. Gli ampi limiti di infiammabilità (4 - 75%), l'energia minima di accensione molto bassa (pari a circa un decimo di quella della benzina), la ridotta temperatura di accensione e l'elevata velocità di combustione lo rendono inoltre facilmente incendiabile e danno vita a fenomeni caratterizzati da un ampio rilascio di energia termica, come esplosioni o *jet fire* [5] [6] [9] [10]. Nella tabella seguente vengono riportate le caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno, del gas naturale e della benzina, in modo da mettere in risalto quanto detto finora.

Parametro	Idrogeno (H_2)	Gas Naturale (CH_4)	Benzina
Int. di infiammabilità in aria (vol%)	4 – 75	4.3 – 15	1.4 – 7.6
Energia min. di innesco (mJ)	0.02	0.28	0.24
Vel. di combustione in aria (cm/s)	265 – 325	37 – 45	37 – 43
Vel. di galleggiamento in aria (m/s)	1.2 – 9.0	0.8 – 6.0	Non galleggiante
Temperatura di accensione (K)	843	923	523 – 698
Velocità della fiamma laminare (m/s)	2.10	0.38	0.42
Densità a 0°C e 1 atm (kg/m^3)	0.09	0.67	4.40
Densità energetica volumetrica (MJ/m^3) a cond. ambiente	10.7	36.4	34'200

Potere calorifico inferiore (MJ/kg)	143	53.6	46.4
-------------------------------------	-----	------	------

Tabella 1: Caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno poste a confronto con quelle del gas naturale e della benzina [6]

Solitamente, in seguito a una perdita di idrogeno da un sistema in pressione, si genera inizialmente un getto ad alta velocità, che si evolve progressivamente in una nube turbolenta (*plume*), la quale tende a salire rapidamente per effetto della forza di galleggiamento; durante questa fase avviene la formazione di una miscela idrogeno-aria la cui concentrazione può rientrare nell'intervallo di infiammabilità del gas. Nel momento in cui la miscela incontra una fonte di innesco, anche caratterizzata da bassissima energia, si può verificare l'accensione. A causa della natura altamente reattiva del gas la fiamma può quindi accelerare rapidamente, dando luogo al fenomeno noto come transizione da deflagrazione a detonazione (*Deflagration-to-Detonation Transition*, DDT), che può completarsi nell'arco di pochi secondi. L'accensione e la conseguente esplosione generano campi localizzati ad alta temperatura e pressione, con potenziali effetti distruttivi su persone, strutture e impianti circostanti. Risulta inoltre ampiamente documentato in diversi studi scientifici che, in determinate condizioni, l'idrogeno compresso può auto-accendersi spontaneamente in seguito a un rilascio improvviso in atmosfera, anche in assenza di sorgenti di accensione esterne [11]. Si riporta in *Figura 4* un diagramma che mostra le possibili fasi che intercorrono dalla perdita alla manifestazione dell'evento dannoso. Per maggiore chiarezza si riportano di seguito le definizioni di *jet fire* e *fireball*, in quanto fenomeni che verranno più volte menzionati all'interno del prosieguo della trattazione:

- **Jet Fire:** Consiste in una fiamma di diffusione turbolenta risultante dalla combustione di un combustibile rilasciato continuamente in una certa direzione con un'elevata quantità di moto. I cospicui flussi di calore verso gli oggetti colpiti dal getto possono causare, in base alle caratteristiche delle apparecchiature e a quelle del rilascio, il loro cedimento strutturale [12].
- **Fireball:** Consiste in una nube sferica di vapore infiammabile in larga parte troppo ricca di combustibile per bruciare interamente, consentendo così solo alla parte esterna di bruciare. Una volta innescata, la *fireball* tende a salire verticalmente sotto la spinta dei gas di combustione caldi, dando origine alla tipica forma a

“fungo”. La temperatura delle fiamme si aggira solitamente attorno ai 1400 °C e genera conseguentemente un elevato irraggiamento termico [12].

Inoltre, a partire dalla nube di gas infiammabile, l'accensione e/o l'esplosione può assumere la forma di un *vapour cloud fire* (o *flash fire*) o di una *vapour cloud explosion* (VCE); il verificarsi di uno o dell'altro fenomeno dipenderà dal fatto che il fronte di fiamma, che si propaga attraverso la nube infiammabile, acceleri abbastanza da subire un DDT e produrre una sovrappressione o un'onda d'urto [12]. Si riportano di seguito maggiormente nel dettaglio le definizioni dei due fenomeni, come fatto per jet fire e fireball:

- Vapour Cloud Fire: Si verifica quando una nube di vapori infiammabili si incendia e la fiamma risultante attraversa la miscela stessa ad una velocità subsonica; in questo caso il gas brucia ma non esplode.
- Vapour Cloud Explosion (VCE): Consiste in un'esplosione che si verifica quando una nube di vapori infiammabili viene incendiata e la fiamma risultante si propaga rapidamente attraverso la nube, generando elevate sovrappressioni; la propagazione della fiamma risulta generalmente deflagrativa (subsonica), ma l'interazione con ostacoli presenti può amplificare la velocità di combustione fino a produrre onde di pressione distruttive [12].

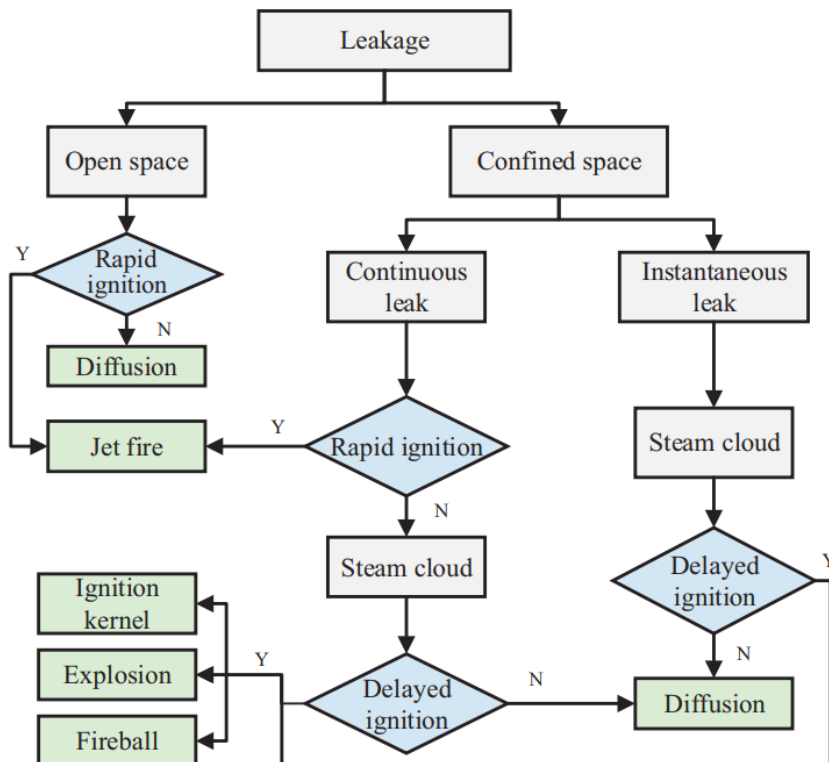


Figura 4: Diagramma di flusso relativo alle possibili conseguenze di una perdita di idrogeno [11]

Tali aspetti rappresentano evidentemente dei fattori non trascurabili nell'evoluzione del sistema energetico, richiedendo un ampio supporto degli enti responsabili delle regolamentazioni per la realizzazione di una filiera che sia in grado non solamente di sfruttare il potenziale dell'idrogeno, ma anche di farlo nel rispetto della collettività, rendendo il processo di integrazione sociale privo, quanto più possibile, di ostacoli. L'impiego dell'idrogeno nell'industria risulta infatti diffuso da tempo, ma la sua espansione in più campi e settori condurrà presto ad una fitta presenza delle infrastrutture anche in contesti urbani e civili, richiedendo conseguentemente l'approvazione del tessuto sociale. Ciò può essere conseguibile solamente rafforzando l'utilizzo di tecniche di analisi e mitigazione dei rischi, al fine di minimizzare gli eventi dannosi legati all'impiego dell'idrogeno; al momento tale processo risulta essere pienamente in atto [4] [9].

Nelle sezioni successive verranno approfonditi con maggior cura sia gli aspetti normativi e gli standard introdotti nelle diverse regioni del mondo che le tecniche impiegate per valutare con accuratezza i rischi e i pericoli di questo contesto in forte evoluzione, portando a supporto della trattazione casi studio, dati ed approcci applicativi.

1.2 Tipologie di impianto: le HRS

Come già affermato nella sezione precedente, un utilizzo ampiamente diffuso dell'idrogeno come vettore energetico, cruciale per il raggiungimento degli obiettivi prefissati sulla neutralità ambientale, risulta realizzabile solamente a seguito della costruzione di una serie di infrastrutture di supporto e dello sviluppo delle tecnologie necessarie a permettere lo sfruttamento su larga scala delle sue potenzialità. Nello scenario appena descritto risulta fondamentale il ruolo delle stazioni di rifornimento di idrogeno (*Hydrogen Refueling Stations*, HRS), che rappresentano la manifestazione più completa e avanzata del nuovo ruolo dell'idrogeno nel panorama energetico, permettendogli di assumere un ruolo di rilevanza sia nel campo dell'immagazzinamento energetico che in quello dei trasporti [6]. Le HRS possono essere di due tipi:

- Offsite Hydrogen Refueling Station: provvedono allo stoccaggio e alla distribuzione dell'idrogeno a veicoli leggeri e/o mezzi pesanti a celle a combustibile, ma non alla produzione vera e propria, affidandosi a produzioni

esterne che forniscono le quantità desiderate mediante diversi possibili sistemi di distribuzione;

- Onsite Hydrogen Refueling Station: l'intero processo viene realizzato in corrispondenza del sito, a partire dalla produzione fino ad arrivare alla distribuzione ultima, passando per la compressione e lo stoccaggio. Rappresenta la tecnologia più avanzata, ma comporta complessità e costi elevati [6] [9] [11].

La produzione di idrogeno, realizzata o meno in corrispondenza del complesso comprendente la stazione di rifornimento, può essere effettuata mediante diverse tecniche, alcune delle quali verranno sinteticamente presentate di seguito. Si citano:

- Steam Methane Reforming (SMR): Rappresenta il metodo industriale attualmente più impiegato, coprendo il 95% della produzione odierna; tale tecnica è basata sulla reazione tra metano e vapore acqueo e dà vita al cosiddetto "idrogeno grigio". Il processo risulta altamente efficiente, ma anche responsabile dell'emissione di cospicue quantità di CO₂; per questo motivo negli ultimi tempi sono aumentati gli investimenti mirati ad un'evoluzione del processo, associandolo a tecniche di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS) in grado di ridurre le emissioni del 60% - 90%, dando vita così all'"idrogeno blu".
- Elettrolisi dell'acqua: Rappresenta la tecnologia maggiormente in crescita data l'assenza di emissioni legate al processo. L'idrogeno viene prodotto inducendo l'elettrolisi dell'acqua mediante l'impiego di energia elettrica; ciò la rende perfettamente associabile a produzioni di elettricità mediante fonti rinnovabili. In questo caso si parla comunemente di "idrogeno verde".
- Gassificazione delle biomasse: È un processo che vede la conversione di materiale organico in gas sintetici contenenti idrogeno mediante un riscaldamento in assenza di ossigeno. L'idrogeno viene poi estratto mediante tecniche di purificazione.

Altri metodi sono attualmente utilizzati in maniera spiccata solamente in alcuni Paesi; ne sono un esempio la produzione per deidrogenazione di metilcicloesano (MCH) utilizzata in Giappone e quella per deidrogenazione dell'acido formico impiegata in Corea del Sud [14]. In questo momento la produzione di idrogeno verde sta concentrando l'attenzione della comunità scientifica e gli investimenti delle aziende pubbliche e private, dato l'abbattimento delle emissioni ottenibile per mezzo di essa. D'altro canto, i costi di realizzazione risultano ad oggi ancora elevati e costringono a valutazioni più ampie. I

fattori maggiormente influenti sono rappresentati dal prezzo dell'elettricità prodotta da fonti rinnovabili e dai costi di investimento legati agli elettrolizzatori. Una crescita significativa della produzione energetica da fonti rinnovabili potrebbe portare nei prossimi tempi a una forte riduzione dei prezzi connessi, rendendo l'idrogeno verde sempre più competitivo. Inoltre, anche i prezzi di realizzazione dell'elettrolisi subiranno verosimilmente un calo grazie all'aumento degli investimenti nel campo e agli effetti dell'economia di scala [8]. Secondo un report pubblico dell'*Hydrohub Innovation Program* la produzione di idrogeno verde è in ogni caso destinata a crescere a un ritmo senza precedenti nei prossimi anni. Nei Paesi Bassi, ad esempio, è previsto il completamento della realizzazione di una serie di impianti di idrogeno verde su larga scala per una totalità di 500 MW, con una produzione di circa 0,5 milioni di tonnellate all'anno. Secondo quanto dichiarato nel piano REPowerEU l'Unione Europea mira invece, entro il 2030, a produrre 10 milioni di tonnellate di idrogeno rinnovabile in maniera autonoma e di importarne altri 10 milioni.

Per quanto concerne gli altri elementi costituenti il sistema delle HRS, assume notevole importanza lo stoccaggio dell'idrogeno. Questo viene realizzato principalmente mediante due tecniche:

- Unità di stoccaggio di idrogeno liquido (LH₂): Sono realizzate mediante recipienti in pressione speciali che rendono possibile il mantenimento dell'idrogeno liquido ad una temperatura molto bassa e l'isolamento ottimale da apporti di calore esterni. Le pressioni di esercizio sono solitamente variabili tra i 4 e gli 8 bar. Esistono anche soluzioni mobili.
- Unità di stoccaggio di idrogeno gassoso (GH₂): Consistono in serbatoi in pressione caratterizzati da pressioni di esercizio molto più elevate, solitamente comprese tra i 200 e i 1000 bar. Esistono anche soluzioni mobili.

Altri elementi tipicamente presenti, che non verranno ulteriormente approfonditi dal punto di vista del funzionamento, sono:

- Compressore;
- Gruppo di riduzione pressione;
- Refrigeratore;
- Polmone di bilanciamento;
- Dispenser;

- Sistemi di sicurezza.

Le informazioni inerenti alla configurazione delle stazioni di rifornimento sono riscontrabili nel volume *Hydrogen: Installations for delivery of hydrogen to road vehicles* facente parte di una serie di pubblicazioni ad opera del team PGS 35, composto da vari enti di valenza internazionale.

I principali produttori globali risultano invece essere i seguenti [15]:

- Air Liquide;
- Air Products;
- Ataway Hydrogen;
- Calvera;
- Fronius;
- Fuel Cell System Ltd;
- Haskel;
- Hydrogen Refueling Solutions;
- Linde;
- Logan Energy;
- Maximator Hydrogen;
- McPhy;
- NanoSUN;
- Nel;
- PDC;
- OneH2;
- Sera Group;
- WEH.

1.3 Sviluppo e diffusione nel contesto nazionale ed internazionale

Lo sviluppo e la conseguente diffusione delle HRS sono cresciuti in maniera significativa in diverse regioni del mondo, facendole divenire una realtà via via più affermata all'interno del settore dei trasporti. Infatti, come già anticipato, sono diversi i Paesi che hanno deciso di investire con forza nella costruzione di questo tipo di impianti, sviluppando strategie annuali o pluriannuali realizzate da comitati specifici e mirate alla realizzazione di una rete di strutture in grado di supportare la transizione verso una mobilità meno impattante. Tale andamento risulta essere fortemente più evidente in alcuni Paesi rispetto ad altri, creando un forte sbilanciamento della presenza di HRS sul territorio globale; Cina, Corea del Sud, America del Nord, Unione Europea, Giappone, Australia e Regno Unito rappresentano al momento le realtà più consistenti, pur presentando anche tra di esse differenze marcate nello stato di avanzamento del progetto. In questo momento le stazioni di rifornimento esistenti sono 1160, situate in soli 45 Paesi [16]. Nelle figure seguenti viene riportata la distribuzione delle HRS sul territorio internazionale, mostrando le sole regioni nelle quali risulti presente almeno una stazione.

○ In Operation 🇬🇧 ○ Planned 🇯🇵 ○ Old Projects 🇮🇹

Figura 5: Legenda delle HRS, che si dividono in “in attività”, “programmate” e “progetti abbandonati” [17]



Figura 6: Distribuzione delle HRS in Europa [17]



Figura 7: Distribuzione delle HRS in Asia [17]

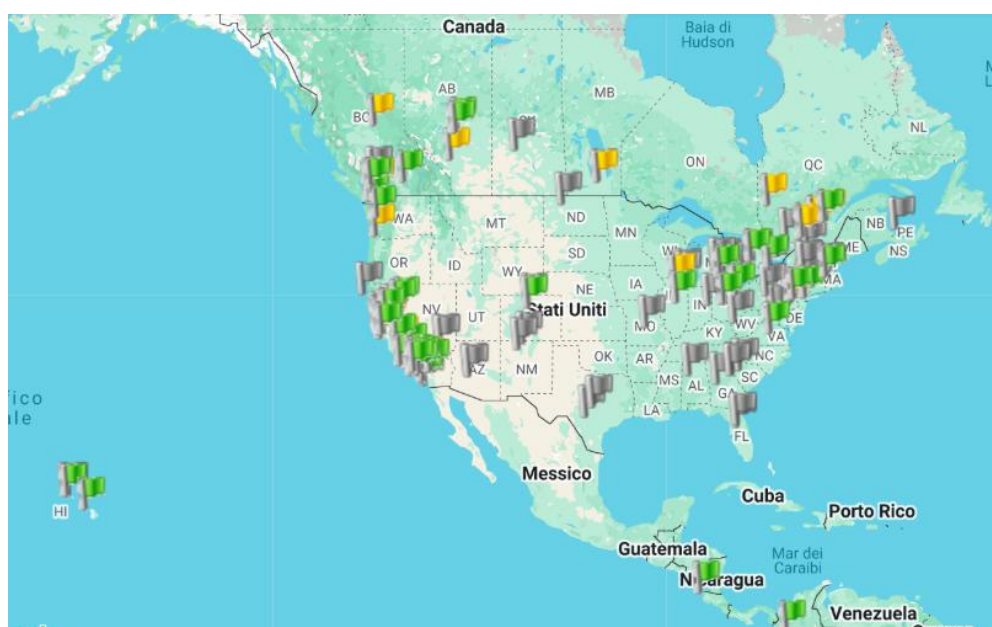


Figura 8: Distribuzione delle HRS in Nord America e America Centrale [17]



Figura 9: Distribuzione delle HRS in Oceania [17]

La Cina rappresenta ad oggi la Nazione trainante con 384 impianti già esistenti e l'ambizioso obiettivo dichiarato di realizzarne altre 800 entro la fine del 2025, così da avere una rete costituita da più elementi di quelli attualmente presenti nelle restanti regioni del mondo [13] [15]. In Asia non solamente la Cina punta con convinzione sullo sviluppo delle HRS, ma anche Corea del Sud e Giappone si presentano come realtà di punta dello scenario internazionale, rispettivamente con 198 e 161 HRS già presenti sul territorio nazionale. In Corea del Sud lo sviluppo risulta fortemente incoraggiato dalle autorità statali e dalla grande industria, grazie soprattutto alla presenza della Hyundai Motor Company, casa automobilistica sudcoreana che si sta distinguendo da anni per gli ampi investimenti sulle tecnologie legate all'idrogeno. I piani statali hanno fissato gli obiettivi per i prossimi anni in termini di numero di stazioni: 600 unità nel 2030 e 1200 nel 2040; tali valori porterebbero la Nazione asiatica ad essere un punto di riferimento nello scenario energetico mondiale, ancor più rispetto ad ora [19]. Il Giappone, spinto anch'esso dai forti investimenti per la transizione energetica nel campo automobilistico, legati prevalentemente alla Toyota Motor Corporation, mira ad aumentare la diffusione delle HRS sul territorio nazionale fino ad arrivare alle 900 unità entro il 2030 [20].

Risulta ben diversa la situazione in Nord America in termini di unità presenti, con le 89 HRS ad oggi attive negli Stati Uniti d'America (di cui gran parte situate in California) e le 12 operative in Canada; per quanto concerne i progetti in fase di pianificazione e realizzazione si hanno invece 20 impianti in costruzione negli USA e 10 cantieri avviati in Canada [13] [18]. I numeri restano simili parlando di Paesi europei, tra i quali spicca la Germania con una fitta rete costituita da 70 punti di rifornimento pienamente operativi e 20 ulteriori in fase di progetto, sviluppo o test. A seguire vanno citate la Francia, con le sue 29 stazioni (di cui 19 operative), i Paesi Bassi, con 18 operative e 7 pianificate, e la Svizzera con 18 operative e 1 pianificata. Il Regno Unito, al momento provvisto di 7 HRS attive, sta puntando con decisione sullo sviluppo di tale tecnologia mediante piani nazionali mirati all'incremento della diffusione delle stazioni su tutto il territorio [22]. L'Australia rappresenta anch'essa una realtà in forte sviluppo con 15 HRS operative e 5 pianificate [23]. Va sottolineato come solo una minima parte, indicativamente inferiore al 10%, delle stazioni ad oggi operative sono HRS onsite, mentre la restante percentuale è rappresentata da stazioni offsite che sfruttano l'idrogeno prodotto in altri siti, tipicamente mediante SMR. Nonostante ciò, i progetti futuri mirano a sovvertire tale andamento incrementando lo sviluppo di impianti che siano in grado di provvedere autonomamente alla produzione e all'immagazzinamento dell'idrogeno destinato al rifornimento,

puntando in particolare sull'elettrolisi e sull'associazione a fonti energetiche rinnovabili. Al momento, da questo punto di vista, i Paesi maggiormente avanti risultano essere la Francia, i Paesi Bassi e l'Australia; quest'ultima risulta persino caratterizzata da una maggior presenza di impianti con produzione in sito rispetto a quelli dislocati [23]. Nella *Tabella 2* vengono riportati in maniera ordinata e sintetica i dati finora presentati.

Paese	n° HRS	Prevalenza	Progetti futuri
Cina	384	Offsite	1200 entro fine 2025
Corea del Sud	198	Offsite	600 nel 2030 e 1200 nel 2040
Giappone	161	Offsite	900 nel 2030
USA	89	Offsite	20 impianti in costruzione
Canada	12	Offsite	10 cantieri avviati
Germania	70	Offsite	20 in fase di sviluppo
Francia	19	Offsite	10 in fase di sviluppo
Paesi Bassi	18	Offsite	7 stazioni pianificate
Svizzera	18	Offsite	1 stazione pianificata
Regno Unito	7	Offsite	Investimenti crescenti
Australia	15	Onsite	5 stazioni pianificate

Tabella 2: HRS presenti nei principali Paesi del mondo e panorami futuri

Tra le numerose realtà presenti nel mondo, si riporta di seguito una serie di quattro impianti scelti in quanto rappresentativi dell'evoluzione della filiera dell'idrogeno su scala globale:

- Stazione Hypower - *Hydrogen Energy Demonstration Zone* di Pechino, Cina: HRS Onsite inaugurata nel 2021 che ad oggi rappresenta il più grande impianto di questa tipologia. Fa affidamento sulla produzione in loco di diverse tonnellate di idrogeno al giorno per soddisfare il rifornimento di circa 500 veicoli, eseguito mediante 8 dispenser disponibili sulla pianta. L'impianto fa parte di un vasto hub che ospita più di cento aziende operanti nel settore dell'idrogeno e fornisce

rifornimento ad autobus utilizzati nel servizio pubblico, mezzi per i servizi cittadini e FCEVs privati.

- Stazione H2 Mobility – Düsseldorf, Germania: Inaugurata nel Giugno 2025 da H2 Mobility in collaborazione con altre aziende locali, al momento rappresenta la più grande stazione di rifornimento in Europa. Può immagazzinare fino a 5 tonnellate di idrogeno compresso ed è dotata di tre dispenser (700 bar, 500 bar e 350 bar) in grado di operare simultaneamente senza cali di efficienza. Al momento non è in grado di provvedere in loco alla produzione, ma entro il 2026 sarà reso operativo nell'impianto un elettrolizzatore da 2 MW che sfrutterà l'energia elettrica prodotta dal termovalorizzatore presente nella zona, dando vita ad un ciclo energetico virtuoso.
- CMB.TECH *Multimodal Hydrogen Station* - Anversa, Belgio: La stazione di rifornimento in questione, realizzata dall'azienda belga CMB.TECH, è operativa dal 2021 nel porto della città di Anversa. Rappresenta un perfetto esempio della versatilità dell'idrogeno come vettore energetico, offrendo il rifornimento di mezzi terrestri e marittimi grazie a dispositivi di ricarica diversificati e a sistemi di compressione che permettono di raggiungere pressioni di 950 bar. La produzione viene realizzata in loco mediante un elettrolizzatore PEM da 1.2 MW capace di generare 450 kg di idrogeno al giorno sfruttando energia elettrica derivante da fonti rinnovabili.
- *Toyota Long Beach Tri-Gen & Heavy-Duty HRS* - Porto di Long Beach, California (USA): Fiore all'occhiello del processo di sviluppo della filiera dell'idrogeno che sta avendo luogo in California, che ad oggi ospita la gran parte delle HRS statunitensi. Nato dalla sinergia tra Toyota e FuelCell Energy, l'impianto presenta un sistema trigenerativo in grado di produrre idrogeno, elettricità ed acqua utilizzabile sfruttando biogas derivato dalle vicine discariche. L'idrogeno prodotto (circa 1200 kg/giorno) viene inviato ad una stazione di rifornimento adiacente, gestita da Shell, adibita al servizio di mezzi pesanti e veicoli leggeri.

Le informazioni riportate sono state tratte direttamente dai siti di riferimento degli impianti citati.

L'Italia al momento risulta essere molto indietro rispetto ai principali attori globali in termini di sviluppo delle infrastrutture legate all'idrogeno, ma il divario si sta riducendo

grazie alle politiche recentemente adottate e ai piani di sviluppo messi in atto. Ad oggi sul territorio italiano sono presenti tre HRS pienamente operative:

- Bolzano (Trentino Alto-Adige): Primo impianto italiano di questo genere, è stato inaugurato e reso attivo da IIT Hydrogen nel 2014, promuovendolo di fatto a impianto pilota. La produzione avviene in loco mediante tre elettrolizzatori modulari da 180 Nm³/h che sfruttano l'energia derivante da fonti idroelettriche, mentre lo stoccaggio viene realizzato in forma gassosa. La stazione è aperta al pubblico ed è in grado di rifornire sia veicoli leggeri che mezzi pesanti [24].



Figura 10: HRS Onsite di Bolzano [25]

- Venezia Mestre (Veneto): Stazione offsite inaugurata da ENI nel 2022 in grado di erogare più di 100 kg/giorno; l'obiettivo per i prossimi anni è quello di trasformarla in una HRS Onsite [26].



Figura 11: HRS Offsite di Venezia Mestre

- Carugate Est (Milano, Lombardia): Impianto reso attivo il 30 Giugno 2025, realizzato da FNM nell'ambito del più ampio progetto "SerraH2 Valle". La

stazione è in grado di rifornire veicoli leggeri a 700 bar e mezzi pesanti a 350 bar [27].



Figura 12: HRS di Carugate Est

Secondo i piani approvati, nei prossimi anni il numero di stazioni in Italia crescerà rapidamente. Al momento risultano infatti approvati i progetti di 36 stazioni distribuite su tutta la penisola, per alcune delle quali l'obiettivo è quello di raggiungere la piena operatività entro la fine del 2026. Il cambio di passo è stato fortemente sostenuto dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) che ha permesso di ottenere ampi co-finanziamenti pubblici per i progetti citati, per un totale di 103.5 milioni di euro investiti. Le nuove stazioni, come visibile in *Figura 11*, saranno dislocate su undici regioni italiane, concentrandosi prevalentemente in corrispondenza dei principali snodi autostradali. I progetti verranno portati avanti da alcune delle aziende più note del campo energetico, come ENI, Snam, Edison e Q8 [28].



Figura 13: Infografica delle 36 stazioni delle quali risultano già approvati i progetti [28]

1.4 Riferimenti normativi e standard per la sicurezza degli impianti a idrogeno

Data la diffusione sempre più vasta degli impianti di produzione e rifornimento su scala mondiale e le particolari caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno, la pericolosità delle quali è già stata ampiamente discussa nella sezione 1.1, risulta evidente come sia stato necessario uno sviluppo altrettanto rapido ed efficiente di normative e standard (regionali, nazionali, internazionali) che fossero in grado di garantire una realizzazione e una gestione di questo tipo di impianti rispettose della sicurezza della collettività. La vasta mole di documenti di regolamentazione già esistente, concentrata sulla supervisione di impianti di produzione industriale e materiali pericolosi, non sarebbe risultata infatti pienamente adeguata alla gestione di un fenomeno tanto innovativo, che introduce necessariamente nuovi rischi e nuove dinamiche, spesso più complesse di quelle precedentemente note. A fronte di ciò, la gran parte dei Paesi interessati dall'incremento del numero di HRS si sono concentrati, singolarmente o in collaborazione tra di essi, sulla stesura della documentazione necessaria.

In Italia il principale riferimento è rappresentato dal Decreto del Ministero dell'interno del 7 Luglio 2023, entrato in vigore il 20 Agosto 2023, il quale concentra le proprie attenzioni sulla prevenzione incendi rivolta specificatamente agli impianti di produzione di idrogeno tramite elettrolisi e ai relativi sistemi di stoccaggio. Il DM in questione definisce con accuratezza metodologie di analisi del rischio e misure di sicurezza antincendio per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio di tali impianti, permettendo di raggiungere l'uniformità nazionale sulle tecniche impiegate nello sviluppo di questo tipo di realtà impiantistiche. Al suo interno sono presenti anche richiami a riferimenti preesistenti in materia di prevenzione incendi, come il Decreto del Presidente della Repubblica del 1° agosto 2011 n.151, che elenca le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi, e il Decreto Ministeriale del 3 Agosto 2015, noto ai più come *Codice di Prevenzione Incendi* [29]. Più nello specifico le stazioni di rifornimento ad idrogeno sono state regolamentate mediante l'emanazione del Decreto del Ministero dell'interno del 23 Ottobre 2018, il quale ha permesso di ottenere un quadro normativo che consentisse la realizzazione in sicurezza delle stazioni in oggetto, integrandosi ovviamente con le disposizioni degli altri documenti citati. Grazie a tali emanazioni, l'Italia si è posta tra le figure di riferimento nella regolamentazione e standardizzazione

nel campo dell'idrogeno, rappresentando uno dei Paesi più avanti nello sviluppo di normative ad hoc [29].

Negli Stati Uniti d'America le misure di controllo e la sicurezza nell'ambito dell'idrogeno si basano principalmente su una norma tecnica volontaria denominata *NFPA 2 – Hydrogen Technologies Code*, redatta dalla National Fire Protection Association nel 2011 e aggiornata più volte nel corso degli ultimi anni (per ultimo nel 2023). Il codice in questione aspira ad essere un riferimento per le diverse figure che gravitano attorno al mondo della lavorazione e distribuzione dell'idrogeno, fornendo direttive chiave per la produzione, l'installazione, lo stoccaggio, il trasporto, l'uso e la manipolazione dell'idrogeno sia in forma gassosa (GH₂) che liquida (LH₂). Viene parimenti seguita anche una normativa federale obbligatoria emanata dall'Occupational Safety and Health Administration, indicata come 29 CFR 1910.103 e intitolata *Hydrogen*. Questa riporta direttive tendenzialmente più conservative, non essendo stata aggiornata nel tempo con accuratezza [30]. Per gli USA va inoltre citata l'iniziativa *Hydrogen Shot* lanciata nel 2021 dal Dipartimento di Energia (DOE), la quale si proponeva di migliorare l'intero apparato produttivo, normativo e gestionale del “sistema idrogeno” fino ad ottenere una vorticiosa diminuzione dei costi, portandolo ad 1 euro al kg il prezzo entro il 2031. Pur prevedendo maggiormente direttive economiche, il programma indicava anche strategie di riferimento per lo sviluppo dei codici di sicurezza, delle tecniche di prevenzione e delle modalità di formazione degli addetti del campo.

In Canada standard ad hoc sono stati creati mediante il CSA Group (Canadian Standards Association). Ad oggi il codice di riferimento per le installazioni ad idrogeno su scala nazionale è il “*Canadian Hydrogen Installation Code*” (CHIC), aggiornato al 2022; non ha ancora una valenza federale, ma definisce con accuratezza requisiti e direttive per l'installazione e l'impiego delle apparecchiature necessarie alla produzione e alla distribuzione dell'idrogeno. Oltre al codice già citato, il CSA Group ha introdotto l'idrogeno anche in normative sulla sicurezza preesistenti ed ha emanato standard più specifici per le varie fasi del processo di gestione. Riferimenti dettagliati su ognuno degli standard introdotti sono consultabili sul sito del gruppo.

La Corea del Sud, al fine di sostenere lo sviluppo di una filiera sicura, ha dato vita nel 2020 ad una legge nazionale, denominata *Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Act*, che mira a garantire l'integrazione sociale dei sistemi di produzione e distribuzione dell'idrogeno, promuovendo una crescita sicura e controllata

mediante la stesura di normative di riferimento; il provvedimento citato è entrato in vigore ad inizio 2021. Nel 2022, in occasione di un aggiornamento della legge, è stata istituito un sistema di certificazione per l'idrogeno pulito che permette di valutare accuratamente la qualità delle fasi di produzione in base alle emissioni di CO₂ e che prevede conseguentemente incentivi per chi produce o impiega idrogeno "verde". Tale quadro legislativo rappresenta uno dei più avanzati nello scenario mondiale, integrando la sicurezza nelle misure atte a promuovere lo sviluppo della filiera [31].

In Giappone per molti anni si è fatto affidamento sull'*High Pressure Gas Safety Act*, ossia la legge sulla sicurezza dei gas ad alta pressione gestita dal Ministero dell'Economia, Commercio e Industria (METI). Negli ultimi tempi però, data la maggiore diffusione delle realtà legate all'idrogeno e la volontà di espanderne ancora l'impiego, è stata individuata la necessità di redigere normative e standard in grado di gestire maggiormente nel dettaglio gli aspetti legati alla sicurezza nel trattamento di tale sostanza. A tal fine, nel 2022, è stato istituito un gruppo di lavoro specializzato per lo sviluppo di una strategia di sicurezza dell'idrogeno (*Hydrogen Safety Strategy*), l'obiettivo del quale è stato quello di individuare le direttive fondamentali per garantire la minimizzazione dei rischi possibili. Coerentemente a queste volontà, nel 2023 il METI ha anche realizzato un portale web dedicato alla raccolta di dati e analisi inerenti alla sicurezza nel campo dell'idrogeno [32].

Essendo, come già detto, una volontà globale quella di promuovere l'utilizzo dell'idrogeno in diverse applicazioni del campo energetico, i vari enti nazionali hanno deciso di collaborare strettamente negli ultimi anni per lo sviluppo di normative e standard internazionali, i quali faciliterebbero la standardizzazione della produzione delle apparecchiature e degli altri sistemi necessari comportando conseguentemente una diminuzione dei costi e un aumento delle garanzie. Ne sono un esempio la collaborazione tra Giappone e Unione Europea, che hanno siglato nel 2023 un Memorandum of Cooperation nell'ambito dell'idrogeno, ma anche quella tra Corea del Sud e alcuni Paesi europei, che vede un costante scambio di informazioni e dati. Il prodotto più consistente della collaborazione internazionale risultano essere ovviamente gli standard tecnici stilati, come la serie ISO 19880, la quale racchiude una serie di direttive destinate alle stazioni di rifornimento di idrogeno. La ISO 19880-1:2020, in particolare, è riferita alle HRS che gestiscono idrogeno in forma gassosa e forniscono i veicoli a celle a combustibile; questa è stata largamente adottata integrandola con le normative nazionali, come avvenuto in Italia, dove viene richiamata come UNI ISO 19880-1:2020. Un altro standard internazionale di rilevanza è la ISO 22734, intitolata *Hydrogen generators using water*

electrolysis e riferita appunto al controllo delle apparecchiature necessarie per la produzione di idrogeno mediante elettrolisi. Per quanto concerne i Sistemi Strumentati di Sicurezza (SIS) destinati alla salvaguardia degli impianti è stato sviluppato uno standard internazionale di riferimento, denominato IEC 61511. Altri riferimenti citabili che trattano nello specifico apparecchiature differenti presenti negli impianti di produzione e rifornimento di idrogeno sono:

- ISO 14687: sottoscrive requisiti di purezza per la classificazione dell'idrogeno;
- ISO 19880-3: si concentra su componenti come tubazioni e giunti facenti parte degli impianti [33].

2. Il ruolo dell'analisi del rischio

Ad oggi il tema della sicurezza rappresenta un aspetto cruciale in ogni campo del contesto produttivo e non riguarda dunque solamente i sistemi legati all'idrogeno, seppur costituisca in particolare per essi un delicato nodo per l'avanzamento tecnologico e la diffusione degli impianti. A partire dalla seconda metà del secolo scorso si è infatti assistito ad un evidente aumento dell'attenzione nei confronti della necessità di realizzare processi produttivi (e conseguentemente impianti) che risultassero sicuri per la salvaguardia delle vite umane e del benessere ambientale, mantenendo gli obiettivi preposti in termini di capacità produttive e introducendo nel contempo la volontà di raggiungerli mediante sistemi che fossero efficaci anche nell'assicurare la dovuta protezione agli elementi coinvolti. Ciò, al momento, risulta fortemente supportato dalla continua evoluzione di strumenti, fisici e non, che permettono di monitorare, studiare, analizzare e prevedere il funzionamento dei processi, così da poterne preventivamente o successivamente migliorare i tratti che risultino essere maggiormente pericolosi e deleteri per il raggiungimento degli standard di sicurezza desiderati. I progressi realizzati negli ultimi decenni sono stati possibili grazie alla stretta collaborazione tra il mondo scientifico e quello aziendale, con un continuo lavoro di interscambio che ha permesso di coniugare studio, progettazione ed applicazione.

Nel contesto appena descritto il ruolo dell'analisi del rischio si è affermato con convinzione come strumento utile alla definizione preventiva dei maggiori pericoli derivanti dai processi interessati, permettendo così di individuare gli aspetti maggiormente critici e di prendere conseguentemente le dovute precauzioni.

2.1 Inquadramento teorico

La valutazione del rischio ha avuto origine dalla volontà di identificare gli eventi accidentali derivanti da comportamenti inaspettati e fuori controllo del sistema analizzato, a loro volta causati da diversi possibili fattori, dal malfunzionamento tecnico all'errore umano. L'analisi permette dunque di valutare l'impatto di possibili funzionamenti anomali del sistema sul contesto nel quale è inserito, così da poter successivamente realizzare le opportune valutazioni sulla fattibilità dei processi; tale approccio può essere applicato a diversi contesti appartenenti all'ambito produttivo ed energetico, come

impianti di stoccaggio, sistemi di trasporto e impianti produttivi. In questi casi, l'attenzione dell'analisi si concentra spesso su due fenomeni in particolare: l'intenso e incontrollato rilascio di energia (nel caso, ad esempio, di esplosioni o incendi) e la dispersione involontaria di sostanze pericolose.

Si specifica che le informazioni e i concetti riportati in questa sezione della trattazione sono state tratte dalle dispense del corso di Analisi del rischio (Ingegneria Energetica, Politecnico di Torino) realizzate dal Prof. Andrea Carpignano, come indicato dai riferimenti bibliografici riportati nel corso dell'esposizione.

Generalmente la valutazione del rischio si sviluppa sulla base di alcuni step fondamentali, quali:

- Previsione e individuazione dei possibili malfunzionamenti del sistema;
- Identificazione delle conseguenze e dell'impatto sul contesto circostante (persone, strutture, ambiente);
- Stima del rischio e valutazione della sua accettabilità;
- Progettazione teorica di misure preventive o mitigative proporzionali al rischio identificato.

Ogni passaggio di tale metodologia richiede delle tecniche specifiche, le quali nel tempo sono state sviluppate e migliorate al fine di garantire stime sempre più accurate. Procedendo in questa maniera, per ogni sistema sottoposto ad analisi è possibile quantificare e identificare il numero e l'importanza dei possibili pericoli e conseguentemente realizzare le valutazioni desiderate in merito alla fattibilità e alla rischiosità di determinati processi [34].

Al fine di rendere maggiormente chiara la trattazione, si riportano di seguito le definizioni di alcuni concetti che verranno riproposti con cadenza elevata nel prosieguo dell'esposizione [34]:

- Probabilità di accadimento: Misurata solitamente come una frequenza [eventi/anno], rappresenta la possibilità che un evento dannoso possa accadere durante un determinato periodo analizzato. All'interno della trattazione verrà spesso richiamata come frequenza di accadimento o tasso di occorrenza.
- Danno: Rappresenta l'impatto dell'evento accidentale sul contesto coinvolto, sia esso costituito da persone, strutture, ambiente o immagine aziendale. Può essere

misurato in maniera diversa in base al contesto applicativo, ad esempio mediante il numero di vittime, il numero di strutture coinvolte o la perdita economica.

- **Rischio:** Si origina dalla combinazione tra la probabilità di accadimento di un determinato evento e la gravità del suo conseguente impatto. Si divide generalmente in tre categorie maggiormente specifiche, quali:
 - **Rischi convenzionali:** legati alla normale attività del processo, sono caratterizzati da un'elevata probabilità di accadimento ma da una pericolosità fortemente ridotta se non nulla.
 - **Rischi specifici:** legati principalmente a particolari tipi di materiali o processi considerati intrinsecamente pericolosi, sono caratterizzati anch'essi da probabilità elevata ma da danni ridotti;
 - **Rischi rilevanti:** derivanti da funzionamenti anomali e caratterizzati da danni molto impattanti e una frequenza di accadimento ridotta.

Data una definizione preliminare del concetto di rischio risulta possibile riportare di seguito una rappresentazione grafica della curva F-N che mostra il rischio stesso come funzione della probabilità di accadimento e del danno potenziale. Si riportano sul grafico le tre tipologie di rischio appena presentate.

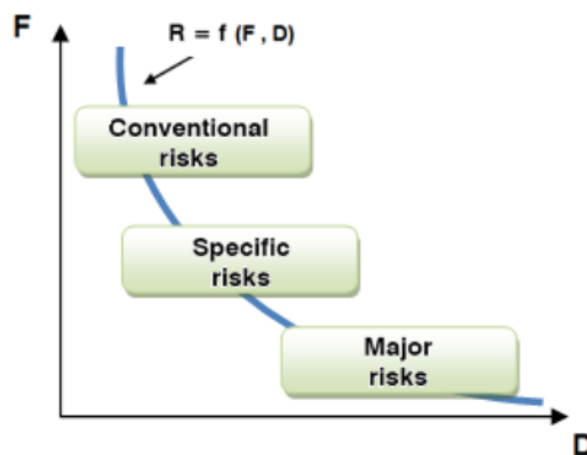


Figura 14: Curva F-N e rappresentazione su di essa delle tre categorie di rischio presentate [34]

Il rischio si determina dunque per ogni scenario accidentale come il prodotto tra la probabilità di accadimento e il danno ottenuto, come mostrato nella seguente relazione, comunemente denominata *risk equation*.

$$R_{scenario} \left[\frac{\text{danno}}{\text{anno}} \right] = F \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] \cdot D \left[\frac{\text{danno}}{\text{evento}} \right]$$

Il fattore F va interpretato come il tasso di occorrenza durante un anno e non implica che l'evento si ripresenti F volte in ogni anno. La misura dell'impatto D può essere realizzata, come già detto, in diverse maniere, a seconda del contesto dell'analisi. L'elemento "danno" inserito nell'equazione può rappresentare morti, infortuni, perdite, ecc. Il rischio totale per un determinato processo sarà dunque dato dalla somma tra i rischi relativi ai vari scenari costituenti il processo stesso [34].

$$R_{tot} = \sum_{scenari} R$$

Risulta interessante notare che la percezione del rischio da parte della collettività non è la stessa per ogni tipologia di evento, ma risulta piuttosto accentuata per quanto concerne i rischi caratterizzati da un impatto maggiore, mentre risulta mitigata per gli eventi contraddistinti da una maggiore probabilità di accadimento, seppur questi abbiano nel complesso lo stesso rischio totale. A fronte di ciò in alcuni Paesi è pratica comune considerare una leggera modifica dell'equazione del rischio, espressa come segue:

$$R = F \cdot D^k \quad \text{con } k > 1$$

L'esponente k tiene conto della maggiore influenza dell'impatto sulla percezione collettiva; in Olanda, ad esempio, viene assunto pari a 2 [34].

Un'ulteriore suddivisione utile alla piena comprensione del concetto di rischio è quella tra rischio sociale (SR, *Social Risk*) e rischio individuale (IR, *Individual Risk*). Ci si riferisce al primo quando l'attenzione dell'analisi è concentrata sulla sorgente del pericolo e la volontà è quella di determinare il rischio per la collettività derivante da una determinata attività. Il secondo si riferisce invece al singolo individuo e mostra il possibile danno subito da quest'ultimo; viene pertanto espresso come un rischio pro capite e può essere determinato a partire dal precedente suddividendolo per il numero di persone costituenti la collettività di cui si è tenuto conto nella valutazione [34].

Risulta ora possibile presentare i due approcci nei quali si divide l'analisi del rischio; questi sono: valutazione qualitativa e valutazione quantitativa. La prima metodologia viene solitamente impiegata come approccio preliminare al fine di individuare gli eventi sui quali sarà necessario porre maggiore attenzione. Essa non richiede la disponibilità di dati numerici e si presta dunque principalmente ad impieghi nei quali risultano carenti le informazioni a disposizione. Tale approccio si dimostra inoltre maggiormente rapido, andando ad affibbiare ad ognuno degli eventi analizzati degli indici qualitativi al fine di

classificarne la probabilità di accadimento e l'influenza in termini d'impatto. Si riporta nella figura seguente un esempio dell'impiego degli indici applicato al tasso di occorrenza di un evento dannoso.

LIKELIHOOD	
Index	Description
1	Event not expected during the life of the system
2	Event expected at the most once during life of the system
3	Event expected a few times in the life of the system, less than once every 5 years
4	Frequent event, expected more than once every 5 years

Figura 15: Indici qualitativi impiegati nella valutazione della probabilità di un evento [34]

Come già detto, gli indici possono essere impiegati allo stesso modo per la valutazione dell'impatto di un determinato evento, il più delle volte dividendo i diversi ambiti sui quali influisce l'evento stesso, come salute delle persone, ambiente e reputazione dell'azienda; in ognuno di questi ambiti gli indici avranno dei significati differenti. Si riporta di seguito a titolo d'esempio la tabella contenente gli indici riferiti all'impatto sulla salute delle persone coinvolte.

SAFETY AND HEALTH	
Index	Description
1	No people affected
2	Minor injury that will be cured at most in one week
3	Serious injury that will be cured at most in two months
4	Permanent injuries or deaths

Figura 16: Indici qualitativi impiegati nella valutazione dell'impatto di un evento sulla salute [34]

Tali indici, pur rappresentando un mezzo semplice e rapido per la classificazione dei rischi, presentano evidenti limitazioni legate al fatto di non essere considerabili degli strumenti di valutazione assoluti ed oggettivi e conseguentemente di non permettere la definizione di un criterio definitivo per l'accettazione o il rifiuto di un determinato rischio.

L'impiego degli indici qualitativi permette di costruire le cosiddette matrici di rischio, le quali derivano dalla possibilità di catalogare un determinato evento sulla base della probabilità di accadimento e del danno potenziale, opportunamente quantificati mediante gli indici stessi. Le matrici così generate permettono di individuare qualitativamente gli eventi ritenibili accettabili e quelli che necessitano una valutazione maggiormente dettagliata. Si riporta di seguito la matrice relativa alla valutazione del rischio per la

salute, la quale risulta divisa in tre zone cromaticamente distinte utili alla catalogazione degli eventi.

SAFETY AND HEALTH				
4				
3				
2				
1				
L D	1	2	3	4

Figura 17: Matrice di rischio relativa alla salute e alla sicurezza delle persone [34]

In particolare, nell'immagine proposta, le diverse zone corrispondono a:

- Zona di non accettabilità, in rosso: Vi ricadono gli eventi considerati non accettabili e che pertanto richiedono prontamente un intervento di modifica prima di poter iniziare o riprendere l'attività analizzata.
- Zona ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), in giallo: Vi ricadono gli eventi che suggeriscono di attuare le modifiche possibili nei limiti della convenienza.
- Zona di accettabilità, in verde: Vi ricadono i rischi accettabili, non è necessario attuare alcun cambiamento [34].

L'analisi del rischio quantitativa (QRA, *Quantitative Risk Assessment*) risulta essere maggiormente complessa e costosa della precedente, ma permette di ottenere risultati oggettivi sotto forma di stime numeriche mediante l'impiego di vari strumenti che consentono di avere risultati quantitativi relativi alle probabilità di accadimento e alle conseguenze degli eventi accidentali sottoposti alla valutazione. Tali tecniche sono basate sulla disponibilità di dati di input e l'accuratezza dei risultati dell'analisi dipenderà fortemente dall'affidabilità dei dati inizialmente considerati. La considerevole importanza della QRA è data dal fatto che essa permette di ottenere indicatori confrontabili con valori guida per la definizione della tollerabilità del rischio in esame [34].

La quantificazione del rischio risulta dunque essere uno strumento cruciale nella fase decisionale in quanto permette di confrontare gli effetti delle modifiche attuate sulla base

del rischio o, nel caso in cui modifiche non siano ancora state realizzate, di valutare la tollerabilità del rischio stesso così da pianificare le eventuali precauzioni necessarie.

Per quanto concerne il *Social risk*, ad oggi un numero sempre più vasto di Paesi adotta delle soglie di accettabilità ben definite, come mostrato nella figura seguente:

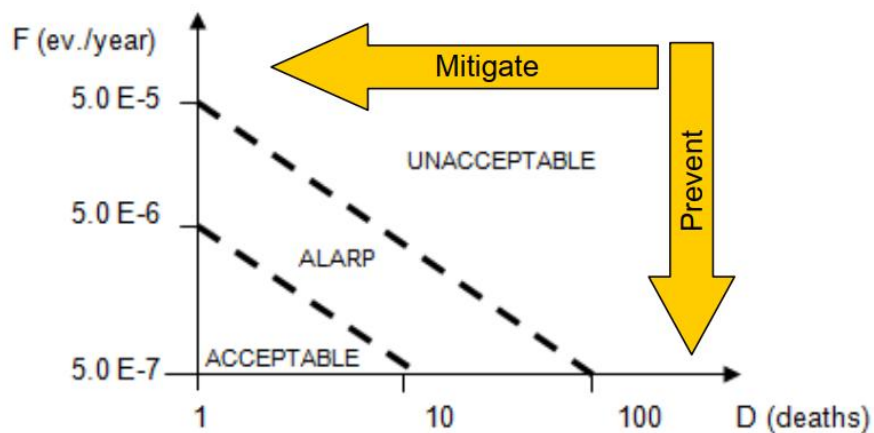


Figura 18: Soglie di accettabilità per il rischio sociale ed effetto delle misure correttive [34]

Ogni evento accidentale rappresenta un punto all'interno del diagramma, cadendo in una delle tre zone individuate, il significato delle quali è già stato discusso. Se attuate, le misure preventive portano ad una diminuzione del tasso di occorrenza F , mentre le misure mitigative ad una riduzione dell'impatto dell'evento D . Solitamente tale diagramma viene impiegato per la valutazione della tollerabilità del rischio associato ad un sistema complesso, costituito dalla somma di più eventi e quindi graficamente rappresentato da una curva (*Risk curve*) [34]. Alcuni standard, come IEC 61508 e 61511, forniscono linee guida per evitare o mitigare i rischi in termini di frequenze e/o conseguenze. Inoltre, come già detto, sono diversi i Paesi che hanno definito dei criteri di tollerabilità accurati, mentre altri lasciano alle singole imprese la valutazione della fattibilità delle attività interessate. Per quanto riguarda il rischio individuale si riportano di seguito dei valori di soglia individuati da alcuni governi:

- Limite inferiore ALARP per un operatore nel Regno Unito: 1×10^{-5} ;
- Limite inferiore ALARP per la popolazione esterna nel Regno Unito: 1×10^{-6} ;
- Limite inferiore ALARP per la popolazione esterna nei Paesi Bassi: 1×10^{-8} ;
- Limite superiore ALARP per un operatore nel Regno Unito: 1×10^{-3} ;
- Limite superiore ALARP per la popolazione esterna nel Regno Unito: 1×10^{-4} ;
- Limite superiore ALARP per la popolazione esterna a Hong Kong: 1×10^{-5} ;

- Limite superiore ALARP per la popolazione esterna nei Paesi Bassi e nel Nuovo Galles del Sud (Australia): 1×10^{-6} [34].

Anche la normativa ISO 19880-1 riporta dei livelli di accettabilità per l'IR, corrispondenti a 10^{-6} eventi/anno per la popolazione civile e a 10^{-4} eventi/anno per gli addetti [10].

Definiti dunque alcuni dei concetti fondamentali per lo sviluppo di un'accurata analisi del rischio, risulta possibile esporre maggiormente nel dettaglio i passaggi chiave del processo, i quali vengono sinteticamente illustrati nella figura riportata di seguito, utile per una chiara comprensione dello sviluppo.

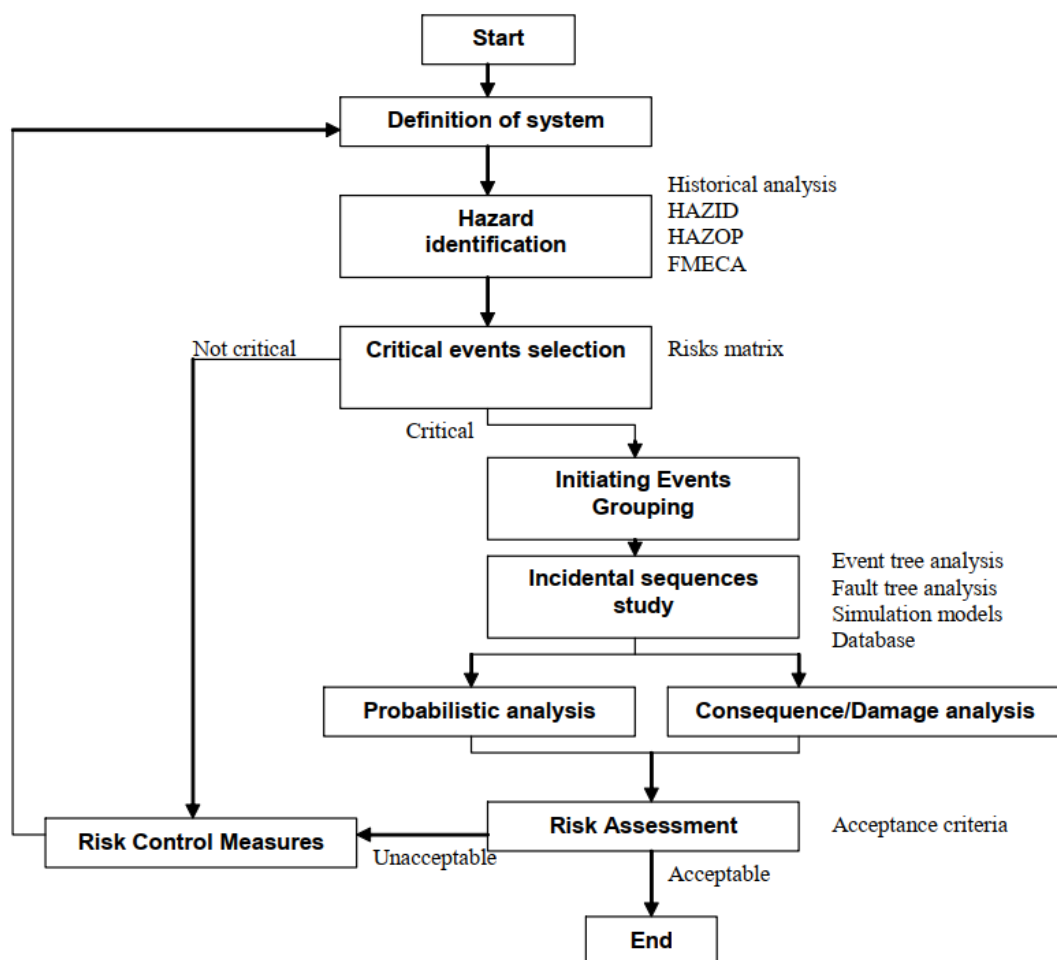


Figura 19: Fasi principali del processo di analisi del rischio [34]

Il processo di analisi ha inizio dalla meticolosa definizione del sistema scelto come soggetto dell'analisi, al fine di individuare e caratterizzare gli elementi che lo costituiscono, i quali potrebbero rappresentare fonti di rischio o comunque influire sullo sviluppo di fenomeni accidentali. Oltre al sistema, la fase di definizione preliminare deve coinvolgere anche l'analisi dell'ambiente nel quale esso risulta inserito e degli elementi

esterni che interagiscono con esso. A seguito di ciò è solito procedere con l'identificazione dei pericoli, la quale risulta cruciale per individuare gli eventi e le attività potenzialmente dannose, in quanto possibili fonti di eventi accidentali; tale fase consiste in un'analisi qualitativa che può essere realizzata mediante approcci differenti. Il primo di questi è rappresentato dall'analisi storica, la quale mira ad individuare le possibili problematiche mediante lo studio degli incidenti precedentemente accaduti in sistemi simili a quello interessato; l'impiego di tale tecnica è supportato dall'esistenza di numerosi database contenenti gli eventi accidentali che hanno avuto luogo nel corso della storia, permettendo così di avere un vasto numero di informazioni sulle quali basare la valutazione. A seguito del processo di sfruttamento dei dati pregressi per un inquadramento preliminare dei possibili pericoli, possono essere applicate tre metodologie per un'individuazione e una catalogazione più avanzata e affidabile, quali:

- HAZID (*Hazard Identification*): Approccio che consiste nella modellizzazione del sistema interessato in termini funzionali e conseguentemente nell'individuazione delle possibili deviazioni dalle funzioni previste. Ogni funzione principale viene suddivisa in funzioni maggiormente elementari, fino a permettere l'identificazione delle deviazioni principali, le quali potranno essere utilizzate come eventi iniziatori (IE, *Initiating Events*) nella QRA.
- HAZOP (*Hazard and Operability Study*): Approccio sistematico realizzato solitamente mediante un team multidisciplinare che permette di individuare gli eventi iniziatori di sequenze accidentali. Si concentra principalmente sulle operazioni e sui processi che hanno luogo nel sistema analizzato.
- FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*): Rappresenta un rafforzamento della tecnica FMEA, la quale consiste nell'individuazione delle possibili modalità di guasto dei componenti del sistema, concentrandosi dunque prioritariamente sull'apparecchiatura e non sul processo. La metodologia FMECA aggiunge a tale approccio la valutazione della criticità del possibile guasto, legata alla potenziale frequenza di accadimento e alla gravità dell'eventuale impatto.

Al termine di questa prima fase di identificazione dei pericoli si ottiene dunque una lista di eventi caratterizzati in maniera qualitativa da un determinato livello di rischio. In questo modo risulta possibile procedere andando ad applicare le migliori e più immediate per evitare o mitigare gli eventi meno critici e nel contempo si possono individuare gli

elementi che richiedono un'analisi maggiormente approfondita, con l'obiettivo di ottenere accurati risultati numerici [34].

Il processo di analisi prosegue quindi con il raggruppamento degli eventi critici in base alle loro caratteristiche simili, così da poter individuare per ciascun gruppo un evento scatenante di riferimento, il quale potrà essere a sua volta analizzato nel dettaglio. Relativamente a ciascun evento così individuato viene costruita una struttura logica (Albero degli eventi, *Event Tree*) mirata a rappresentare la sequenza accidentale che potrebbe scaturire dall'evento iniziatore. Se ne riporta una rappresentazione a titolo d'esempio nella figura seguente.

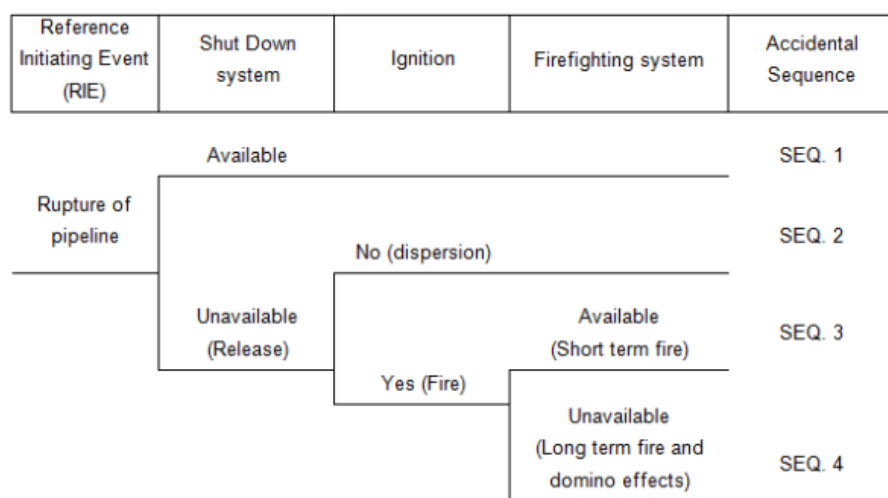


Figura 20: Struttura tipo di un albero degli eventi [34]

L'albero così costruito riporta al suo interno tutti i possibili scenari che potrebbero insorgere a partire dall'evento iniziatore al verificarsi o meno di alcune condizioni (ad esempio in base al funzionamento degli strumenti di mitigazione); noti gli scenari accidentali, risulta possibile caratterizzarli mediante la determinazione delle probabilità di occorrenza e dei danni consequenziali [34].

Per ogni sequenza accidentale la frequenza finale può essere determinata a partire dal tasso di occorrenza dell'evento scatenante tenendo conto delle probabilità degli eventi che completano la sequenza stessa. Solitamente tali dati vengono tratti da manuali tecnici o dall'esperienza nel campo, ma nel caso di sistemi maggiormente complessi possono richiedere l'impiego di tecniche analitiche per la loro determinazione. Il processo di determinazione delle dimensioni dell'impatto dell'evento accidentale viene solitamente realizzato mediante la simulazione dell'evento stesso, al fine di definire le conseguenze

secondo la prospettiva d'interesse, come, ad esempio, dimensioni dell'area interessata, numero di persone coinvolte e danni potenziali alle strutture [34].

Si precisa che le tecniche finora riportate e quelle che si presenteranno nel prosieguo della trattazione non rappresentano la totalità delle metodologie impiegate oggi nei processi di valutazione del rischio.

2.2 Applicazione negli impianti a idrogeno

Come già anticipato nel capitolo introduttivo, le caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno impongono una particolare attenzione in merito alla sicurezza dei processi di gestione e produzione in tutte le fasi che li compongono, esponendo altrimenti gli impianti e le persone in essi coinvolte a rischi molto elevati. A fronte di ciò, l'analisi del rischio si propone come uno strumento cruciale per uno sviluppo in sicurezza dell'intera filiera necessaria per un impiego sempre maggiore dell'idrogeno nel sistema energetico.

2.2.1 Obiettivi ed ostacoli

Note le proprietà dell'idrogeno e le potenziali difficoltà nella sua gestione, nel corso degli anni è cresciuta notevolmente la volontà di sviluppare in maniera rilevante i mezzi utili all'aumento della sicurezza degli impianti e quella di migliorare le modalità di applicazione di tali strumenti al mondo dell'idrogeno. Un impiego sistematico ed accurato dei mezzi d'analisi a disposizione permetterebbe infatti di ridurre il numero di eventi accidentali aventi luogo nei sistemi in questione e conseguentemente di aumentare la percezione di affidabilità e la fiducia della collettività nei confronti delle nuove tecnologie incentrate sull'impiego dell' H_2 . Anche la rapida diffusione delle HRS e dei sistemi affini ha imposto la necessità di sviluppare con convinzione gli strumenti di analisi e quelli di mitigazione, al fine di realizzare un avanzamento contemporaneo della diffusione degli impianti e dello sviluppo di misure di sicurezza adeguate; tale processo risulta al momento pienamente in atto, come è stato già messo in evidenza nel capitolo introduttivo mostrando le normative e gli standard recentemente sviluppati a livello globale. Inoltre, le caratteristiche già citate richiedono l'applicazione di tecniche di analisi molto avanzate, così da riuscire a valutare preventivamente e/o a gestire adeguatamente tutti i possibili pericoli derivanti dall'impiego dell'idrogeno per applicazioni industriali [6]. Tale necessità è stata messa in forte risalto anche dagli ultimi incidenti nel campo, quali, in

particolare, l'esplosione di un serbatoio di idrogeno a Gangneung, in Corea del Sud, nel 2019, l'esplosione seguente ad una fuoriuscita da un serbatoio in una stazione di servizio di Oslo, in Norvegia, nel 2019 e l'incendio di un bus durante il rifornimento presso una stazione californiana, negli Stati Uniti, nel 2023 [6]; il verificarsi di incidenti risulta infatti essere spesso un innesco per la ricerca e lo sviluppo, come successo nel caso del disastro di Hindenburg del 1937, il quale ha originariamente generato l'apprensione della collettività, scientifica e non, nei confronti della sicurezza negli impianti operanti con l'idrogeno [8].

L'analisi del rischio risulta pertanto utile in tale ambito come guida nel processo decisionale messo in atto per la definizione delle distanze di sicurezza, per la scelta degli strumenti mirati alla riduzione del rischio e per la pianificazione dell'utilizzo dell'area territoriale a disposizione per lo sviluppo dell'impianto. Risultano cruciali nella valutazione, per i motivi già ampiamente discussi nella sezione precedente, la determinazione delle frequenze e delle conseguenze; nel caso degli impianti a idrogeno tali fasi dell'analisi risultano ancora più complesse data la scarsità di dati a disposizione, essendo sistemi diffusi solamente da pochi anni ed essendo dunque carenti i dati storici a disposizione [10].

2.2.2 Tecniche e software impiegati

Data la complessità dei sistemi interessati e le difficoltà comportate dalla natura dell'idrogeno, risulta interessante osservare quali tecniche riconducibili alla valutazione del rischio vengono comunemente impiegate per l'analisi di questo tipo di impianti, ponendo particolare attenzione alle applicazioni nell'ambito delle *hydrogen refueling stations*.

Le HRS, in quanto sistemi avanzati e complessi operanti con l'idrogeno, risultano infatti considerevolmente interessate dai discorsi appena illustrati, coinvolgendo al proprio interno vari processi considerati fortemente pericolosi, quali il trasporto, lo stoccaggio e il rifornimento. Una valutazione accurata dei rischi potenziali in questo tipo di impianti può essere pertanto realizzata solamente seguendo un approccio preciso e strutturato che coinvolga le varie tecniche dell'analisi del rischio e le attui prontamente per la determinazione dei principali eventi accidentali possibili e conseguentemente per l'identificazione di mezzi mitigativi o preventivi che siano in grado di ridurre la presenza e/o gli effetti. Tale approccio può essere visualizzato chiaramente nella figura presentata di seguito, la quale mostra l'adattamento dei processi di base della valutazione del rischio,

già mostrati in *Figura 19*, nel caso di impiego su una stazione di rifornimento di idrogeno [6]. L'applicazione iterativa di tale modello permette di valutare in maniera accurata i rischi derivanti dall'attività della stazione e conseguentemente di attuare misure utili all'aumento della sicurezza.

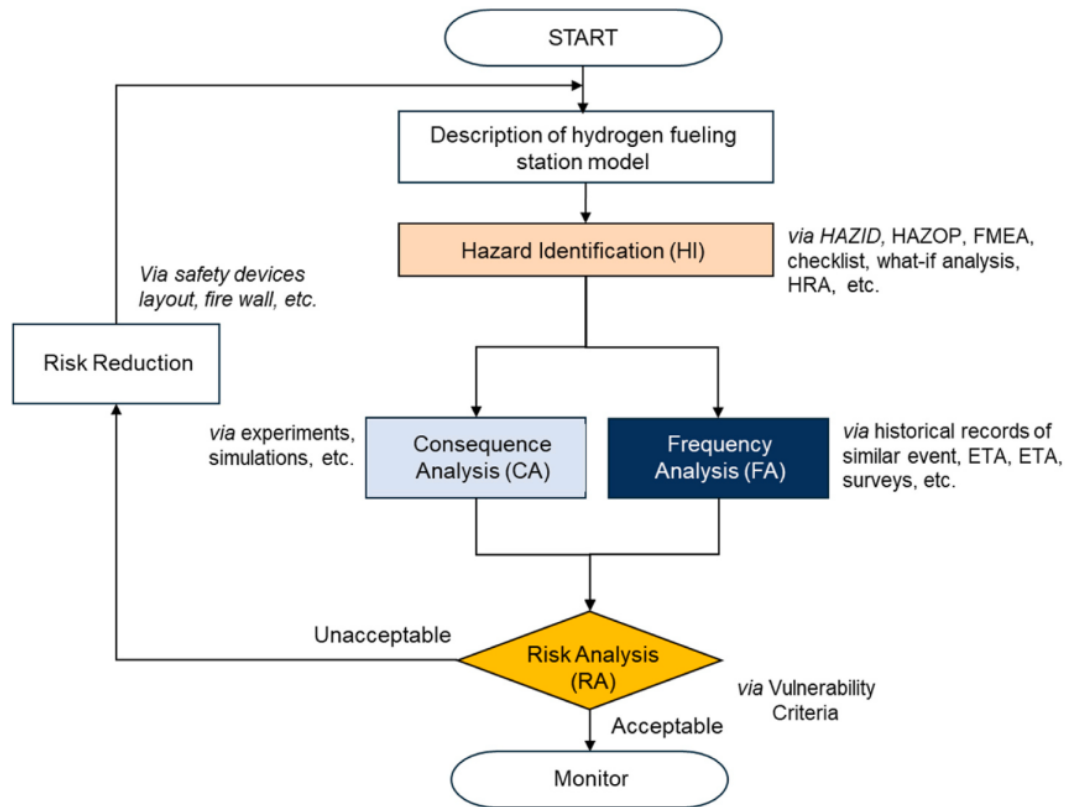


Figura 21: Processo di verifica della sicurezza per un'HRS mediante l'analisi del rischio [6]

Risulta di particolare interesse in tale ambito il lavoro di ricerca svolto da Park et al. (2025) in *Global risk assessment of hydrogen refueling stations: Trends, challenges, and future directions*, pubblicato sull'*International Journal of Hydrogen Energy* [6]. Nel corso dell'opera sono stati accuratamente selezionati 61 studi internazionali pregressi riguardanti l'applicazione delle tecniche d'analisi per la valutazione dei potenziali pericoli in diverse HRS. La ricerca così condotta ha permesso di mettere in risalto le tecniche più impiegate, le operazioni maggiormente interessate dall'analisi e gli strumenti utilizzati. Si intende sottolineare che in questa fase della trattazione non verranno presentati nel dettaglio studi e relativi risultati, in quanto la volontà è quella di illustrare dapprima gli approcci maggiormente seguiti e le metodologie applicate nell'ambito di interesse.

I 61 studi selezionati sono stati condotti da gruppi di ricerca di diversi Paesi o da gruppi di collaborazione internazionale, come mostrato nel grafico in *Figura 22*. Gran parte dei lavori (più del 75%) sono stati realizzati da parte di nazioni asiatiche, in particolare da Giappone, Cina e Corea del Sud, a conferma della posizione dominante dell'Asia nello sviluppo delle tecnologie legate all'idrogeno e conseguentemente dei mezzi necessari per la loro gestione. Nell'illustrazione viene riportata simultaneamente anche la distinzione tra gli studi riguardanti stazioni offsite e onsite, così da mettere in evidenza la forte prevalenza dei primi; 46 articoli riguardano infatti studi condotti su HRS offsite e solamente 15 trattano impianti onsite. La prevalenza dei primi risulta facilmente comprensibile data la preponderanza numerica a livello globale delle HRS offsite, già messa in evidenza nella sezione introduttiva, la quale rende più semplice e conseguentemente più frequente la stesura di analisi ad esse relative. I dati riportati nel grafico vengono per maggiore chiarezza riassunti nella tabella successiva.

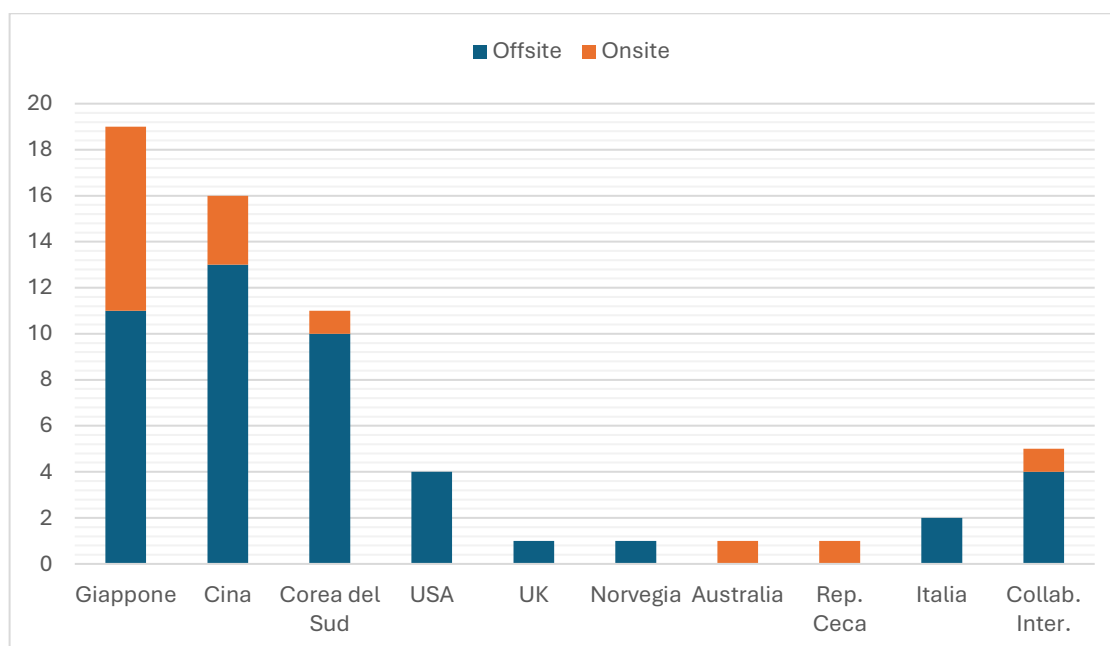


Figura 22: Suddivisione argomentativa e geografica degli studi selezionati in Ref. [6]

Regione	N° studi		Totale
	HRS Offsite	HRS Onsite	
<i>Giappone</i>	11	8	19
<i>Cina</i>	13	3	16
<i>Corea del Sud</i>	10	1	11
<i>USA</i>	4	0	4

<i>UK</i>	1	0	1
<i>Norvegia</i>	1	0	1
<i>Australia</i>	0	1	1
<i>Rep. Ceca</i>	0	1	1
<i>Italia</i>	2	0	2
<i>Collab. Internaz.</i>	4	1	5
<i>Totale</i>	46	15	61

Tabella 3: Suddivisione argomentativa e geografica degli studi selezionati in Ref. [6]

Illustrate dunque le informazioni relative alla regione di provenienza e alla tipologia di stazione oggetto dello studio, sono state identificate le tecniche proprie dell'analisi del rischio impiegate in ciascuno studio selezionato, così da evidenziare quali tra le fasi del processo di valutazione risultino essere più frequentemente applicate. Si riporta pertanto la categorizzazione dedotta in una tabella dedicata e posta di seguito; gli acronimi impiegati fanno riferimento alle seguenti tecniche:

- HI: *Hazard Identification*;
- CA: *Consequence Analysis*;
- FA: *Frequency Analysis*;
- VA: *Vulnerability Analysis*.

Metodo applicato	N° Studi (Offsite)	% (Offsite)	N° Studi (Onsite)	% (Onsite)
HI	0	0.0%	3	20.0%
CA	5	10.9%	3	20.0%
FA	7	15.2%	1	6.7%
HI + CA	1	2.2%	1	6.7%
HI + FA	3	6.5%	2	13.3%
CA + FA	23	50.0%	2	13.3%
HI + CA + FA	6	13.0%	3	20.0%
VA	1	2.2%	0	0.0%
Total	46		15	

Tabella 4: Suddivisione degli studi selezionati sulla base degli approcci riscontrati [6]

Dalla tabella proposta emerge chiaramente la differenza tra gli studi nei quali viene analizzata una stazione offsite e quelli in cui risulta oggetto della valutazione una stazione onsite. I primi presentano infatti l'applicazione di diverse tecniche della QRA e si concentrano prevalentemente sulla determinazione delle frequenze e delle conseguenze, con addirittura il 50% degli studi che propone l'applicazione congiunta di CA e FA. Non risultano presenti, inoltre, studi riguardanti la sola identificazione dei pericoli (HI), in quanto la quantità di dati storici a disposizione riguardo le HRS offsite risulta il più delle volte sufficiente e permette di concentrare maggiormente l'attenzione sull'analisi quantitativa e sulla valutazione dell'impatto degli eventi accidentali. D'altra parte, gli studi inerenti alle HRS onsite risultano il più delle volte meno strutturati (il 46.7% degli studi si concentra su una sola fase) data la complessità applicativa e si denota la notevole attenzione dedicata all'HI, motivata prevalentemente dalla scarsità di dati pregressi disponibili.

La valutazione degli articoli scelti ha permesso a Park et al. di individuare anche i metodi per l'identificazione del rischio impiegati più di frequente; questi corrispondono ad HAZOP e FMEA. Le due tecniche, già presentate precedentemente, sono state applicate alternativamente in base al campo di impiego: mentre FMEA risulta maggiormente accurata per la determinazione dei guasti accidentali legati ai singoli componenti, HAZOP permette di tener conto in maniera più adeguata degli eventi correlati all'errore umano o alla concatenazione dei fenomeni [6]. Allo stesso modo sono stati definiti gli approcci maggiormente usati per l'analisi delle conseguenze, la quale il più delle volte si è concentrata su fenomeni legati ad eventi di rilascio indesiderati scaturiti dai seguenti elementi del sistema analizzato: rimorchi per il trasporto, serbatoi di stoccaggio, compressori, scambiatori di calore e dispenser. Gli approcci messi in atto sono stati reputati riconducibili a tre gruppi:

1. Sviluppo di modelli fisici impiegabili per la simulazione di scenari di dispersione;
2. Definizione della distanza di sicurezza necessaria, ossia della distanza minima da garantire tra il punto di origine dell'incidente e i soggetti (persone, strutture, ecc.) di cui si vuole assicurare la salvaguardia;
3. Stima della probabilità di ottenere specifiche conseguenze derivanti dagli effetti di un incidente, realizzata mediante funzioni Probit (modelli statistici che

correlano l'intensità di un fenomeno dannoso con la probabilità di un determinato effetto) [6].

Oltre alle valutazioni finora esposte, risulta meritevole di interesse anche il lavoro di individuazione dei software maggiormente impiegati negli articoli sottoposti all'attenzione degli autori, al fine di riportare e presentare le principali funzionalità di tali strumenti, alcuni dei quali torneranno ad essere citati nel corso della presente trattazione. I più ricorrenti risultano essere i seguenti:

- Phast™ (*Process Hazard Analysis Software Tool*): Sviluppato da DNV (*Det Norske Veritas*), risulta largamente impiegato nell'analisi del rischio e, più in particolare, nell'analisi delle conseguenze, permettendo di modellare diversi scenari di rilascio, dispersione, incendio ed esplosione. Viene impiegato in 12 degli articoli selezionati, principalmente per la valutazione del rischio, la definizione di distanze di sicurezza e la simulazione di fenomeni di rilascio di idrogeno e altre sostanze chimiche.
- HyRAM (*Hydrogen Risk Assessment Model*): Sviluppato da Sandia National Laboratories (USA), riesce mediante la combinazione di metodi probabilistici e deterministici a modellare il comportamento dell'idrogeno in vari scenari d'interesse, risultando così uno strumento utile per la QRA applicata a sistemi operanti con H₂. Risulta impiegato in 10 studi analizzati, sia nella FA che nella CA.
- FLACS (*Flame Acceleration Simulator*): Sviluppato da GexCon, permette di sviluppare simulazioni CFD per valutare i rischi di esplosione e la dispersione nell'atmosfera. Tra gli studi valutati risulta presente 7 volte.
- SAFETI (*Safety and Feasibility Tool for Industry*): Sviluppato anch'esso da DNV, è uno strumento utile per la determinazione del livello di rischio individuale e sociale; viene impiegato in 7 degli studi selezionati.

Tra gli altri, impiegati meno volte, si riportano per completezza GeNIe, FLUENT, ALOHA e HYSIS [6].

2.2.3 Database di riferimento

Tra i principali ostacoli alla realizzazione di analisi del rischio accurate nel caso di impianti a idrogeno, e più in particolare HRS, emerge, come già accennato, la mancanza di dati statistici derivanti dalle esperienze pregresse, la quale comporta ampie difficoltà

nella fase preliminare di individuazione dei rischi e di analisi qualitativa. Per questo motivo, con l'aumento della diffusione degli impianti di questo tipo, si è cercato di costruire dei supporti utili, raccogliendo materiale vario riguardante gli eventi accidentali che hanno avuto luogo nel corso degli anni, legati più o meno direttamente all'idrogeno e alle sue fasi di gestione e lavorazione. Il lavoro di catalogazione di eventi di questo tipo ha avuto ufficialmente inizio nel 1974 con la raccolta e la revisione da parte della *US National Aeronautics and Space Administration* (NASA) di 96 articoli; a partire da questo momento l'opera è stata portata avanti ininterrottamente da vari enti, creando raccolte costantemente aggiornate e accuratamente dettagliate. Un'ulteriore spinta in tal senso è stata fornita dall'entrata in vigore nell'Agosto 2012 della direttiva *Seveso III*, la quale ha imposto agli operatori specializzati di valutare attentamente gli incidenti precedentemente verificatisi e di integrarne le lezioni apprese nei rapporti sulla sicurezza [8]. La catalogazione degli eventi passati permette infatti di creare statistiche utili all'individuazione preliminare degli aspetti maggiormente critici dei sistemi analizzati e di compilare nel contempo una lista di insegnamenti tratti che possano risultare benefici per tutti gli individui interessati alla progettazione o alla modifica di un impianto simile.

Ad oggi le fonti maggiormente impiegate per la valutazione degli eventi passati sono rappresentate dai database creati da enti internazionali specializzati, i quali raccolgono una vasta quantità di casistiche e le relative caratteristiche (data, luogo, probabili cause, danni causati, ecc.). Si illustrano di seguito le raccolte di riferimento:

- *HIAD (Hydrogen Accidents and Incidents Database)*: Sviluppato dal *Joint Research Centre* (JRC) della Commissione Europea a partire dai primi anni del ventunesimo secolo, si propone come una delle più vaste ed attendibili raccolte per uso pubblico di eventi accidentali collegati (più o meno strettamente) all'idrogeno. I casi riportati, 1005 dopo l'ultimo aggiornamento (HIAD 2.1), coprono un lasso di tempo molto vasto (il primo evento citato è del 1894) e derivano da fonti disparate come articoli scientifici, riviste, altre banche dati e report di ispezioni. Tra gli eventi proposti sono 45 quelli strettamente legati alla catena del valore dell'idrogeno.
- *ARIA events*: Sviluppato in Francia dall'*Ufficio per l'analisi dei rischi industriali e dell'inquinamento*, rappresenta per distacco la banca dati più ampia, collezionando circa 58400 eventi, 341 dei quali sono strettamente riferiti alla

catena del valore dell'idrogeno. Gran parte delle casistiche riportate sono incidenti avvenuti in Francia [8].

- eMARS (*Major Accident Reporting System*): Gestito dal *Major Accident Hazards Bureau* (MAHB) del JRC della Commissione Europea, si propone come il database di raccolta degli eventi accidentali rilevanti segnalati dagli stabilimenti soggetti alla direttiva *Seveso III*. Presenta al suo interno 734 casistiche, 144 delle quali risultano rigorosamente collegate alla gestione e alla lavorazione dell'idrogeno [8].
- H2tools Lesson Learned: Raccolta di eventi accidentali e dei conseguenti insegnamenti tratti sviluppata dal Dipartimento per l'Energia degli USA a partire dal 2017. Contiene 221 casistiche, tutte strettamente relative alla catena del valore dell'idrogeno.
- VARO: Registro sviluppato dall'*Agenzia finlandese per la sicurezza e i prodotti chimici* (Tukes) al fine di raccogliere eventi accidentali di vario genere per trarne successivamente gli insegnamenti utili alla fase decisionale di adozione delle misure preventive. La raccolta contiene 146 eventi, dei quali solamente 14 possono essere considerati strettamente riferiti all'idrogeno e alla sua *value chain* [8].

Per illustrare in maniera più accurata la tipologia di eventi riportati e le modalità mediante le quali essi vengono presentati, in questo studio si è scelto di selezionare le casistiche maggiormente coerenti con le tematiche trattate nel corso della presente opera tra quelle riportate nell'HIAD 2.1. I criteri di selezione vengono illustrati di seguito in ordine di priorità:

- L'evento risulta riferito ad una stazione di rifornimento di idrogeno;
- L'evento risulta scaturire da un elemento potenzialmente presente anche nella configurazione comune di una stazione di rifornimento di idrogeno;
- L'evento risulta essere ben dettagliato;
- L'evento risulta essere recente.

Mediante tale approccio sono stati selezionati 6 eventi accidentali particolarmente significativi dei quali si riportano le caratteristiche:

- *Esplosione nel deposito di una HRS*, ID 884, Norvegia, 2019: L'incidente, avvenuto nei pressi di Oslo, è consistito in una grave perdita (stimata tra 1.5 e 3

kg) di idrogeno scaturita dall'impianto di stoccaggio ad alta pressione di una stazione di rifornimento; il rilascio ha provocato una detonazione. La causa originale è stata l'allentamento di due bulloni responsabili del fissaggio della guarnizione tra il serbatoio ad alta pressione e la tubazione adiacente; la guarnizione ha resistito per oltre due anni a una pressione di 900 bar, prima di cedere a causa della fatica indotta dalle oscillazioni di pressione durante il rifornimento. L'evento ha causato infortuni lievi alle persone e il danneggiamento degli edifici circostanti fino a 65 m.

- *Perdita di idrogeno nel tubo flessibile di un dispenser*, ID 702, Giappone, 2014: L'incidente è avvenuto in una stazione di rifornimento di idrogeno a 70 MPa. Dopo aver completato una sessione di riempimento, la pressione nel tubo di rifornimento è improvvisamente scesa; l'operatore ha prontamente identificato la perdita di idrogeno nel tubo flessibile, vicino al raccordo con l'erogatore, mediante un rilevatore. L'impianto è stato chiuso manualmente e non ci sono stati danni né vittime. Il guasto è stato causato da un errore di progettazione del tubo flessibile.
- *Rilascio in una stazione di rifornimento di idrogeno*, ID 913, Germania, 2012: La fuoriuscita si è verificata nel sistema di stoccaggio di una HRS, più precisamente in corrispondenza di una delle 120 bombole ad alta pressione (800 bar). Tre dei sensori installati nei pannelli di controllo vicini hanno rilevato la presenza di idrogeno e hanno indotto l'immediato spegnimento della stazione; non si è così verificata alcuna accensione. La causa è stata individuata nel materiale di realizzazione della bombola.
- *Incendio su un rimorchio di H_2 allo stato gassoso durante il rifornimento*, ID 543, USA, 2009: L'incidente ha avuto luogo verso la fine del processo di riempimento di un rimorchio cisterna per idrogeno gassoso presso una stazione. Un disco di rottura del dispositivo di sicurezza per lo scarico della pressione è esploso rilasciando idrogeno gassoso; il tubo di sfiato ha convogliato il gas verso la parte superiore del rimorchio, dove l'idrogeno si è incendiato, provocando una fiammata verso l'alto. Il tempo totale necessario per riportare l'impianto in sicurezza è stato inferiore a dieci minuti e non si sono verificati danni. La causa è stata dunque un errore di fabbricazione nel dispositivo di sicurezza.
- *Esplosione in un impianto di produzione di idrogeno da energia rinnovabile*, ID 970, Corea del Sud, 2019: L'esplosione si è originata in corrispondenza dei buffer di idrogeno facenti parte di un impianto sperimentale adibito alla produzione di

idrogeno mediante un elettrolizzatore ad acqua accoppiato a pannelli solari. I tre serbatoi (aventi ciascuno una capacità di 40 m³ a una pressione rispettivamente di 1.2 MPa per uno e di 0.7 MPa per gli altri due) stoccavano l'idrogeno prodotto dall'elettrolizzatore. La conseguente esplosione è stata così fragorosa da spargere detriti su un'area di oltre 3000 m²; i danni sono stati causati esclusivamente dalla pressione dell'esplosione, la quale ha causato la morte di due persone, il ferimento di altre sei e il danneggiamento di uno stabilimento di produzione di componenti ceramici vicino. Gli edifici situati entro 100 m dai serbatoi hanno subito gravi danni. La causa è stata individuata nella progettazione errata del sistema che ha portato ad avere un'eccedenza della concentrazione di ossigeno, superiore al 6%.

- *Incendio da un rimorchio di idrogeno allo stato gassoso*, ID 385, USA, 2012: Una perdita dal serbatoio di idrogeno ha causato un incendio in una stazione di rifornimento. Il guasto di una valvola di sicurezza ha provocato il rilascio immediato di circa 30 kg di idrogeno (nel primo minuto), che, mescolatosi con l'aria nel tubo di sfiato, ha successivamente preso fuoco. L'idrogeno dello sfiato ha prodotto un *jet fire*, il quale ha bruciato la parte superiore della copertura del dispenser. La causa originale dell'incidente è stata individuata nell'utilizzo di materiali non appropriati che hanno provocato il bloccaggio della valvola di sicurezza.

Il lavoro di analisi e valutazione degli eventi accidentali raccolti nei vari database è stato condotto in maniera accurata anche da numerosi altri studi nel corso degli anni, permettendo di ottenere dati statistici affidabili riguardo le cause e le modalità di avvenimento più frequenti. Risulta interessante illustrare i risultati ottenuti da tali opere di valutazione, così da poter sottolineare le evidenze comuni, ma anche le divergenze riscontrate. A tal proposito, merita un'attenta osservazione il lavoro svolto da Yang et al. in *Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process* (2021) [11], nella prima parte del quale gli autori hanno selezionato ed analizzato 120 eventi accidentali contenuti all'interno della raccolta *H2tools Lesson Learned* con l'obiettivo di determinare statistiche riferite al luogo di avvenimento dell'incidente, alla probabile causa, all'elemento del sistema responsabile e ai danni conseguenziali. Si illustrano nelle figure seguenti i risultati ottenuti mediante grafici tematici.

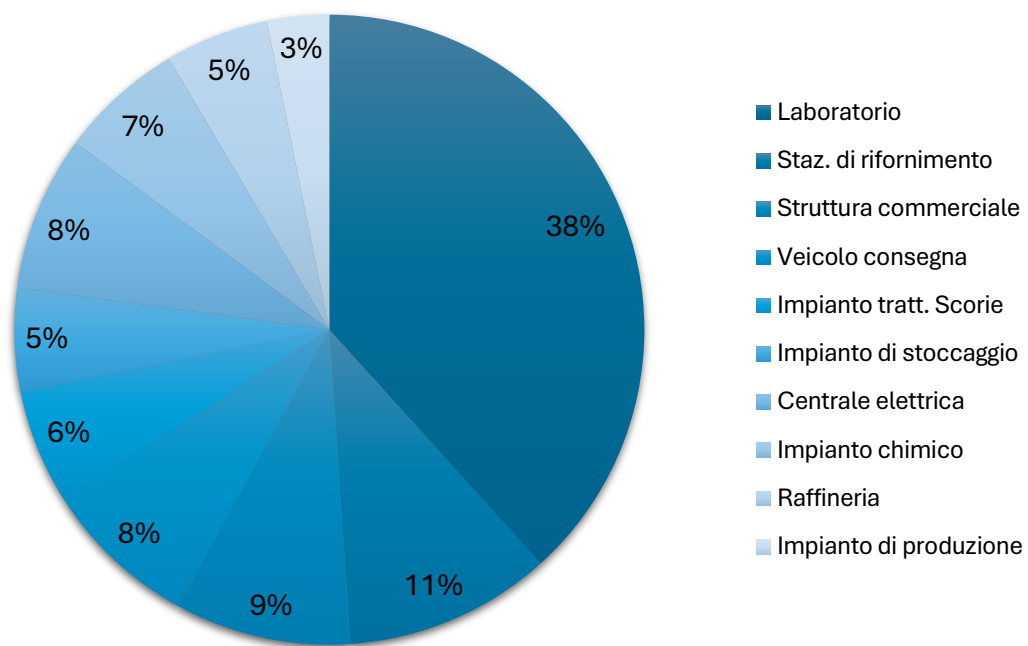


Figura 23: Risultati statistici relativi al luogo dell'incidente [11]

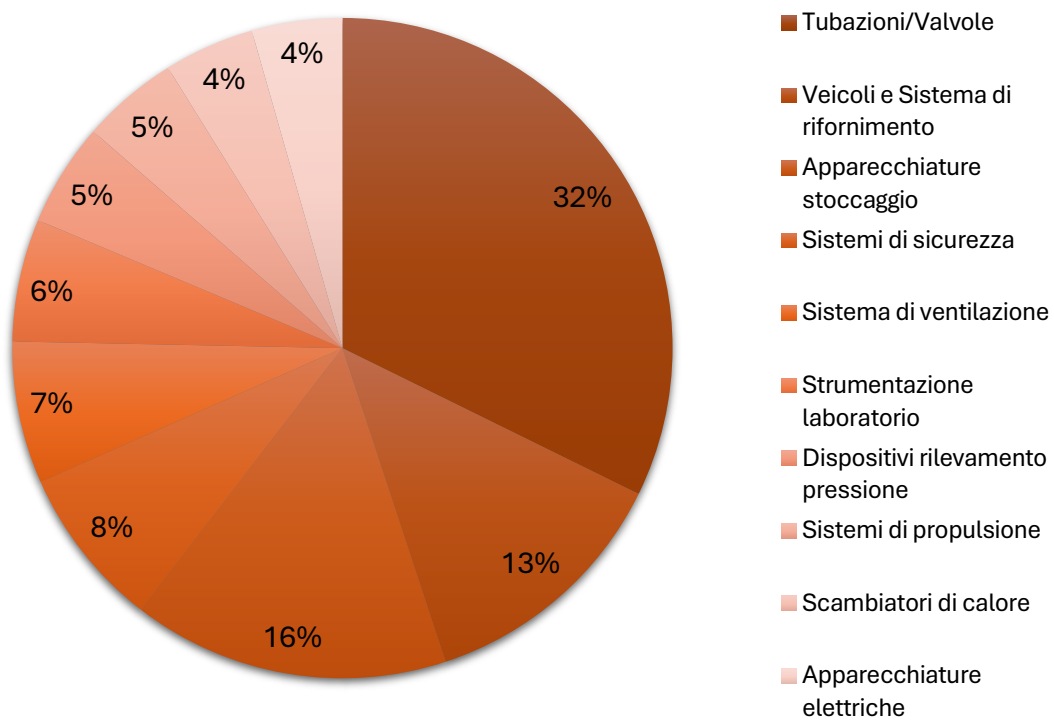


Figura 24: Risultati statistici relativi all'elemento di origine dell'incidente [11]

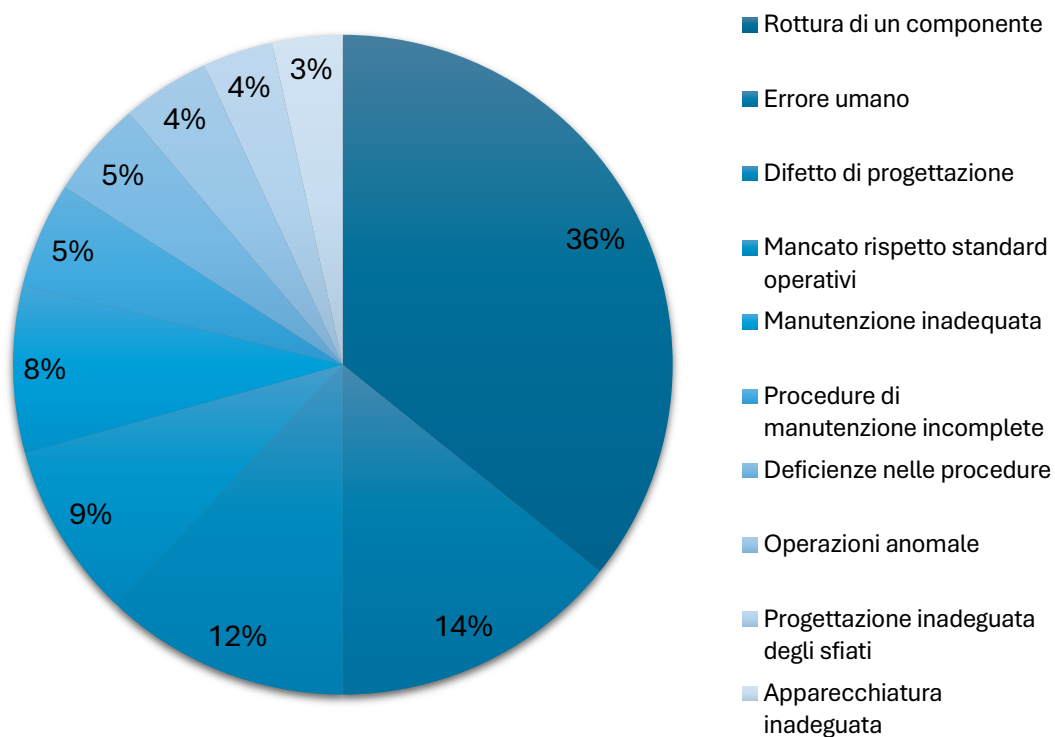


Figura 25: Risultati statistici relativi alle cause d'incidente [11]

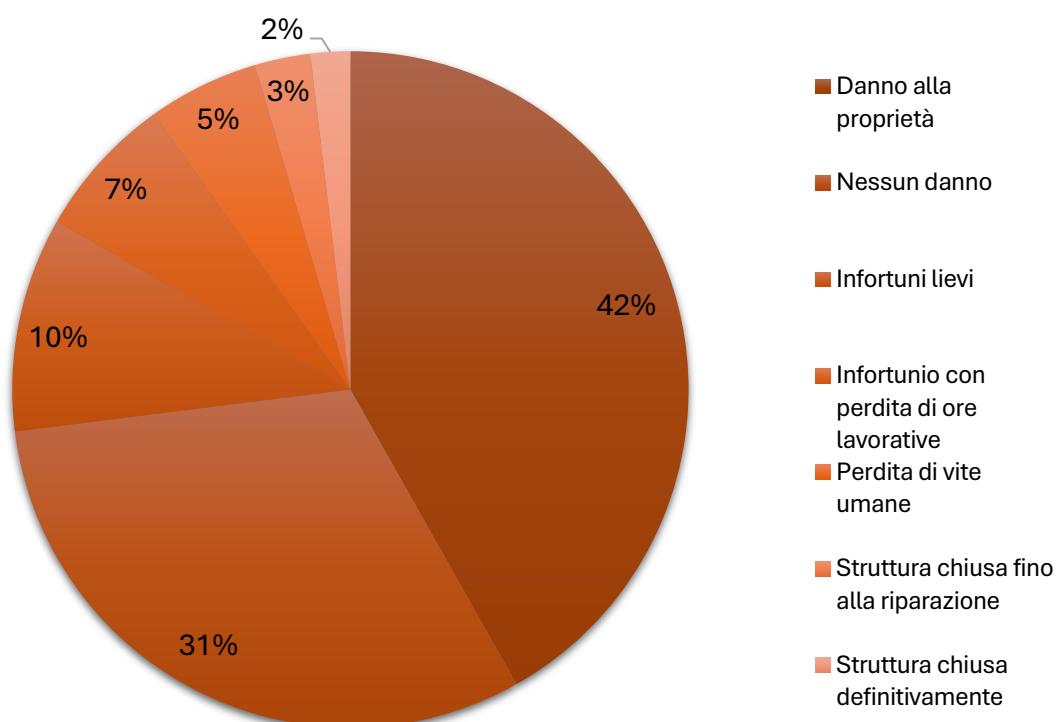


Figura 26: Risultati statistici relativi alle conseguenze dell'incidente [11]

Un altro contributo di rilievo è rappresentato dall'analisi svolta da Wen et al. (2022) in *Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database* [35], la quale ha tenuto conto di 576 eventi riportati in HIAD 2.0 ritenuti statisticamente validi sui 706 totali presenti a Maggio 2021, momento della stesura dell'opera. Tra le varie valutazioni proposte all'interno dello studio citato, risulta di particolare interesse ai fini della presente trattazione quella riguardante le cause degli eventi accidentali identificate, potendo ottenere da essa risultati confrontabili con quelli già illustrati in *Figura 25* e derivanti dallo studio in Ref. [11]. Si riportano dunque i valori ottenuti nella figura sottostante.

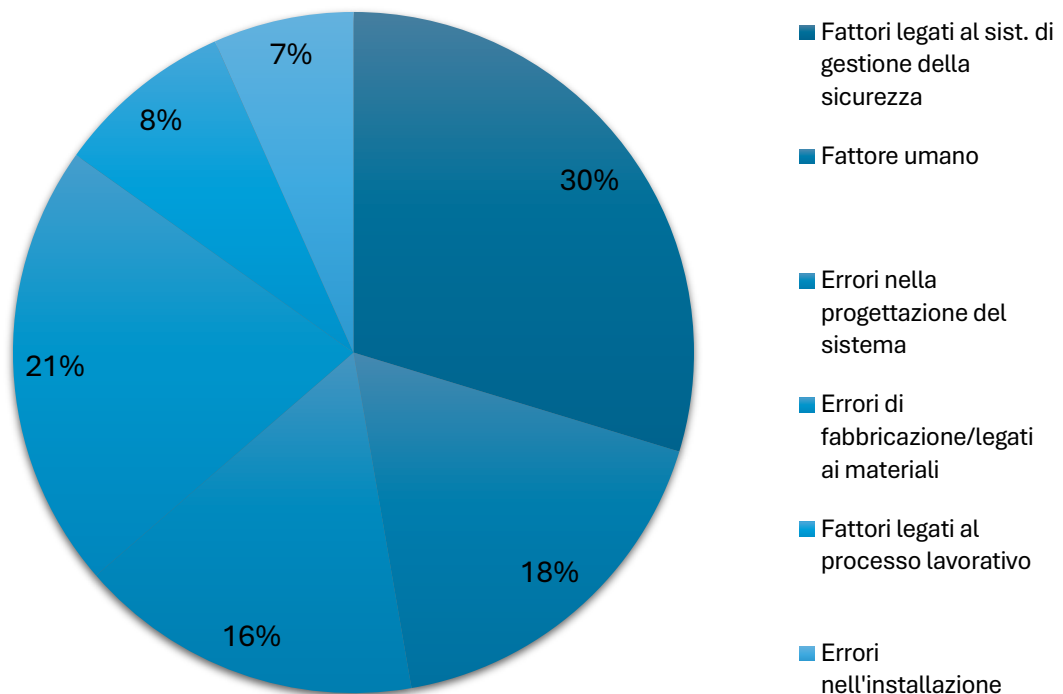


Figura 27: Risultati statistici relativi alle cause d'incidente [35]

Si noti che i risultati presentati nel grafico in *Figura 27* sono frutto di un'opera di normalizzazione dei valori riportati nell'articolo di riferimento, presentando quest'ultimo una totalità superiore al 100% al fine di considerare ogni gruppo come formato da più cause indipendenti.

Prima di commentare i risultati finora illustrati e di procedere con le opportune considerazioni si intende illustrare i dati statistici ottenuti dall'ancor più accurato lavoro di analisi realizzato da Alfasfos et al. (2024) in *Lessons learned and recommendations*

from analysis of hydrogen incidents and accidents to support risk assessment for the hydrogen economy [8]. In questo caso gli autori hanno selezionato ed analizzato 89 eventi presenti in diversi database al fine di giungere a dei risultati statistici inerenti alle principali cause degli incidenti e agli elementi coinvolti; si riporta nella tabella dedicata posta di seguito la lista delle raccolte impiegate e il numero di eventi tratti da ciascuna di esse. Si noti inoltre che sono stati considerati unicamente eventi riferiti a problematiche legate ad (almeno) uno degli elementi della catena del valore dell'idrogeno riportata nella figura seguente.

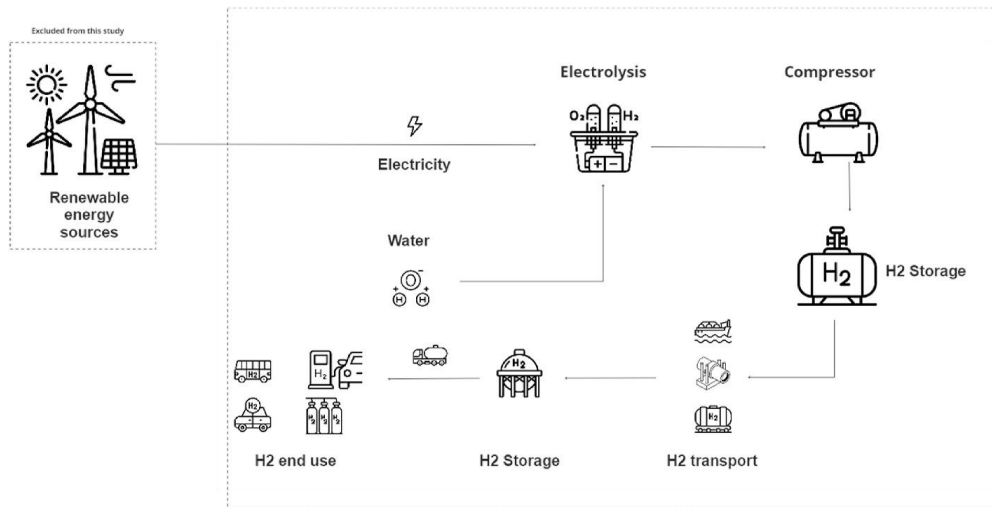


Figura 28: Catena del valore dell'idrogeno considerata in Ref. [8]

Fonte	N° di eventi tratti
HIAD 2.0	27
ARIA events	12
eMARS	6
H2tools Lesson Learned	33
VARO	7
IChemE	2
Notizie e dichiarazioni pubbliche	2

Tabella 5: Database impiegati come fonti e numero di eventi tratti [8]

Si illustrano dunque nei grafici seguenti i risultati ottenuti in merito alle cause e alle apparecchiature di origine degli incidenti.

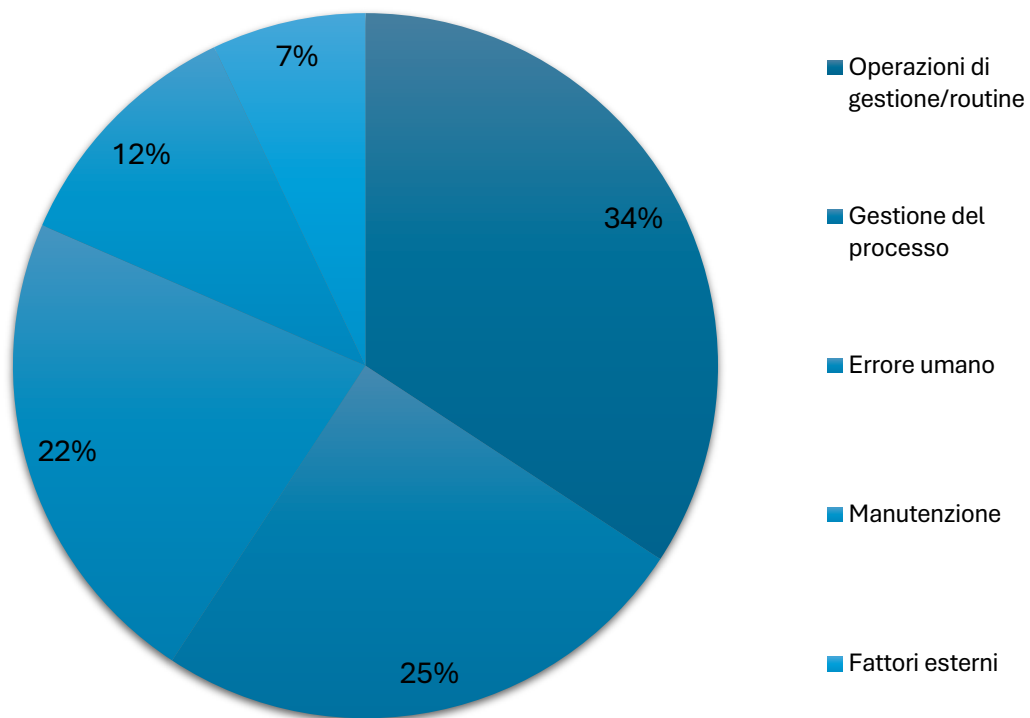


Figura 29: Risultati statistici relativi alle cause d'incidente [8]

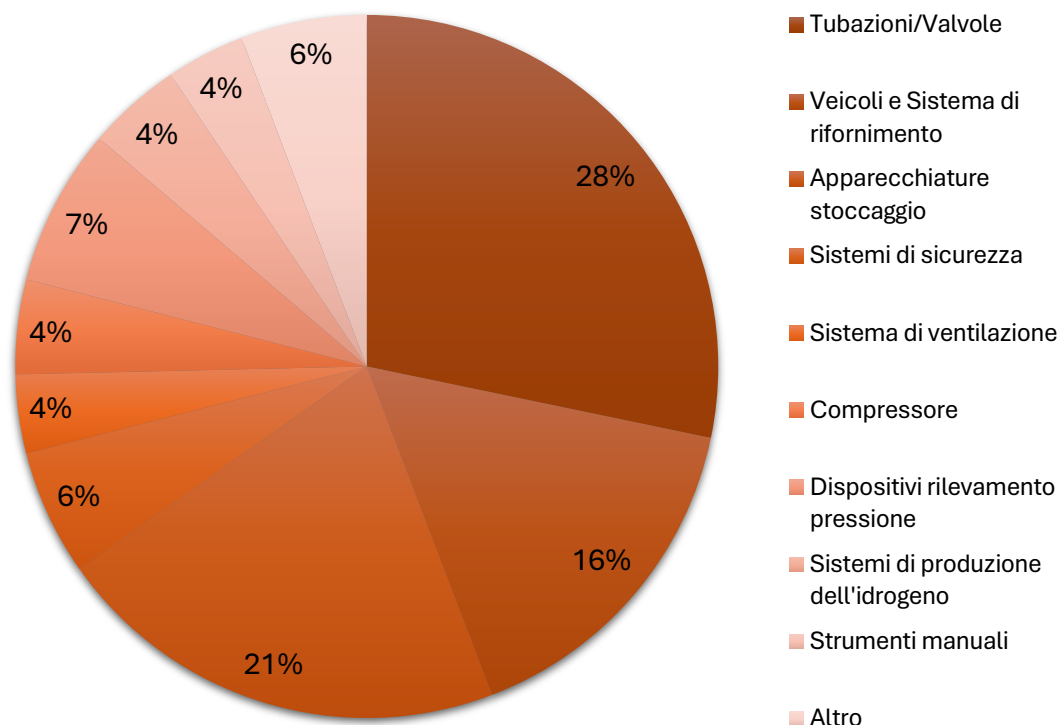


Figura 30: Risultati statistici relativi all'elemento di origine dell'incidente [8]

Si precisa che ciascuna delle categorie riportate nel grafico in *Figura 29* sottintende diverse operazioni e procedure, per ognuna delle quali all'interno dello studio è stato precisato il numero di eventi accidentali nei quali tali operazioni risultassero coinvolte. Per completezza si presentano tali valori nei grafici seguenti.

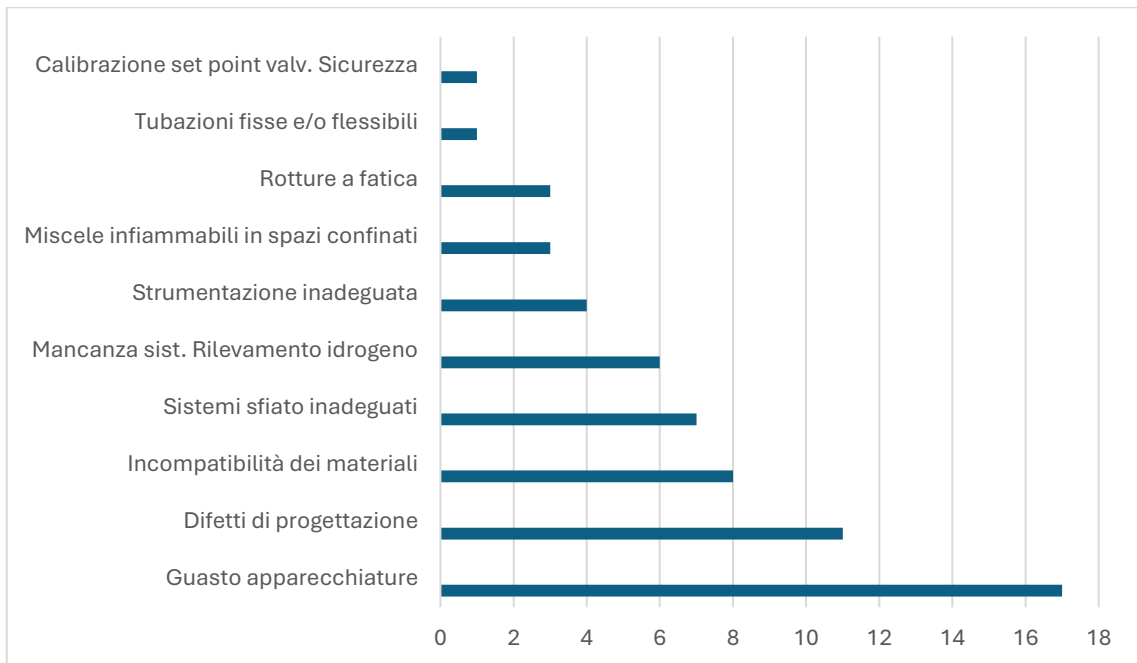


Figura 31: Numero eventi che presentano ciascuna delle sottocause relative alle operazioni di gestione ordinaria [8]

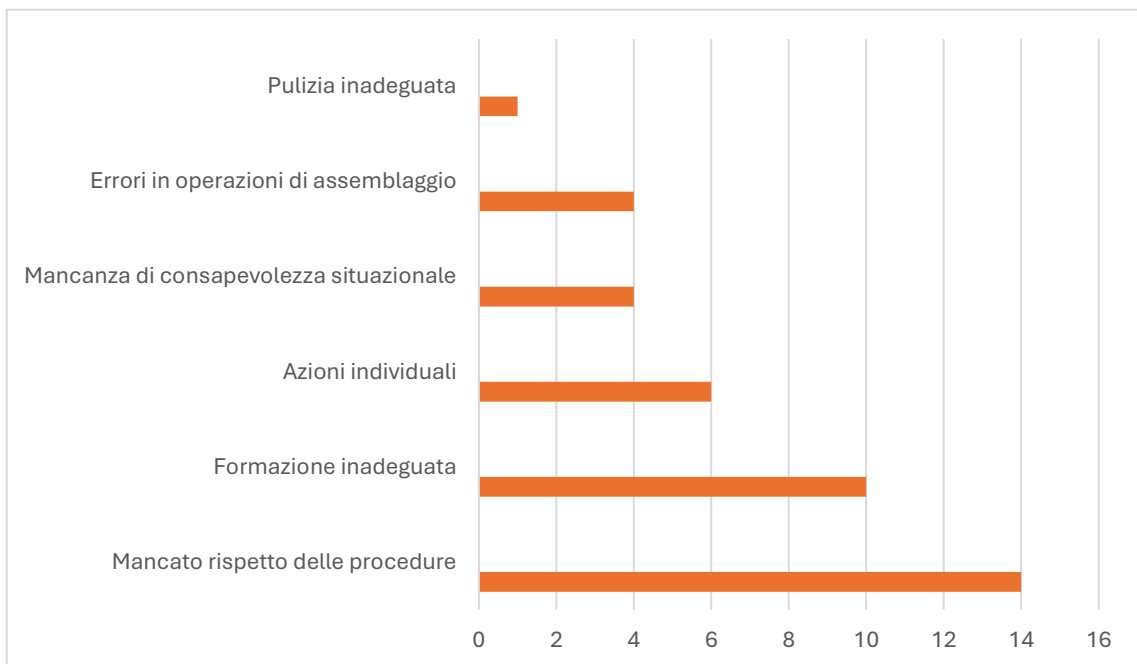


Figura 32: Numero eventi che presentano ciascuna delle sottocause collegate all'errore umano [8]

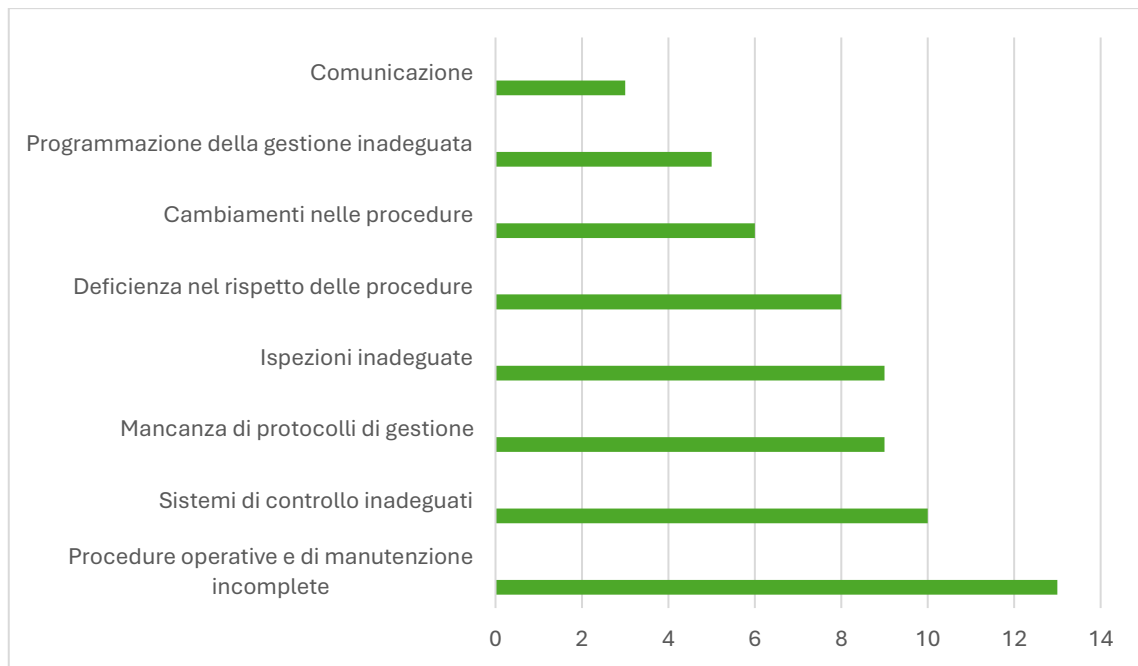


Figura 33: Numero eventi che presentano ciascuna delle sottocause relative alla gestione del processo produttivo [8]

Riportati dunque i risultati degli studi meritevoli di particolare attenzione, risulta possibile effettuare delle considerazioni sulle tematiche toccate e sulle valutazioni realizzate. Per quanto concerne i componenti dai quali si origina il più delle volte l'evento accidentale a seguito di un guasto si riscontra una forte concordanza tra i risultati ottenuti in Ref. [11] e in Ref. [8], con l'insieme tubazioni/valvole che emerge come elemento maggiormente critico, seguito da veicolo e strumenti per il rifornimento e dai sistemi di stoccaggio. La leggera divergenza delle percentuali è facilmente giustificabile considerando il differente dataset di cui si è tenuto conto nei due studi. Risulta più complesso il discorso riguardante le cause all'origine degli eventi accidentali analizzati, in merito alle quali sono evidenti diversi punti di contatto tra le analisi condotte, ma anche numerose discrepanze. Yang et al. [11] individuano infatti nella rottura di un componente del sistema la causa d'incidente più frequente negli studi selezionati, con una percentuale del 36%, seguita dall'errore umano (14%) e dai possibili difetti di progettazione (12%). Wen et al. [35] riportano a loro volta al primo posto i fattori legati ai sistemi di gestione della sicurezza (30%), seguiti dagli errori di fabbricazione o legati ai materiali dei componenti (21%) e quindi, anche in questo caso, dall'errore umano (18%) e dagli errori nella progettazione degli elementi del sistema (16%). Entrambi gli studi si trovano dunque d'accordo sul considerare l'errore umano, i guasti della componentistica e i difetti di progettazione come tre aspetti fortemente critici, ma in Ref. [11] non viene sottolineata la spiccata influenza dei sistemi

di gestione della sicurezza, la quale risulta invece cruciale nell'analisi condotta nel secondo studio. Il terzo studio, adottando una catalogazione differente, risulta più difficilmente confrontabile con i precedenti. Nonostante ciò, emerge con chiarezza la forte presenza di eventi legati al funzionamento ordinario, gruppo nel quale sono stati ricondotti i guasti nelle apparecchiature e i difetti di progettazione, presentando dunque analogie con le analisi precedentemente valutate. Va notato che anche in questo caso si dimostra presente un ampio contributo legato all'errore umano (25%), addirittura superiore a quanto messo in luce negli altri due studi. Risulta invece interessante la presenza di numerosi incidenti, tra quelli valutati in [8], legati ad operazioni riconducibili alla gestione del processo (25%), quali mancanza di protocolli e ispezioni adeguate o lacune nei sistemi di controllo. Le divergenze diffuse tra i tre studi possono essere motivate, oltre che dai differenti dataset di riferimento, anche dalle diverse condizioni nelle quali sono state condotte le analisi e dagli scopi delle valutazioni, i quali hanno senz'altro influenzato l'attenzione degli autori, come confermato e spiegato ampiamente anche dagli stessi autori in [8].

In conclusione, dagli studi presentati finora nella sezione emerge la forte influenza dei seguenti fattori sul verificarsi di situazioni di rischio:

- Componenti: tubazioni e valvole (~ 30%), sistemi di rifornimento e mezzi di trasporto (~ 15%), sistemi di stoccaggio (~ 18%);
- Luoghi d'origine: Laboratorio (~ 40%), stazione di rifornimento (~ 10%), impianto di stoccaggio (~ 10%);
- Cause: errore umano (~ 20%), guasto delle apparecchiature (~ 25%), difetti di progettazione (~ 15%);
- Conseguenze: danni strutturali (~ 40%), nessun danno (~ 30%), infortuni lievi (~ 10%), perdita di vite umane (~ 5%).

Si noti che, volendo considerare le diverse operazioni di gestione del processo, gestione della manutenzione, attuazione della manutenzione, attuazione delle procedure e progettazione del sistema come mansioni delle quali risulta responsabile una figura umana, l'errore umano risulterebbe responsabile di una percentuale di eventi ben maggiore, emergendo come causa d'incidente più frequente.

3. Evidenze dagli studi del settore

In questa sezione si pone l'attenzione sugli studi pregressi che presentano l'applicazione di una o più tecniche dell'analisi del rischio relativamente a realtà impiantistiche corrispondenti a quelle di interesse per la presente trattazione. Verrà dunque riservato ampio spazio alla presentazione di casi studio riguardanti stazioni di rifornimento di idrogeno *offsite* e *onsite* al fine di mettere in risalto le complessità del lavoro di analisi, gli approcci seguiti nelle opere selezionate e i risultati conseguiti. I casi studio che verranno proposti nel prosieguo dell'esposizione sono stati selezionati a seguito di un lavoro di analisi bibliografica svolto mediante il supporto di portali per la letteratura scientifica come *ScienceDirect* e *Web of Science*, all'interno dei quali è stata selezionata la documentazione di riferimento a partire da *key-words* che rappresentassero opportunamente i temi di interesse del lavoro di tesi, come: "*Risk Assessment*", "*Hydrogen Incidents*", "*HRS Risk Assessment*", "*HRS Risk Analysis*", "*QRA Hydrogen Station*", "*Hydrogen Safety*" e similari. Mediante tale approccio è stato possibile raccogliere diversi articoli riguardanti casi studio del settore e conseguentemente procedere con un lavoro di selezione ed analisi secondo criteri che permettessero di ottenere quelli più pertinenti ai fini della ricerca. I criteri di selezione vengono riportati di seguito in ordine di priorità:

- Lo studio riguarda l'analisi del rischio applicata ad HRS;
- Lo studio riguarda l'analisi del rischio applicata a contesti operanti con l'idrogeno;
- Lo studio presenta più fasi dell'analisi del rischio (Identificazione dei rischi, Analisi delle frequenze, Analisi delle conseguenze, ecc.);
- Lo studio presenta chiaramente e con accuratezza il lavoro svolto;
- Lo studio presenta risultati utili alla comprensione dei fenomeni;
- Lo studio risulta essere recente.

Si sottolinea che la diffusione solo recente delle stazioni di rifornimento di idrogeno comporta un'evidente scarsità di materiale nell'ambito; non risultano essere molti gli studi che vedono l'applicazione dell'analisi del rischio agli impianti di questo tipo e i dati reperibili (e riportati nella trattazione) sono pertanto caratterizzati da un'incertezza di fondo che potrà essere eliminata con l'aumento degli studi nel campo e con revisioni future della presente opera.

Si riportano dunque i casi studio giudicati funzionali per ottenere una trattazione del tema completa ed accurata, illustrandone in maniera meticolosa caratteristiche e risultati; ciò viene realizzato principalmente nella prima sezione del capitolo. Nella seconda l'attenzione si concentra invece sulle tecniche di determinazione delle frequenze di accadimento degli eventi accidentali negli impianti di questo tipo, sottolineando gli approcci maggiormente impiegati e mostrandone i risultati in diversi studi.

Si riporta nella tabella seguente una panoramica sommaria degli studi citati all'interno delle due sezioni; si ricorda che ognuno degli studi proposti è stato selezionato in quanto contenente uno o più aspetti di interesse legati all'ambito della ricerca.

Aspetti di interesse	Autori (anno)	Rif. bibliografico	Paese	Software
HRS offsite in area urbana, CA, Land-Use Planning	Kwak, Lee et al. (2023)	[19]	Corea del Sud	HyRAM, PHAST
HRS offsite in area urbana, HAZOP, FMEA, ETA, CA, IR, PFD	Suzuki, Shiota et al. (2021)	[10]	Giappone	PHAST, SAFETI
HRS in area urbana, LOPA, IR, SR	Kwak, Kim et al. (2024)	[9]	Corea del Sud	SAFETI
HRS in area urbana, Prove sperimentali, FA, CA, IR, SR	Park, Kim et al. (2021)	[36]	Corea del Sud	HyRAM, RISKCUVES
Pseudo-HRS, FA, CA, Distanze di sicurezza, Effetto barriere	Joshi, Sattari et al. (2024)	[5]	Canada	HyRAM, SAFETI, Bow-tie diagrams
HRS, FA, CA, Aspetti economici	Ade, Wilhite et al. (2020)	[7]	USA	Approccio integrato, Python
HRS, QRA, FA, CA	Zhang, Qiu et al. (2022)	[37]	Cina	HyRAM, PHAST
HRS in area urbana, SR	Jeon, Kim et al. (2023)	[38]	Corea del Sud	HyRAM, PHAST
HRS onsite, ETA, RA	Tsunemi, Kihara et al. (2019)	[39]	Giappone	FLACS

HRS, Analisi qualitativa	Kikukawa, Yamaga et al. (2008)	[40]	Giappone	Approccio qualitativo
HRS, CFD	Kim, Park et al. (2013)	[41]	Corea del Sud	FLACS

Tabella 6: Presentazione studi raccolti e relative caratteristiche

3.1 Casi studio rilevanti

Il primo studio che si intende illustrare è stato realizzato da Kwak et al. (2023) e presentato in *Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station in an Urban Area* [19]. L'opera si concentra sulla valutazione di una HRS *offsite* situata in un centro urbano, realizzata con la volontà di dimostrare la sicurezza legata alla presenza in un'area densamente abitata di un impianto di questo tipo; la QRA è stata condotta mediante il supporto di HyRAM e PHAST. Il lavoro in questione è solamente uno dei molteplici studi di questo tipo condotti negli ultimi anni in Corea del Sud, a conferma dei forti investimenti realizzati dal governo coreano per lo sviluppo della filiera dell'idrogeno e per la diffusione delle strutture necessarie. Si precisa che viene dedicato ampio spazio all'opera in questione, in quanto si ritiene che rappresenti un ottimo riferimento esemplificativo della realizzazione di una QRA in tale ambito.

L'impianto analizzato si trova nei pressi di diversi complessi residenziali nella località di Yeoui-doing (Seoul, Corea del Sud); si riporta la configurazione della zona nella figura seguente.



Figura 34: Posizione della stazione e dei complessi residenziali adiacenti [19]

Le simulazioni sono state condotte considerando condizioni meteorologiche 1.5/F, corrispondenti ad un vento debole e ad una stabilità atmosferica molto elevata, con temperatura di 25 °C. L'attenzione è stata concentrata sulla valutazione degli scenari legati a due particolari componenti del sistema: carro bombolaio (responsabile della fornitura di idrogeno all'impianto) e serbatoio per lo stoccaggio dell'idrogeno. Si riportano nella tabella successiva le caratteristiche degli elementi considerati, le loro condizioni di lavoro e le peculiarità dei relativi scenari di rilascio; i valori legati ai fenomeni di perdita riportati sono stati tratti da HyRAM in base alle caratteristiche definite.

		Carro bombolaio	Serbatoio di stoccaggio
Caratteristiche	Pressione [MPa]	20	80
	Temperatura [°C]	15	15
	Volume [m ³]	22.82	26.3
Scenario	Dimensione perdita	Small leak [mm]	0.4
		Medium leak [mm]	4.02
		Large [mm]	12.7
	Portata di rilascio	Small leak [kg/s]	1.30×10^{-3}
		Medium leak [kg/s]	1.31×10^{-1}
		Large leak [kg/s]	1.71
	Diametro dell'orifizio [mm]		7.92
			7.16

Tabella 7: Dati relativi agli scenari accidentali tratti da HyRAM [19]

I due fenomeni consequenziali al rilascio indesiderato di idrogeno tenuti in considerazione nel prosieguo dell'analisi sono il *jet fire* (individuato come scenario più probabile mediante HyRAM) e l'esplosione; sono stati quindi impiegati HyRAM e PHAST per la determinazione e la valutazione delle aree influenzate dalle conseguenze di tali fenomeni, rispettivamente per *jet fire* ed esplosione. In particolare, l'interesse si è concentrato sull'individuazione delle zone di raggiungimento dei livelli d'intensità di irraggiamento termico [kW/m²] e di sovrappressione [kPa] indicati nella tabella seguente.

	Intensità dell'irraggiamento termico	Sovrappressione da esplosione
Soglie di interesse	5 kW/m ²	5 kPa
	12.5 kW/m ²	14 kPa
	35 kW/m ²	20 kPa

Tabella 8: Soglie di interesse considerate per l'irraggiamento termico e la sovrappressione [19]

Come già anticipato, il rischio legato al *jet fire* è stato modellato mediante HyRAM, definendo dieci punti di valutazione del flusso termico; si riportano nelle figure sottostanti i grafici utili alla visualizzazione dei livelli di irraggiamento termico raggiunti in funzione della distanza dal punto di origine del rilascio per i due elementi del sistema considerati. Per una valutazione maggiormente approfondita dei risultati grafici ottenuti nel corso dell'analisi si rimanda all'articolo originario, Ref. [19].

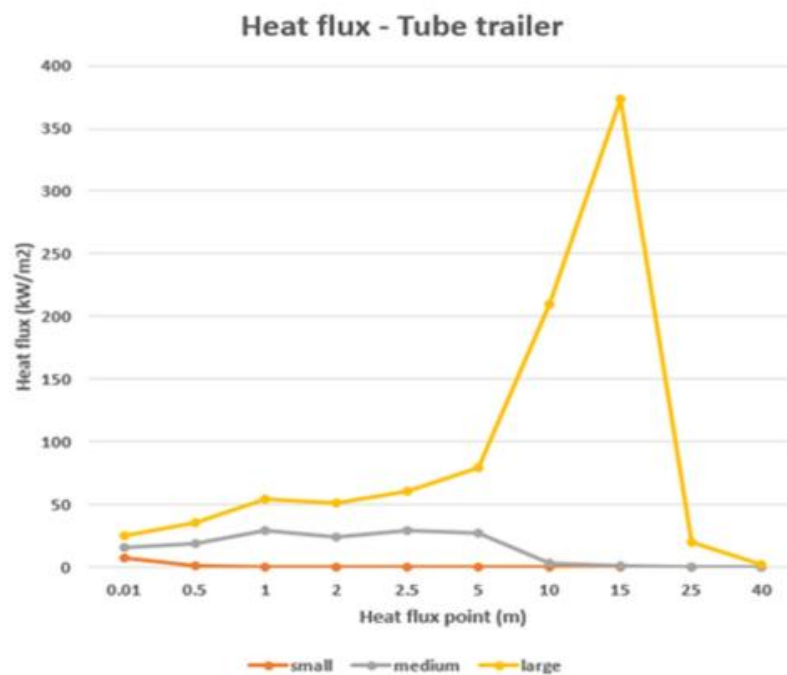


Figura 35: Intensità di irraggiamento termico nei punti di calcolo definiti per il carro bombolaio [19]

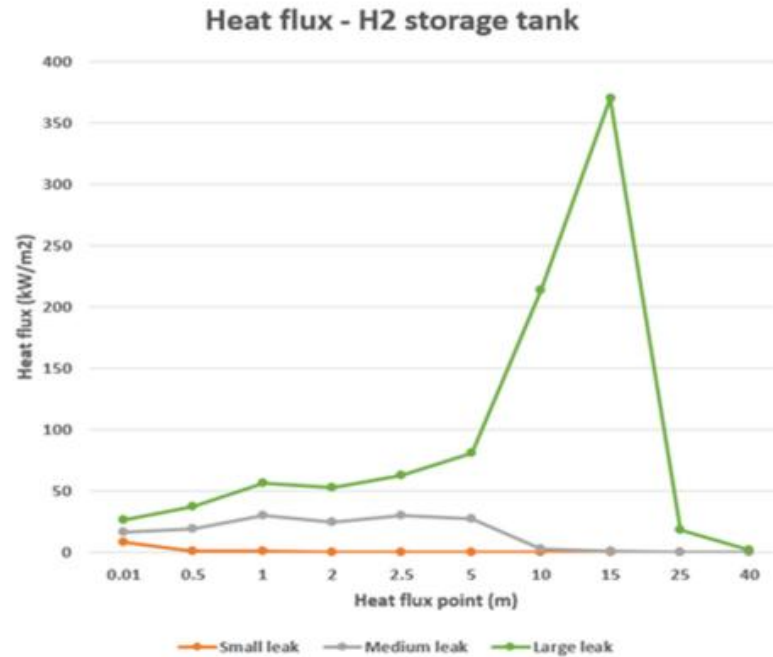


Figura 36: Intensità di irraggiamento termico nei punti di calcolo definiti per il serbatoio di stoccaggio [19]

Gli esiti ottenuti per i due elementi non si differenziano molto l'uno dall'altro, in quanto la differenza nella pressione di esercizio viene compensata da quella nel diametro dell'orifizio, ottenendo portate di rilascio simili. Si evince chiaramente che per gli scenari *small leak* e *medium leak* l'intensità decresce fortemente in prossimità dei 10 m di distanza dall'origine, mentre entro i 5 m il rischio di mortalità è molto elevato se una persona resta esposta per più di un minuto. Nonostante ciò, gli autori hanno giudicato il rischio accettabile considerando la presenza di barriere protettive. Per quanto concerne l'esterno dell'impianto, questo non sembra interessato dal flusso di calore radiante derivante da perdite di piccole o medie dimensioni. Lo scenario *large leak* presenta invece effetti deleteri, determinando un irraggiamento termico molto intenso fino a 25 m dall'origine e presentando un evidente picco in prossimità dei 15 m; ciò viene ritenuto tollerabile in quanto la probabilità di accadimento dello scenario in questione risulta minima. Si può dunque concludere che lo studio evidenzia la sicurezza di un impianto di questo tipo, anche se posto in un'area urbana, nel caso in cui si considerino i soli effetti di un potenziale *jet fire* [19].

L'analisi dei livelli di sovrappressione raggiunti è stata condotta anch'essa con l'impiego combinato di HyRAM e PHAST; quest'ultimo ha permesso la determinazione delle aree di influenza dei livelli di interesse, le quali rappresentano la base di partenza per la

successiva applicazione del metodo francese di pianificazione dell'uso del suolo (*French Land Use Planning Method*), ideato per gestire e controllare l'urbanizzazione attorno agli stabilimenti a rischio di incidente rilevante identificati dalla direttiva Seveso. A tal fine si fa riferimento sui livelli suggeriti in *Guidance on Land-Use Planning, the Siting of Hazardous Activities and related Safety Aspects* [42], i quali risulteranno pertanto presenti nelle legende delle figure e nelle tabelle seguenti.

Si illustrano nelle immagini sottostanti le aree ottenute mediante PHAST relativamente alla sovrappressione generata a partire dal rilascio in corrispondenza di carro bombolaio e serbatoio di stoccaggio, considerando due scenari distinti: *large leak* e rottura catastrofica.

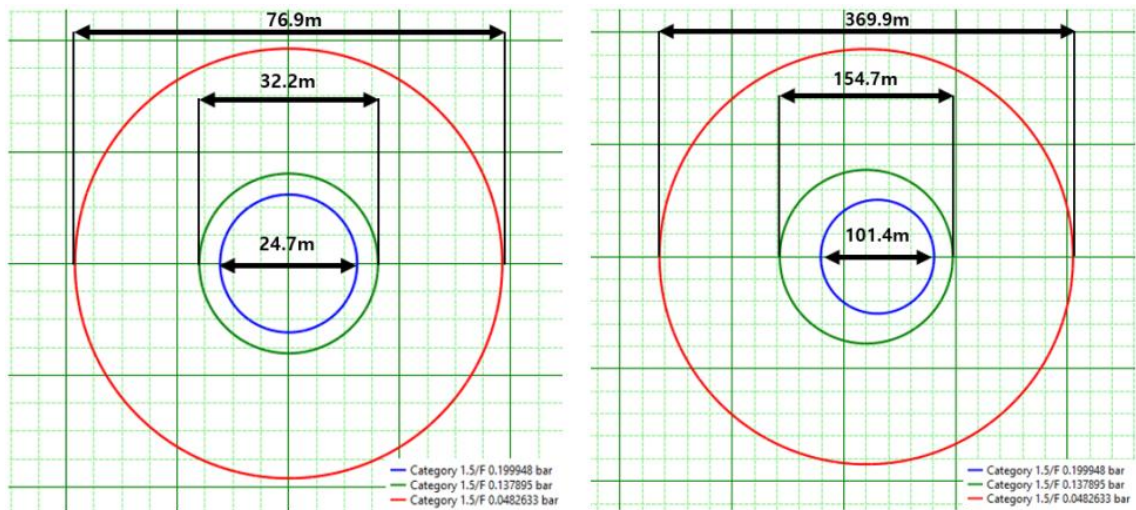


Figura 37: Aree di influenza soglie di interesse sovrappressione per *large leak* (sx) e rottura catastrofica (dx) a partire dal carro bombolaio [19]

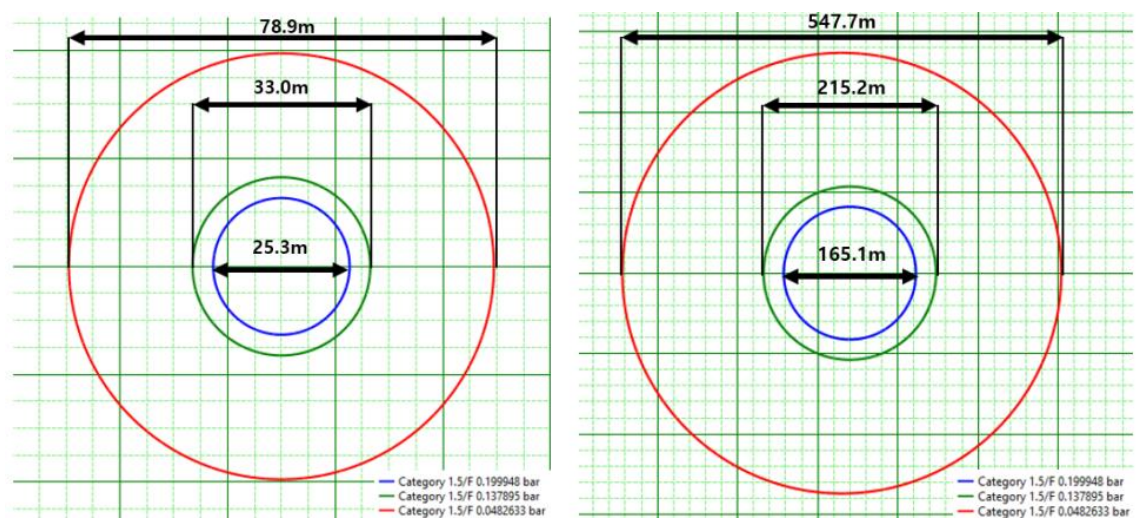


Figura 38: Aree di influenza soglie di interesse sovrappressione per *large leak* (sx) e rottura catastrofica (dx) a partire dal serbatoio di stoccaggio [19]

Considerando l'area in cui sorge la stazione in esame e l'estensione dell'impianto, pari a 1236 m², gli autori sono stati in grado di determinare il numero di persone interessate dai diversi livelli di sovrappressione per ciascuno degli scenari considerati; si riportano dunque i valori ottenuti e le categorie considerate in termini di gravità e frequenza, tratte da [42], nelle tabelle seguenti.

<i>Componente</i>	<i>Scenario</i>	Sovrappressione [mbar]	Diametro [m]	Popolazione [Persone]	Livello Gravità
<i>Carro bombolaio</i>	Large leak	50	76.9	13.4	Major
		140	32.2	0.0	Moderate
		200	24.7	0.0	Moderate
<i>Serbatoio stoccaggio</i>	Large leak	50	78.9	14.3	Major
		140	33	0.0	Moderate
		200	25.3	0.0	Moderate

Tabella 9: Numero di persone coinvolte nello scenario large leak [19]

<i>Componente</i>	<i>Scenario</i>	Sovrappressione [mbar]	Diametro [m]	Popolazione [Persone]	Livello Gravità
<i>Carro bombolaio</i>	Rottura catastrofica	50	369.9	416.3	Catastrophic
		140	154.7	68.8	Catastrophic
		200	101.4	26.8	Disastrous
<i>Serbatoio stoccaggio</i>	Rottura catastrofica	50	547.7	918.5	Catastrophic
		140	215.2	137.7	Disastrous
		200	165.1	79.1	Disastrous

Tabella 10: Numero di persone coinvolte nello scenario rottura catastrofica [19]

Livello Gravità	Effetti letali al 5%	Effetti letali all'1%	Effetti irreversibili
<i>Disastrous</i>	Più di 10	Più di 100	Più di 1000
<i>Catastrophic</i>	1-10	10-100	100-1000
<i>Major</i>	1	1-10	10-100
<i>Serious</i>	0	1	1-10

Moderate	0	0	Meno di 1
----------	---	---	-----------

Tabella 11: Livelli di gravità definiti in Ref. [42]

Classe	Frequenza qualitativa	Frequenza quantitativa
E	Scenario estremamente improbabile	Meno di 10^{-5} eventi/anno
D	Scenario realistico ma improbabile	Meno di 10^{-4} eventi/anno
C	Scenario difficilmente probabile	Meno di 10^{-3} eventi/anno
B	Scenario probabile	Meno di 10^{-2} eventi/anno
A	Scenario frequente	Meno di 10^{-1} eventi/anno

Tabella 12: Classi di frequenza riportate in Ref. [42]

		Frequency Class				
		E	D	C	B	A
Gravity level	Disastrous	NO MMR2	NO	NO	NO	NO
	Catastrophic	MMR1	MMR2	NO	NO	NO
	Major	MMR1	MMR1	MMR2	NO	NO
	Serious	OK	OK	MMR1	MMR2	NO
	Moderate	OK	OK	OK	OK	MMR1

Notes: Red (NO): unacceptable risk; green (OK): acceptable risk, i.e., the hazardous facility can operate without additional safety measures; orange (NO for the future / MMR2 for the existing buildings): no more than five dangerous phenomena can be placed in these cells after the operator has taken all measures to reduce the risk; yellow (MMR1): a permit to operate a hazardous facility can be issued after all practicable safety measures have been implemented.

Figura 39: Matrice di definizione del livello di accettabilità del rischio, tratta da [42]

L'analisi del rischio realizzata da Kwak et al. [19] si è quindi conclusa definendo accettabili le condizioni di funzionamento della stazione in esame, risultando soddisfatta la condizione suggerita in [42] secondo cui “in queste celle non possono essere collocati più di cinque fenomeni pericolosi”, poiché nelle celle MMR2 si collocano solamente due scenari relativi alla rottura catastrofica e due scenari relative al *large leak*. Lo studio illustrato finora rappresenta dunque un ottimo esempio di QRA e di potenzialità derivanti dall'impiego dei software disponibili, oltre a costituire un riferimento autorevole nell'ambito della sicurezza delle HRS in un centro urbano.

Osservate nel dettaglio le modalità d'attuazione di alcune tecniche per la realizzazione di una valutazione del rischio quantitativa, risulta possibile spostare l'attenzione su un'altra opera, particolarmente interessante per l'applicazione di HAZOP, FMEA e dell'ETA

(*Event Tree Analysis*), oltre che per l'impiego di PHAST e SAFETI per la determinazione dell'*Individual Risk* in determinati punti dell'impianto. Lo studio in questione risulta adeguatamente illustrato dagli autori Suzuki et al. in *Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model* (2021) [10] e si concentra sulla realizzazione di una QRA completa seguendo le indicazioni procedurali fornite dal report di DNV-GL e dal *Purple Book* di *Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek* (TNO); la metodologia risulta corrispondere a quella già presentata in *Figura 21*.

Il modello di stazione considerato rappresenta una tipica HRS *offsite* giapponese e l'impianto risulta strutturato come rappresentato nella figura seguente, nella quale vengono messi in evidenza anche i punti di origine delle perdite e i punti (in blu scuro) di valutazione del rischio (*Risk Ranking Point, RRP*).

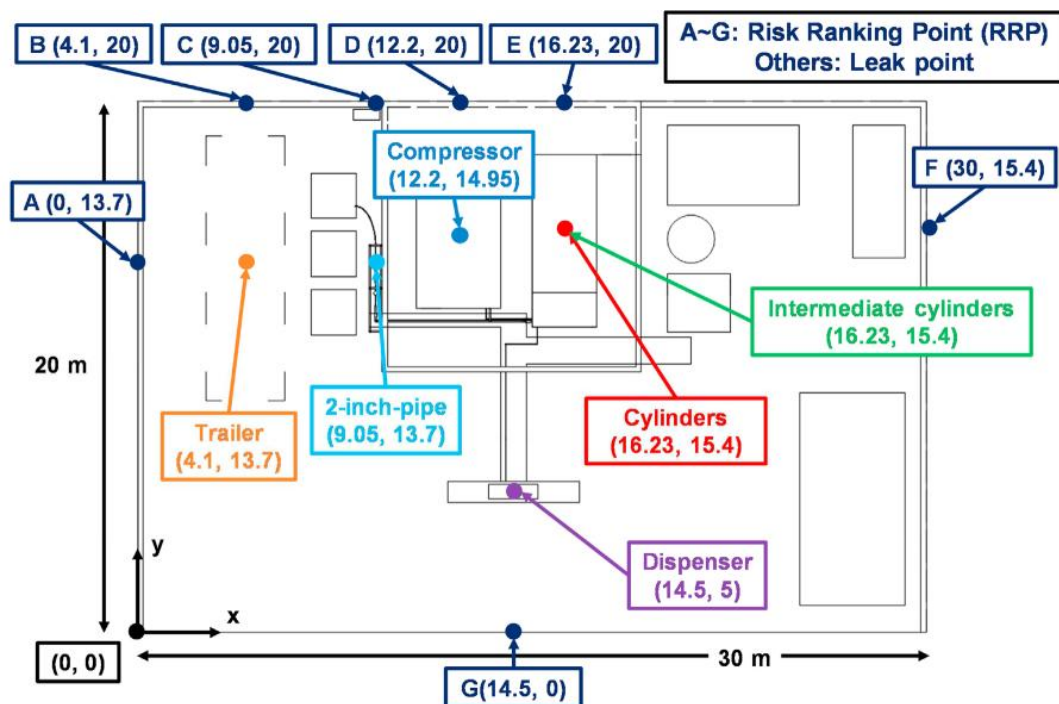
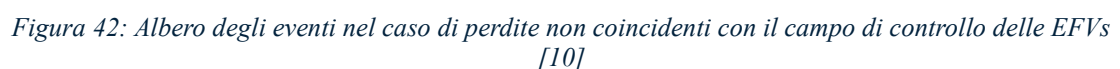


Figura 40: Layout della HRS analizzata e rappresentazione dei punti di rilascio e di quelli di valutazione del rischio [10]

Al fine di condurre un'accurata fase di *Hazard Identification* e di selezionare gli scenari accidentali potenziali è stato inizialmente definito un *piping and instrumentation diagram* (P&ID) ed è stato poi suddiviso in diversi nodi; ciascun nodo risulta a sua volta ridiviso in una serie di nodi minori in corrispondenza delle valvole di controllo (*excess flow valves, EFV*) e delle valvole di chiusura automatica (*auto shut-off valves*), in modo che i parametri che determinano la fuga di idrogeno (temperatura e pressione) possano essere

Definito ciò, sono stati considerati due alberi degli eventi (*Event tree*, ET): il primo descrive lo sviluppo degli eventi in caso di perdite che si verificano all'interno del campo di funzionamento della EFV, il secondo è relativo agli eventi in caso di altre perdite. Si riportano gli alberi in questione nelle figure seguenti.



Una volta costruiti gli ET, questi sono stati impiegati per la determinazione delle frequenze di accadimento degli scenari presenti, considerando il rilascio di idrogeno come evento iniziatore. Gli autori hanno deciso di assumere le frequenze di fuoriuscita pari alle frequenze di guasto dei componenti, traendo quest'ultime dai valori riportati da *Sandia National Laboratories*; si hanno così a disposizione le frequenze di guasto per nove tipologie di componenti (compressori, cilindri, filtri, flange, tubi flessibili, giunzioni, tubazioni, valvole e strumenti) e, per ognuno di essi, le frequenze di perdita per cinque diametri distinti (rottura, grande, medio, piccolo e molto piccolo). Assunto ciò, i tassi di occorrenza degli eventi finali individuati nella fase precedente sono stati opportunamente calcolati a partire dalla frequenza degli eventi iniziatori e dalle probabilità di ciascuna diramazione presente nell'ET. All'interno dell'analisi svolta in Ref. [10] è stata tenuta in considerazione anche la probabilità di mancato intervento su richiesta (*Probability of Failure on Demand*, PFD), ossia la possibilità che un sistema (come una valvola) progettato per intervenire al momento della domanda non riesca a farlo. In particolare, tale fattore risulta influente nel calcolo delle frequenze finali ed è stato pertanto considerato nell'analisi, assumendo dei valori congrui tratti da documentazione tecnica del settore, spesso facendo riferimento a strumentazioni solitamente operanti in contesti diversi dalle HRS, presentando maggiori dati affidabili. Si riportano due dati interessanti tratti dallo studio in questione [10], quali:

- PFD *gas leak detector*: 3.3×10^{-2} [-];
- PFD *auto shut-off valve*: 3.3×10^{-2} [-].

Ulteriori probabilità legate ad eventi specifici (accensione immediata, accensione ritardata, ecc.) sono state tratte ancora una volta dai dati forniti da Sandia.

Per quanto concerne l'analisi delle conseguenze, le zone di pericolo per *jet fire*, *flash fire* e VCE sono state determinate (mediante l'impiego di PHAST) rispettivamente come inviluppi di fiamma, zone di livello dell'intensità di irraggiamento termico e zone di livello di sovrappressione; i risultati ottenuti sono stati opportunamente validati mediante il confronto con i risultati sperimentali derivanti da studi pregressi. Le condizioni utilizzate nelle simulazioni vengono riassunte nella figura seguente.

Pasquill stability	D	Relative humidity	0.7
Wind speed	1.5 m/s	Solar radiation flux	0.5 kW/m ²
Wind direction	16	Leak point height	1 m
Atmospheric temperature	9.85 °C	Reference height	1 m

Figura 43: Condizioni simulate per l'analisi delle conseguenze [10]

Realizzata dunque un'accurata analisi delle conseguenze, il lavoro è proseguito con la determinazione delle zone caratterizzate da determinati livelli di IR, realizzata definendo il rischio individuale relativo ad ogni scenario considerato come il prodotto tra il tasso di occorrenza e la letalità dello scenario stesso; per la stima della letalità gli autori hanno seguito le indicazioni proposte nel *Purple Book* di TNO. Si illustra nella figura seguente il risultato finale dell'analisi del rischio quantitativa svolta in Ref. [10].

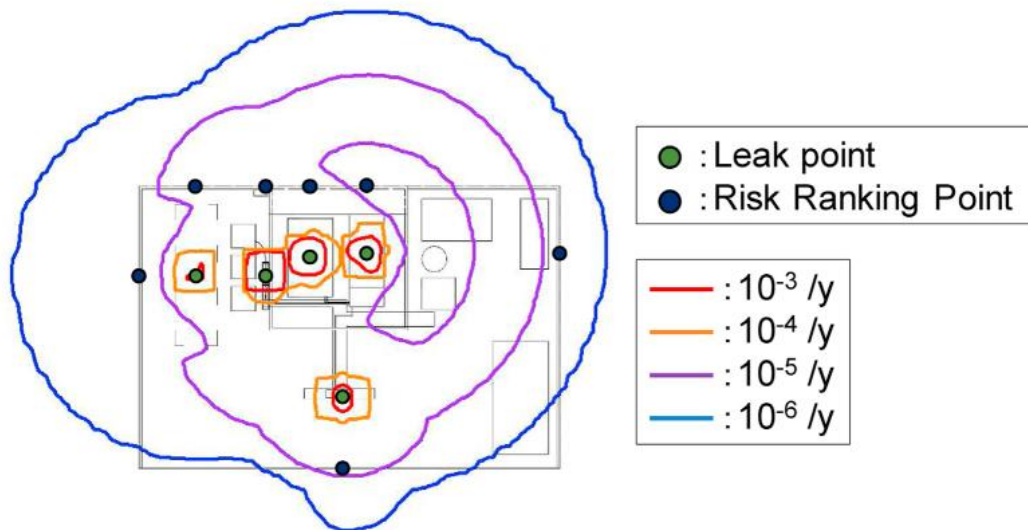


Figura 44: Zone del layout impiantistico caratterizzate da determinati livelli di IR [10]

Dalla figura proposta emerge l'inaccettabilità del rischio derivante dall'attività dell'impianto, in quanto diverse zone interne sono caratterizzate da un rischio maggiore o uguale a 10^{-4} eventi/anno e diverse zone esterne all'impianto da un rischio maggiore o uguale a 10^{-6} eventi/anno, superando di fatto i valori soglia di IR definiti rispettivamente per gli operatori e per le persone esterne. Inoltre, risulta emergere con chiarezza dallo studio realizzato che, nel caso delle HRS, i fenomeni di *jet fire* sono responsabili del 90% dei rischi. Nonostante ciò, gli autori precisano che i risultati ottenuti sono figli delle assunzioni fatte con approccio ampiamente conservativo e che non sono state considerate nelle simulazioni le mitigazioni date dalla tridimensionalità delle strutture dell'impianto. Risultati più approfonditi riguardo i valori di *individual risk* legati ai singoli scenari, ai singoli nodi o ai punti di interesse possono essere visualizzati all'interno delle tabelle proposte nell'articolo citato.

Terminata dunque la presentazione dell'analisi volta in Ref. [10] si intende procedere illustrando lo studio realizzato e presentato da Kwak et al. in *Assessing the Quantitative Risk of Urban Hydrogen Refueling Station in Seoul, South Korea, Using SAFETI Model*

(2024) [9]. Si è scelto di concentrare l'attenzione sul suddetto studio per due motivi principali: permette di rimarcare l'importanza dell'analisi del rischio nello sviluppo di stazioni di rifornimento in aree urbane e introduce alcuni concetti legati all'analisi degli strati di protezione (*Layer of Protection Analysis*, LOPA) non ancora discussi nella trattazione. Il lavoro si propone infatti di realizzare la QRA di una stazione *offsite* situata in un centro urbano, sfruttando le potenzialità di SAFETI e concentrandosi sulla valutazione delle conseguenze; l'intero approccio mira alla quantificazione dell'impatto di una valvola agente da *Active IPL (Individual Protection Layer)* e alla successiva determinazione dei requisiti necessari, in termini di strumenti mitigativi, per garantire i livelli ALARP.

Si riportano sinteticamente nella figura e nelle tabelle seguenti la vista satellitare della posizione della stazione, situata nel *Seosomun Government Complex* nella zona sud di Seoul, le caratteristiche operative, i diametri di rilascio e i tassi di occorrenza dei vari scenari di perdita relativi a diversi elementi del sistema. Si precisa che le ultime due tipologie di dati sono state tratte dai report di SNL.

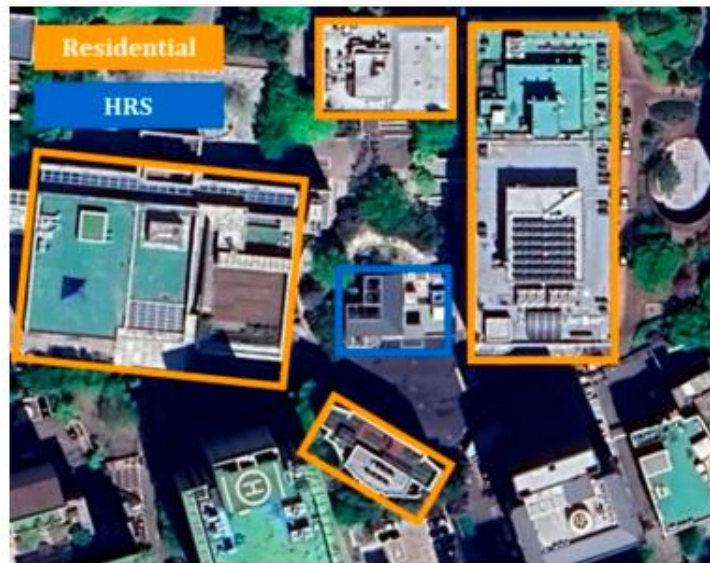


Figura 45: Vista satellitare dell'impianto [9]

<i>Elemento</i>	Pressione operativa [bar]	Temperatura operativa [°C]	Massa contenuta [kg]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	870	21	72.6
<i>Serbatoio a media pressione</i>	630	21	85.7

<i>carro bombolaio</i>	200	21	200
------------------------	-----	----	-----

Tabella 13: Caratteristiche operative dell'impianto [9]

<i>Elemento</i>	Scenario accidentale	Diametro di rilascio [mm]	Frequenza di perdita [anno⁻¹]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	Rottura catastrofica	-	5.00×10^{-7}
	Large leak	7.16	1.02×10^{-4}
	Medium leak	2.26	2.09×10^{-4}
	Small leak	0.72	1.23×10^{-3}
<i>Serbatoio a media pressione</i>	Rottura catastrofica	-	5.00×10^{-7}
	Large leak	7.92	1.02×10^{-4}
	Medium leak	2.50	2.09×10^{-4}
	Small leak	0.79	1.23×10^{-3}
<i>Carro bombolaio</i>	Rottura catastrofica	-	5.00×10^{-7}
	Large leak	12.70	1.80×10^{-4}
	Medium leak	4.02	3.21×10^{-4}
	Small leak	1.27	4.14×10^{-4}

Tabella 14: Diametri di rilascio e frequenze di accadimento per gli elementi considerati [9]

Le informazioni relative alle frequenze di accadimento sono state impiegate confrontandole con quelle legate ad alcuni elementi tipici delle classiche stazioni di servizio e tratte dal *Purple Book* del *National Institute for Public Health and the Environment* (RIVM), scegliendo opportunamente gli scenari da confrontare affinché fossero caratterizzati da diametri simili. La comparazione ha evidenziato che gli elementi delle HRS sono contraddistinti tipicamente da tassi di perdita più elevati, sottolineando l'importanza di effettuare QRA accurate.

Si riportano di seguito i dati relativi alle portate di rilascio considerate nel prosieguo dell'analisi.

Elemento	Large Leak [kg/s]	Medium Leak [kg/s]	Small Leak [kg/s]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	1.63	0.16	0.02
<i>Serbatoio a media pressione</i>	1.50	0.15	0.02
<i>Carro bombolaio</i>	1.32	0.13	0.01

Tabella 15: Portate di rilascio per i vari elementi e i vari scenari di perdita [9]

Definite le condizioni climatiche in modo da garantire lo scenario peggiore possibile e la densità abitativa in base alle fasce orarie considerate, gli autori hanno scelto di valutare quantitativamente l'impatto di una valvola di intercettazione (*shutoff valve*) come *active independent protection layer*, in quanto la valutazione degli effetti legati ad una valvola di ritegno (*check valve*) e ad una valvola di eccesso di flusso (*excess flow valve*) sarebbero stati difficilmente quantificabili dati i *failure probability* e *operating time* relativi fortemente ridotti. Si riportano nella tabella seguente i valori caratteristici per le tre tipologie di dispositivo.

Valvola	Failure Probability [anno⁻¹]	Operating time [s]
Check valve	9×10^{-4}	0
Excess flow valve	9×10^{-4}	0.1
Shutoff valve	1.1×10^{-1}	30

Tabella 16: Probabilità di fallimento e tempo per l'intervento per le tre tipologie di valvole [9]

L'analisi delle conseguenze è stata realizzata, come già anticipato, mediante il supporto di SAFETI con la volontà di definire le zone di raggiungimento dei valori soglia di intensità di irraggiamento termico e di sovrappressione a seguito dei fenomeni conseguenziali al rilascio di idrogeno dagli elementi del sistema. La CA risulta cruciale per la successiva definizione dell'IR e del SR e conseguentemente per la valutazione degli effetti dei dispositivi mitigativi. Si sottolinea che gli autori in questo caso hanno fatto riferimento ai valori forniti da SNL anche per le portate di rilascio e le conseguenti probabilità di accensione. Si riportano i risultati ottenuti nello studio delle conseguenze in termini di ampiezza delle zone interessate a seguito di: *jet fire* e VCE legati a scenari di perdita e *fireball* e VCE legati ad una rottura catastrofica.

<i>Elemento</i>	Dimensione perdita	Lunghezza fiamma [m]	Distanza sottovento Irr. Termico 4 kW/m² [m]	Distanza sottovento Irr. Termico 12.5 kW/m² [m]	Distanza sottovento Irr. Termico 37.5 kW/m² [m]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	Large	21.07	34.28	25.95	21.28
	Medium	7.32	11.19	8.52	6.81
	Small	2.53	3.28	-	-
<i>Serbatoio a media pressione</i>	Large	20.53	33.57	25.34	20.74
	Medium	7.14	10.92	8.30	6.61
	Small	2.45	3.16	-	-
<i>Carro bombolaio</i>	Large	19.88	33.22	24.97	20.29
	Medium	6.95	10.85	8.19	6.49
	Small	2.39	3.15	-	-

Tabella 17: Risultati CA legati al jet fire a seguito di scenari di perdita [9]

<i>Elemento</i>	Dimensione perdita	Centro esplosione [m]	Diametro sovrapp. 1 psi [m]	Diametro sovrapp. 3 psi [m]	Diametro sovrapp. 5 psi [m]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	Large	40	35.55	15.24	11.05
	Medium	20	8.03	3.44	2.50
<i>Serbatoio a media pressione</i>	Large	40	34.99	15.00	10.88
	Medium	10	7.50	3.21	2.33
<i>Carro bombolaio</i>	Large	40	33.36	14.30	10.37
	Medium	10	7.25	3.11	2.25

Tabella 18: Risultati CA legati alla VCE a seguito di scenari di perdita [9]

<i>Elemento</i>	Diametro fireball [m]	Distanza sottovento Irr. Termico 4 kW/m² [m]	Distanza sottovento Irr. Termico 12.5 kW/m² [m]	Distanza sottovento Irr. Termico 37.5 kW/m² [m]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	12.10	100.24	57.58	33.02
<i>Serbatoio a media pressione</i>	12.79	105.58	60.91	34.80
<i>Carro bombolaio</i>	16.96	137.87	80.37	45.48

Tabella 19: Risultati CA legati a fireball a seguito di rottura catastrofica [9]

<i>Elemento</i>	Centro esplosione [m]	Diametro sovrap. 1 psi [m]	Diametro sovrap. 3 psi [m]	Diametro sovrap. 5 psi [m]
<i>Serbatoio ad alta pressione</i>	10	81.69	35.20	25.33
<i>Serbatoio a media pressione</i>	10	86.96	37.24	29.85
<i>Carro bombolaio</i>	20	113.18	47.13	34.38

Tabella 20: Risultati CA legati a VCE a seguito di rottura catastrofica [9]

I risultati appena esposti, uniti ai dati di riferimento riportati in *Tabella 13* e *Tabella 14*, rappresentano un ottimo confronto per gli altri studi realizzati o per eventuali analisi future.

Il calcolo dell'*individual risk* è stato conseguentemente realizzato da Kwak et al. [9] moltiplicando la frequenza degli eventi, definiti dagli scenari accidentali, con la probabilità che tali eventi causino decessi; il metodo coincide con quello già impiegato

nel Ref. [10]. Si riportano di seguito i valori ottenuti dagli autori per i vari scenari considerati.

<i>Caso</i>	Elemento	Rischio [anno⁻¹]	Percentuale [%]
<i>Shutoff valve assente</i>	HP Serbatoio	1.67×10^{-5}	26.72
	MP Serbatoio	1.63×10^{-5}	26.17
	Carro bombolaio	2.93×10^{-5}	47.11
	Totale	6.24×10^{-5}	100
<i>Presenza shutoff valve singola</i>	HP Serbatoio	1.82×10^{-6}	26.77
	MP Serbatoio	1.78×10^{-6}	26.13
	Carro bombolaio	3.20×10^{-6}	47.10
	Totale	6.80×10^{-6}	100
<i>Presenza shutoff valve doppia</i>	HP Serbatoio	2.00×10^{-7}	26.77
	MP Serbatoio	1.96×10^{-7}	26.13
	Carro bombolaio	3.52×10^{-7}	47.10
	Totale	7.48×10^{-7}	100

Tabella 21: IR legati ai vari scenari e alla presenza di dispositivi mitigativi [9]

Emerge chiaramente che la presenza di una valvola singola riduce di circa un ordine di grandezza l'IR totale rispetto al caso caratterizzato dall'assenza di valvole di intercettazione; stessa evidenza si denota nel caso di installazione di una valvola doppia rispetto ad una singola. Inoltre, risulta evidente che, a prescindere dalla presenza e dalla tipologia di sistemi per la mitigazione, il carro bombolaio apporta un contributo significativo al rischio totale, essendo ad esso relativo circa il 47% del totale.

A seguito della determinazione dei risultati succitati, sono stati calcolati i livelli complessivi di *individual risk* per gli operatori e per le persone esterne, così da poterli confrontare con le soglie suggerite da HSE (*Health and Safety Executive*) nella guida ai livelli ALARP; in particolare, HSE definisce due valori soglia: 1×10^{-3} per gli operatori e 1×10^{-4} per le persone esterne all'impianto. I rischi per le varie casistiche vengono illustrati nella tabella seguente.

Caso	Categoria	Total Risk Integral
<i>Shutoff valve assente</i>	Operatori	6.16×10^{-5}
	Persone esterne	7.91×10^{-7}
<i>Presenza shutoff valve singola</i>	Operatori	6.75×10^{-6}
	Persone esterne	5.21×10^{-8}
<i>Presenza shutoff valve doppia</i>	Operatori	7.43×10^{-7}
	Persone esterne	5.73×10^{-9}

Tabella 22: Rischio individuale totale per operatori e persone esterne nei vari casi [9]

Il rischio totale per entrambe le categorie risulta accettabile anche senza l'impiego di sistemi mitigativi. Nonostante ciò, in caso di assenza di valvole di intercettazione il rischio per le persone esterne risulta ampiamente accettabile, mentre il rischio per gli operatori risulta solamente accettabile. L'effetto dell'inserimento della valvola come *active IPL* comporta anche in questo caso una diminuzione dell'IR di circa un ordine di grandezza. Inoltre, mediante la rappresentazione dei contorni delle soglie di attenzione nei vari casi, accuratamente riportata in Ref. [9], si evidenzia che nel caso di installazione di una valvola di intercettazione doppia l'area caratterizzata da livelli di rischio non trascurabili (ossia $> 1 \times 10^{-9}$) risulta essere limitata alla zona dell'impianto, non interessando le mura esterne delle residenze circostanti.

Un ulteriore aspetto d'interesse presente nell'opera di Kwak et al. [9] risulta essere la determinazione del SR (*Social Risk*), concettualmente già trattato all'interno della presente trattazione. Viene in questo caso determinato sulla base della sommatoria dell'IR totale per gli elementi coinvolti negli scenari accidentali, tenendo conto del numero di vittime. Il grafico seguente riporta le curve F-N nei diversi casi a seconda del SR calcolato e i limiti ALARP superiore ed inferiore secondo le direttive olandesi, seguite dagli autori.

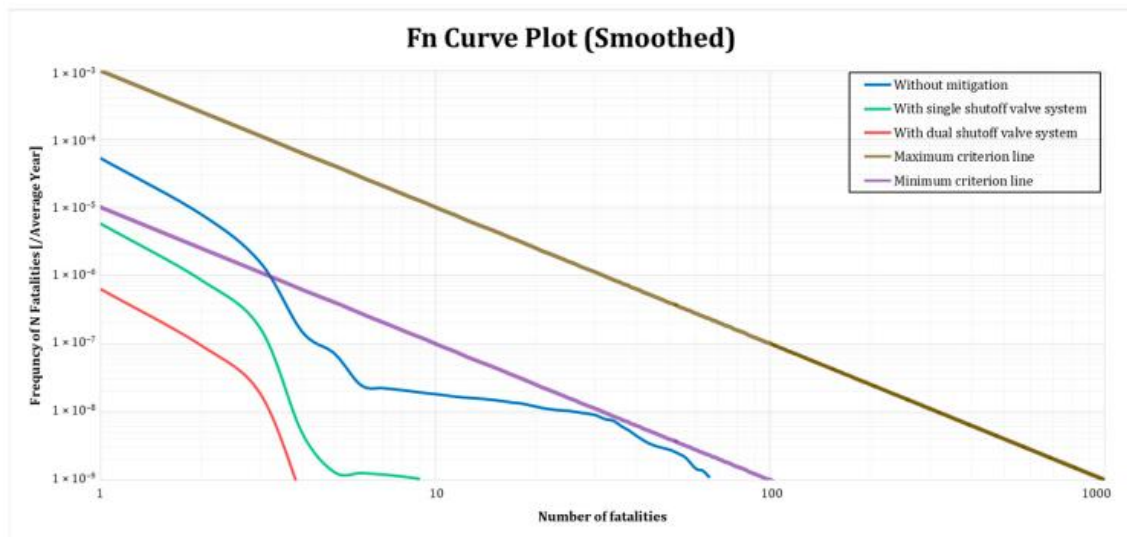


Figura 46: Curva F-N per i casi considerati [9]

Dalla rappresentazione grafica si evince che nel caso di assenza di valvole di intercettazione la curva corrispondente ricade all'interno dei limiti ALARP, con la probabilità di un decesso pari a 5.22×10^{-5} ; ciò sottolinea la necessità di impiegare sistemi mitigativi al fine di garantire il rispetto dei valori di soglia suggeriti. L'effetto dell'installazione di ciascun metodo di mitigazione risulta corrispondere anche in questo caso ad una diminuzione del rischio di circa un ordine di grandezza, permettendo conseguentemente di rientrare nella zona di cosiddetta ampia accettabilità del pericolo.

Gli studi presentati finora permettono dunque di osservare nel dettaglio le tecniche comunemente adottate per la realizzazione di analisi del rischio meticolose nell'ambito degli impianti operanti con l'idrogeno e più in particolare in quello delle *hydrogen refueling stations*. Nonostante questi rappresentino autorevoli esempi di opere realizzate nel settore, la lista di articoli contenenti l'illustrazione dei processi di applicazione dei metodi di valutazione del rischio alle HRS si sta espandendo rapidamente, rappresentando una tematica di forte interesse nei contesti accademici, ma anche in quelli industriali.

Tra gli altri articoli osservati merita menzione lo studio riportato da Park et al. in *Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station* (2021) [36], riguardante anch'esso la sicurezza delle stazioni poste in centri urbani, ma caratterizzato da un approccio diverso. Gli autori hanno infatti dapprima impiegato HyRAM+ per simulare 18 scenari accidentali legati a 6 componenti - carro bombolaio, stoccaggio di idrogeno ad alta pressione (82 MPa), stoccaggio di idrogeno a bassa pressione (40 MPa), dispenser, compressore, quadro

valvole di priorità - determinando diametro degli orifizi, portate di rilascio, frequenze di perdita e conseguenze in termini di irraggiamento termico e lunghezza di fiamma. In seguito, sono state condotte prove sperimentali simulando un *jet fire* al fine di comparare i risultati così ottenuti con quelli forniti dal software di SNL. Dal confronto così strutturato è emersa la maggiore conservatività dello strumento simulativo, il quale restituisce distanze di influenza maggiori. L'analisi quantitativa è stata poi conclusa con la determinazione dell'IR e del SR mediante l'impiego di RISKCURVES, evidenziando come in assenza di dispositivi mitigativi diversi rischi, per la struttura considerata e la disposizione degli edifici circostanti ipotizzata, ricadano pienamente nella zona ALARP (ed alcuni anche nella zona di non accettabilità). Le valutazioni effettuate hanno inoltre evidenziato che il carro bombolaio e il dispenser rappresentano gli elementi caratterizzati da un rischio maggiormente cospicuo. Si riportano sinteticamente i risultati dell'analisi condotta mediante RISKCURVES nella tabella seguente [36].

<i>Componente</i>	Distanza max [m]	Contributo [%]	Rischio
<i>Carro bombolaio</i>	26	47.3	1.11E-03
<i>Stoccaggio HP</i>	29	8.74	2.05E-04
<i>Stoccaggio LP</i>	23	1.69	3.97E-04
<i>Dispenser</i>	27	40.0	9.40E-04
<i>Compressore</i>	29	0.336	7.88E-06
<i>Quadro valvole</i>	29	1.9	4.47E-05

Tabella 23: Rischio di perdita di vita legato ai diversi componenti secondo RISKCURVES [36]

Un ulteriore contributo di rilievo è rappresentato dall'opera *Mitigating uncertainty: A risk informed approach for deploying hydrogen refueling stations* (2024) di Joshi et al. [5], nella quale viene realizzata un'approfondita analisi determinata all'identificazione delle distanze di sicurezza necessarie in una pseudo-HRS in Canada mediante l'utilizzo di HyRAM+ (SNL) e SAFETI (DNV). La stazione risulta divisa in tre aree distinte (*tube-trailer area TTA*, *hydrogen system area HSA* e *dispenser area DA*) e viene analizzata in due scenari distinti (rifornimento a 350 bar e rifornimento a 700 bar). Inizialmente sono state determinate le probabilità di accadimento di alcuni scenari (*explosion*, *jet fire*, ecc.) a partire dalle frequenze di guasto dei componenti fornite da HyRAM+ mediante la costruzione di un albero degli eventi. Particolarmente interessante risulta essere l'utilizzo

dei diagrammi a farfalla (*bowtie diagrams*) per la rappresentazione di uno scenario accidentale e dei relativi elementi di contorno: barriere di sicurezza, controlli per prevenirlo e risposte da adottare qualora si verificasse; se ne riporta un esempio nella figura seguente.

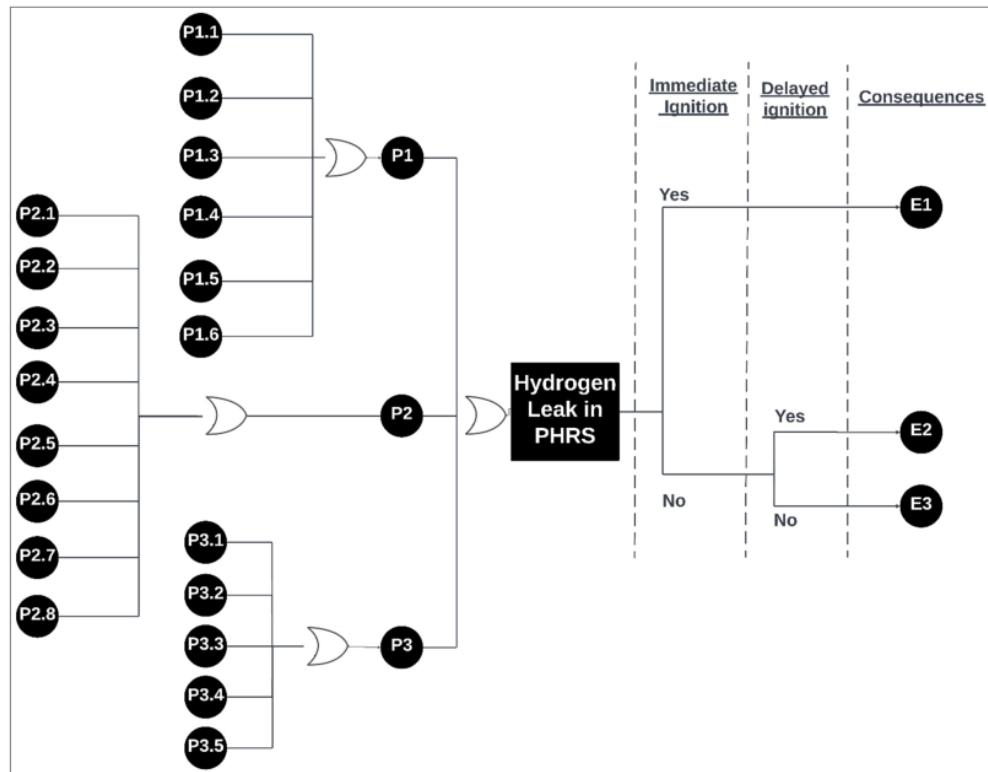


Figura 47: Diagramma a farfalla per una perdita di idrogeno nella stazione con visualizzazione delle possibili conseguenze [5]

Per la definizione delle distanze di sicurezza necessarie gli autori hanno scelto di far riferimento su una perdita del 10%, così da evitare sottovalutazioni del pericolo (probabili considerando perdite dello 0.1%) o sovradimensionamenti inefficienti (probabili considerando perdite del 100%). Conseguentemente è stata impiegata una matrice di rischio per la classificazione delle possibili conseguenze derivanti da una perdita di questo tipo; il *jet fire* è stato catalogato come intollerabile, mentre il *flash fire* come rischio indesiderato, evidenziando la necessità di elementi mitigativi [5]. Le distanze di sicurezza sono state individuate sulla base del limite massimo oltre il quale si verificano una delle seguenti condizioni: intensità dell'irraggiamento termico pari a 4.7 kW/m^2 o raggiungimento limite inferiore di infiammabilità (LFL) dell'idrogeno nell'aria. Il processo ha previsto anche la realizzazione di un'approfondita analisi delle conseguenze, con l'individuazione delle aree di influenza di vari scenari accidentali, e in seguito la valutazione dell'IR. Le distanze definite al termine dell'analisi risultano essere quelle

riportate nella tabella riepilogativa seguente. L'IR oltre queste distanze risulta pari a valori compresi tra 10^{-5} e 10^{-6} anno⁻¹ [5].

	Zona	Distanza di sicurezza [m]
<i>Scenario a 350 bar</i>	TTA	19
	HSA	11.8
	DA	28
<i>Scenario a 700 bar</i>	TTA	19
	HSA	16
	DA	39.1

Tabella 24: Distanze di sicurezza necessarie nelle varie zone dell'impianto [5]

Terminata la fase di identificazione delle distanze di sicurezza necessarie nelle varie zone per sottostare ai livelli di salvaguardia precedentemente definiti, Joshi et al. [5] hanno concentrato la propria attenzione sull'individuazione degli effetti di eventuali barriere di sicurezza sulle frequenze di accadimento caratteristiche del sistema analizzato; le tipologie considerate e le relative *Probability of Failure on Demand* (PFD) vengono riportate di seguito:

- *Gas detection system*, PFD = 0.001
- *Automatic shutdown system*, PFD = 0.49
- *Emergency ventilation*, PFD = 0.02

Si riporta il diagramma a farfalla conseguente all'adozione di tali sistemi mitigativi nella figura seguente e quindi la riduzione dei tassi di occorrenza di *jet fire* e *flash fire* nella *Tabella 24*.

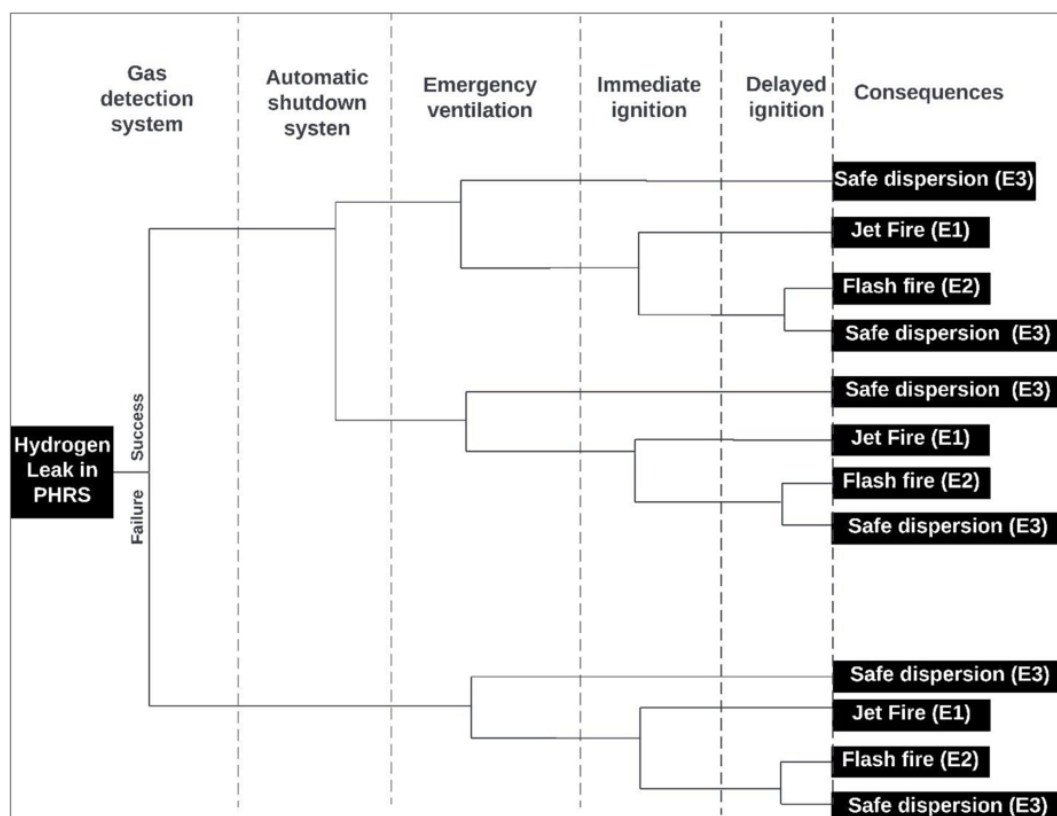


Figura 48: Diagramma bowtie a seguito della perdita con barriere di sicurezza [5]

	Senza barriere		Con barriere	
Leak size	Jet fire [anno ⁻¹]	Flash fire [anno ⁻¹]	Jet fire [anno ⁻¹]	Flash fire [anno ⁻¹]
10%	1.42E-04	3.84E-06	1.45E-06	6.98E-07

Tabella 25: Effetto delle barriere di sicurezza sulle frequenze di accadimento [5]

Gli effetti positivi conseguenti all'installazione delle barriere suddette risultano dunque essere evidenti.

Data l'importanza dell'aspetto economico nello sviluppo della filiera e nella diffusione delle tecnologie necessarie all'impiego dell'idrogeno, già sottolineata nella sezione introduttiva del lavoro, risulta utile l'osservazione dello studio realizzato da Ade et al. in *An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations* (2020) [7], nel quale il tema della progettazione sicura delle HRS viene approcciato tenendo fortemente conto degli aspetti economici, al fine di individuare delle strategie progettuali utili ad evitare un sovradimensionamento delle misure di sicurezza, che si manifesta frequentemente nella realizzazione degli impianti di questo tipo a causa della poca esperienza accumulata nell'ambito. L'opera si basa dunque su un approccio integrato

che coniuga gli aspetti riguardanti la progettazione dell'impianto a quelli relativi alla sicurezza del sistema e all'economia; il modello in questione è stato sviluppato mediante Python (3.6) ed è stato applicato ad un progetto di base di una stazione per valutarne il rischio associato e la fattibilità economica. Si riporta una rappresentazione schematica del modello nella figura seguente.

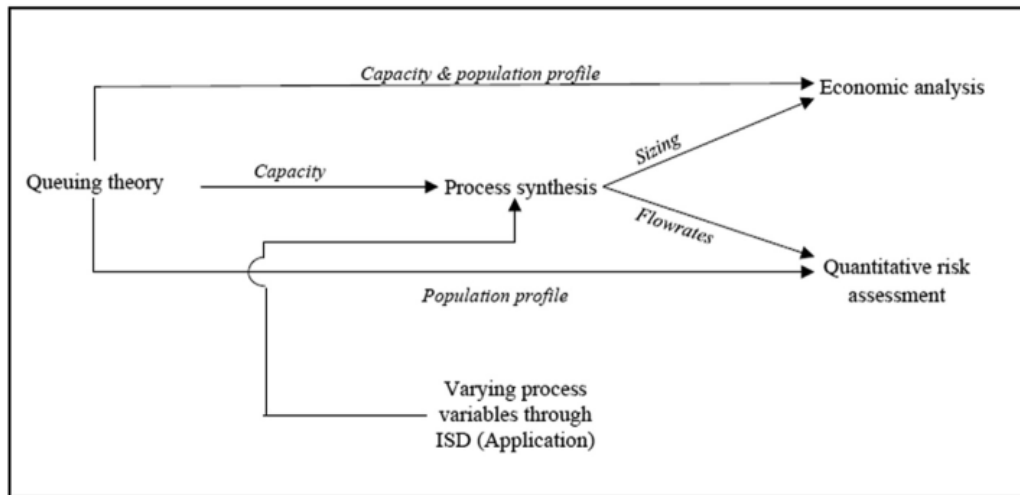


Figura 49: Modello integrato per la progettazione di una HRS impiegato in Ref. [7]

Il sotto-modello dedicato all'aspetto economico è dedicato alla stima della fattibilità del progetto mediante il calcolo e la valutazione del tasso di rendimento annuo e quindi del tempo necessario per recuperare l'investimento di capitale.

I risultati più significativi raccolti dagli autori a seguito delle analisi svolte sono i seguenti:

- La diminuzione della capacità di stoccaggio di LH_2 comporta una riduzione della pericolosità legata all'ampiezza dei fenomeni di esplosione e nel contempo riduce i costi legati alle operazioni di trasporto;
- La diminuzione del diametro del tubo flessibile del dispenser conduce alla diminuzione della portata degli eventi accidentali conseguenti ai fenomeni di perdita connessi all'hose, ma provoca effetti negativi dal punto di vista economico, rallentando il processo di rifornimento e aumentando conseguentemente il tempo di attesa in fila per i clienti.

Ulteriori studi condotti negli ultimi anni rappresentano dei riferimenti affidabili nel campo e spunti interessanti per il prosieguo dell'approfondimento, apportando informazioni aggiuntive e suggerimenti utili allo sviluppo in sicurezza degli impianti di

questo tipo. Ne è un esempio l'analisi realizzata da Zhang et al. in *Hydrogen Leakage Simulation and Risk Analysis of Hydrogen Fueling Station in China* (2022) [37], nella quale viene dapprima determinato il tasso di occorrenza di alcuni scenari di perdita tramite HyRAM e in seguito si identificano le zone di influenza di fenomeni consequenziali come *jet fire* e VCE mediante l'impiego di PHAST, al fine di suggerire possibili misure preventive e distanze di sicurezza opportune. Interessante è anche lo studio condotto da Jeon et al. in *Quantitative Risk Assessment of Hydrogen Refueling Station in Cheonan City of South Korea* (2023) [38] inerente alla determinazione del *social risk* mediante un modello probit per una stazione situata in area urbana con il supporto, anche in questo caso, di HyRAM e PHAST per la determinazione dei risultati necessari al modello. Si concentra invece maggiormente sui rischi all'interno di una stazione di rifornimento *onsite* e sull'effetto delle barriere di sicurezza l'approccio messo in atto da Tsunemi et al. in *Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems* (2019) [39]. Un'analisi del rischio qualitativa applicata ad una stazione per FCVs a 70 MPa può essere invece osservata in *Risk assessment of Hydrogen fueling stations for 70 MPa FCVs* (2008) [40] ad opera di Kikukawa et al. Il lavoro appena citato risulta ampiamente più datato rispetto a quelli finora evidenziati, in quanto ad oggi un approccio totalmente qualitativo risulta piuttosto raro e si tende ad impiegare le valutazioni qualitative solamente come supporto alle successive analisi quantitative. Una delle prime applicazioni della fluidodinamica computazionale (CFD) per l'analisi delle conseguenze nel campo delle HRS può essere a sua volta esaminabile nello studio di Kim et al. riportato in *Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea* (2013) [41], nel quale risulta oggetto dello studio una configurazione 3D reale e la simulazione viene realizzata mediante il supporto di FLACS.

Inoltre, risulta appropriato evidenziare nuovamente il lavoro di selezione, analisi e catalogazione degli studi esistenti realizzato da Park et al. in *Global risk assessment of hydrogen refueling stations: Trends, challenges, and future directions* (2025) [6], già citato nel capitolo precedente della presente trattazione. Tale studio si propone infatti come riferimento per l'analisi dello stato dell'arte della valutazione del rischio applicata alle stazioni di rifornimento di idrogeno, riportando articoli di spicco, tecniche impiegate e strumenti a disposizione.

Dagli articoli selezionati e riportati si evince dunque che la sicurezza risulta essere un tema fortemente delicato nel caso delle stazioni di rifornimento di idrogeno, richiedendo

lunghe e laboriosi processi di analisi e valutazione. I risultati conseguiti nei lavori citati portano a constatare che generalmente le strutture così come vengono progettate risultano essere in grado di garantire quantomeno il soddisfacimento di livelli di sicurezza adeguati per le persone poste all'esterno dell'impianto. Per quanto concerne gli operatori invece il rischio talvolta risulta essere maggiormente elevato, richiedendo conseguentemente l'adozione di elementi mitigativi, l'efficacia dei quali risulta essere anch'essa un tema interessante per le analisi future. Secondo gli studi esposti l'inserimento di un elemento di questo tipo porta ad una diminuzione del rischio (individuale e sociale) approssimativamente di un ordine di grandezza. Parlando dell'analisi delle conseguenze, il *jet fire* risulta essere il fenomeno maggiormente analizzato e viene spesso individuato come il contributo principale allo sviluppo di situazioni di rischio. Carro bombolaio, gruppi di stoccaggio e dispenser emergono invece come gli elementi del sistema più critici, concentrando spesso l'attenzione dell'analisi delle frequenze e delle conseguenze dei fenomeni di rilascio da essi derivanti.

3.2 Approfondimento sulle frequenze di accadimento

Come già anticipato precedentemente, nel caso delle *hydrogen refueling stations* e, più in generale, degli impianti operanti con l'H₂ la determinazione delle frequenze di accadimento degli scenari di perdita e dei fenomeni conseguenti risulta essere particolarmente complessa, non esistendo un gran numero di dati statistici affermati derivanti dall'esperienza passata e soprattutto non essendo spesso disponibili le frequenze di guasto dei principali componenti che costituiscono i sistemi di questo tipo. Per impianti maggiormente comuni e ormai diffusi da tempo, come le stazioni di rifornimento classiche o quelle che prevedono il rifornimento di GPL o metano, i dati a riguardo risultano essere copiosi ed affidabili, facilitando le operazioni di analisi e la determinazione dei tassi di occorrenza degli eventi accidentali. In questa sezione si intende dapprima discutere del ruolo cruciale rivestito da HyRAM e dal SNL in tale ambito e, in seguito, presentare alcuni studi pregressi che hanno affrontato la *frequency analysis* applicata alle HRS, così da fornire degli esempi utili all'approfondimento della tematica.

Come anticipato, il principale riferimento in tale contesto è rappresentato dalle frequenze definite dal *Sandia National Laboratories*, facente parte del *US Department of Energy*

Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program. A partire dagli studi realizzati in tali contesti è stato infatti sviluppato HyRAM, il quale costituisce il mezzo maggiormente impiegato nelle QRA per la definizione delle frequenze di accadimento dei principali scenari accidentali possibili nelle stazioni di rifornimento di idrogeno. A tal proposito, rappresenta uno studio di particolare interesse quello realizzato da J. LaChance in *Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations* (2009) [43], nel quale l'autore riporta, all'interno di un lavoro più ampio, l'*event tree* impiegato per l'analisi dell'evento di rilascio e le prime frequenze di perdita associate ai vari componenti del sistema, associandogli delle bande di incertezza relative molto ampie per sottolineare il fatto che la loro derivazione non sia legata ad informazioni specificatamente riferite all'idrogeno. Si riportano di seguito l'albero degli eventi e le frequenze riscontrabili nello studio.

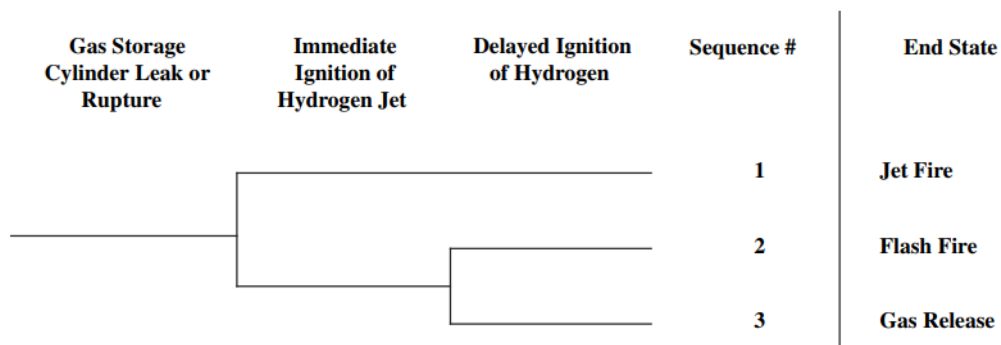


Figura 50: ET conseguente alla perdita o alla rottura relativa al sistema di stoccaggio, tratta da Ref. [43]

<i>Componente</i>	Small Leak	Large Leak	Rupture
	($0.01 \times A$)	($0.1 \times A$)	(A)
<i>Vessel</i>	1E-4 /yr	1E-5 /yr	1E-6 /yr
<i>Pipe</i>	3E-6 /m·yr	3E-7 /m·yr	3E-8 /m·yr
<i>Refueling hose</i>	0.1 /yr	1E-2 /yr	1E-3 /yr
<i>Pump</i>	3E-3 /yr	3E-4 /yr	3E-5 /yr
<i>Compressor</i>	3E-3 /yr	3E-4 /yr	3E-5 /yr
<i>Electrolyzer</i>	3E-3 /yr	3E-4 /yr	3E-5 /yr
<i>Vaporizer</i>	1E-3 /yr	1E-4 /yr	5E-5 /yr
<i>Valve</i>	1E-3 /yr	1E-4 /yr	5E-4 /yr

<i>Pipe joints and unions</i>	3E-2 /yr	4E-3 /yr	5E-4 /yr
<i>Flange</i>	3E-4 /yr	3E-5 /yr	NA
<i>Filter</i>	3E-3 /yr	3E-4 /yr	5E-4 /yr
<i>Instrument line</i>	1E-3 /yr	3E-4 /yr	5E-5 /yr

A: area di flusso del tubo

Figura 51: Frequenze di perdita annue per vari componenti del sistema [43]

L'importanza di HyRAM e dei suoi derivati è già stata introdotta nelle sezioni precedenti e nel corso della trattazione è stato possibile dedurre quanto sia frequente il suo impiego negli studi del settore. A fronte di ciò, risulta interessante approfondire l'approccio impiegato da HyRAM per la determinazione delle frequenze di perdita legate ai vari componenti di una HRS e i tassi di occorrenza dei conseguenti scenari, seguendo le indicazioni riportate nel manuale tecnico di riferimento di HyRAM+ versione 5.1 [44]. Come illustrato nella guida, gli scenari considerati in HyRAM vengono modellati a partire dal diagramma di sequenza degli eventi (*Event Sequence Diagram*, ESD) riportato nella figura seguente; il diagramma viene a sua volta implementato nel software mediante le equazioni che vengono proposte di seguito, al fine di determinare la frequenza annuale di ciascuno scenario finale.

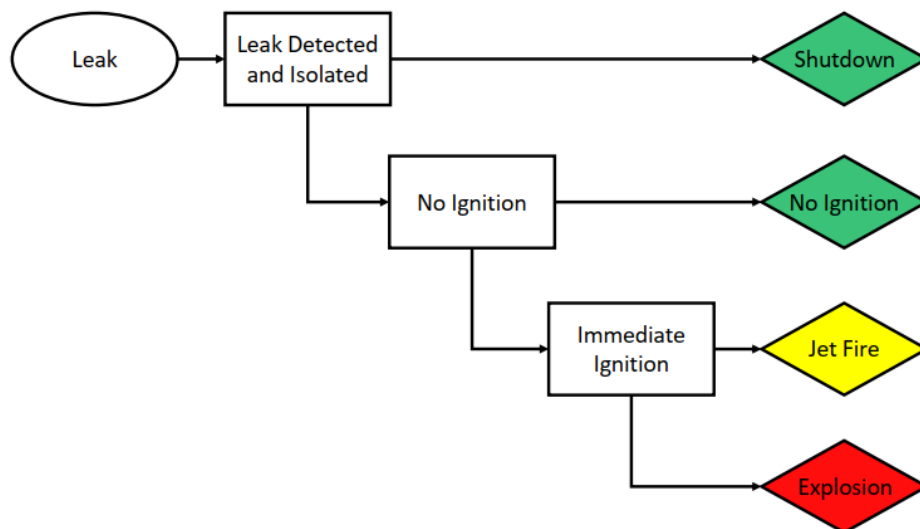


Figura 52: ESD di riferimento per gli scenari considerati da HyRAM [44]

$$f_{isolated} = f_{release} \times p_{isolated}$$

$$f_{unignited} = f_{release} \times (1 - p_{isolated}) \times (1 - p_{immed.ignit.} - p_{delayed.ignit.})$$

$$f_{jetfire} = f_{release} \times (1 - p_{isolated}) \times p_{immed.ignit.}$$

$$f_{explosion} = f_{release} \times (1 - p_{isolated}) \times p_{delayed.ignit.}$$

Il valore assunto come predefinito per la probabilità di rilevamento e isolamento efficace di una fuoriuscita ($p_{isolated}$) è pari a 0.9 e tiene conto di molteplici fattori come: ventilazione, posizionamento dei sensori, localizzazione della perdita e capacità del sensore e della valvola di isolamento di funzionare correttamente quando richiesto. Per quanto concerne le probabilità di avere accensione immediata o ritardata si impiegano invece i valori di default riportati nella tabella seguente.

<i>Portata di rilascio [kg/s]</i>	<i>$p_{immed.ignit.}$</i>	<i>$p_{delayed.ignit.}$</i>
< 0.125	0.008	0.004
0.125 – 6.25	0.053	0.027
> 6.25	0.23	0.12

Tabella 26: Valori di default per le probabilità di accensione immediata e ritardata impiegati in HyRAM [44]

Come già fatto da LaChance in Ref. [43], HyRAM stima le frequenze annuali di perdita per diverse dimensioni del rilascio, assunte pari a: 0.01%, 0.1%, 1%, 10% o 100% dell'area di flusso del tubo A , calcolata a partire dal diametro interno del tubo d e dal coefficiente di scarico C_d come:

$$A = \frac{\pi}{4} C_d d^2$$

La frequenza di rilascio per le quattro perdite minori (< 100%) è legata esclusivamente alla frequenza delle perdite casuali (“*random leaks*”, relative al sistema composto dai vari componenti dell'impianto), mentre la perdita maggiore (100%) risulta correlata sia alla frequenza delle perdite casuali che a quella delle altre perdite (“*other leaks*”, relative al dispenser); il dispenser rappresenta infatti un elemento fortemente critico per le seguenti motivazioni:

- Il rifornimento prevede l'intervento dell'uomo e l'errore umano costituisce, come già detto, una delle principali cause d'incidente;

- Il rifornimento prevede un collegamento temporaneo che risulta maggiormente incline ad eventi accidentali;
- Possono insorgere problematiche legate all'allontanamento improvviso del veicolo dal distributore di rifornimento.

La frequenza annuale delle perdite casuali, per ognuna delle dimensioni di perdita considerate, viene determinata mediante un albero dei guasti (*fault tree*), il quale risulta necessario a combinare le frequenze dei singoli componenti in una frequenza complessiva riferita al sistema. Si riporta di seguito, a titolo d'esempio, il *fault tree* impiegato per la perdita dello 0.01%.

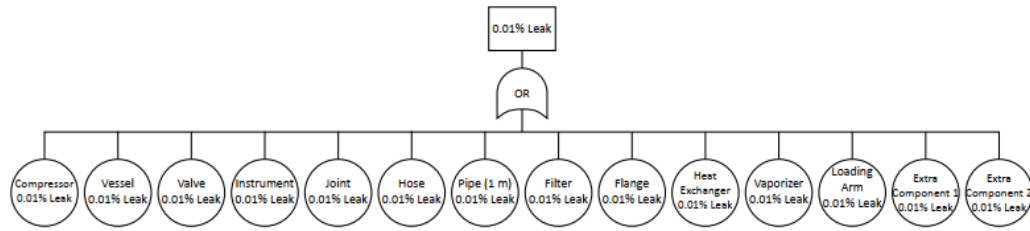


Figura 53: Esempio di FT per le perdite casuali [44]

Per ogni dimensione della perdita *k-esima* la frequenza annuale delle perdite casuali ($f_{Random\ Releases, k}$) viene calcolata, a partire dalla frequenza propria del componente *i-esimo* per la dimensione di perdita specifica, mediante la seguente formulazione [44]:

$$f_{Random\ Releases, k} = \sum_i N_{Component_i} \times f_{Leak, i, k}$$

All'interno della relazione presentata $N_{Component_i}$ rappresenta il numero di componenti della tipologia *i-esima* presenti nel sistema considerato.

Per quanto concerne la frequenza annuale legata alla perdita casuale, per ogni componente *i-esimo* e per ogni dimensione di perdita *k-esima* HyRAM assume che questa frequenza sia distribuita secondo una distribuzione lognormale caratterizzata da una media μ e da una deviazione standard σ ; in particolare, nel calcolo delle frequenze complessive, il software impiega per ogni componente la mediana (uguale alla media geometrica in questo caso) come indicatore della tendenza centrale e quindi come valore utilizzabile. La mediana viene calcolata a partire dai parametri della distribuzione come:

$$mediana = e^{\mu}$$

I valori di default utilizzati nel caso del GH₂ si basano sui dati relativi ai sistemi a idrogeno compresso dedotti da LaChance et al. nel report preparatorio allo studio riportato in Ref. [43] e in seguito aggiornati da Groth et al. e da Glover et al. in report successivi, figli anch'essi del lavoro svolto nel laboratorio Sandia e riportati nella bibliografia del manuale. Per l'LH₂ le frequenze di perdita sono state invece determinate a partire dai dati relativi all'idrogeno gassoso e al gas naturale liquefatto secondo la metodologia suggerita da Brooks et al. [45].

Si riportano in *Figura 54*, in forma di grafico a scatola e baffi, le distribuzioni delle frequenze annuali dei componenti considerati in HyRAM nei casi di idrogeno gassoso e idrogeno liquido. In *Figura 55*, in forma d'elenco, sarà possibile osservare i valori precisi di μ , σ e della mediana per ognuno dei componenti *i-esimi* e per ciascuna delle dimensioni di perdita *k-esime*, anche in questo caso per idrogeno gassoso e liquido.

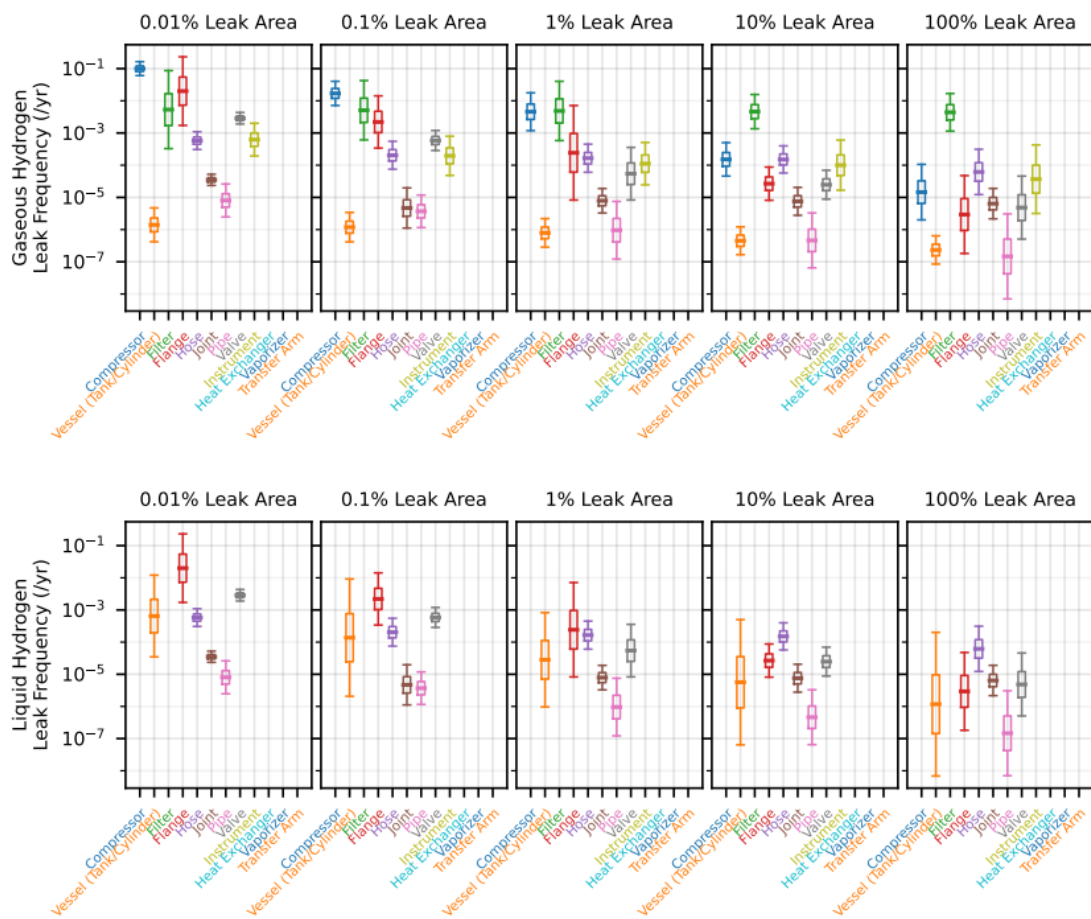


Figura 54: Grafico a scatola e baffi inerente alle frequenze annuali di default considerate per i vari componenti del sistema; in alto per idrogeno gassoso, in basso per idrogeno liquido [44]

Component	Leak Size	Gaseous Hydrogen			Liquid Hydrogen		
		μ	σ	median	μ	σ	median
Compressor	0.01%	-2.3	0.3	1.0×10^{-1}	999	999	∞
	0.1%	-4.1	0.5	1.7×10^{-2}	999	999	∞
	1%	-5.4	0.8	4.6×10^{-3}	999	999	∞
	10%	-8.8	0.7	1.5×10^{-4}	999	999	∞
	100%	-11.1	1.2	1.5×10^{-5}	999	999	∞
Vessel (Tank/Cylinder)	0.01%	-13.5	0.7	1.4×10^{-6}	-7.3	1.8	6.5×10^{-4}
	0.1%	-13.6	0.6	1.2×10^{-6}	-8.9	2.6	1.4×10^{-4}
	1%	-14.1	0.6	7.9×10^{-7}	-10.5	2.1	2.8×10^{-5}
	10%	-14.6	0.6	4.5×10^{-7}	-12.1	2.7	5.7×10^{-6}
	100%	-15.3	0.6	2.3×10^{-7}	-13.7	3.1	1.2×10^{-6}
Filter	0.01%	-5.2	1.7	5.3×10^{-3}	999	999	∞
	0.1%	-5.3	1.3	5.1×10^{-3}	999	999	∞
	1%	-5.3	1.3	4.8×10^{-3}	999	999	∞
	10%	-5.4	0.7	4.6×10^{-3}	999	999	∞
	100%	-5.4	0.8	4.4×10^{-3}	999	999	∞
Flange	0.01%	-3.9	1.5	2.0×10^{-2}	-3.9	1.5	2.0×10^{-2}
	0.1%	-6.1	1.1	2.2×10^{-3}	-6.1	1.1	2.2×10^{-3}
	1%	-8.3	2.1	2.4×10^{-4}	-8.3	2.1	2.4×10^{-4}
	10%	-10.5	0.7	2.7×10^{-5}	-10.5	0.7	2.7×10^{-5}
	100%	-12.7	1.7	2.9×10^{-6}	-12.7	1.7	2.9×10^{-6}
Hose	0.01%	-7.5	0.4	5.8×10^{-4}	-7.5	0.4	5.8×10^{-4}
	0.1%	-8.5	0.6	2.0×10^{-4}	-8.5	0.6	2.0×10^{-4}
	1%	-8.7	0.6	1.6×10^{-4}	-8.7	0.6	1.6×10^{-4}
	10%	-8.8	0.6	1.5×10^{-4}	-8.8	0.6	1.5×10^{-4}
	100%	-9.7	1.0	6.2×10^{-5}	-9.7	1.0	6.2×10^{-5}
Joint	0.01%	-10.3	0.2	3.5×10^{-5}	-10.3	0.2	3.5×10^{-5}
	0.1%	-12.3	0.9	4.7×10^{-6}	-12.3	0.9	4.7×10^{-6}
	1%	-11.8	0.5	7.9×10^{-6}	-11.8	0.5	7.9×10^{-6}
	10%	-11.8	0.6	7.5×10^{-6}	-11.8	0.6	7.5×10^{-6}
	100%	-12.0	0.7	6.4×10^{-6}	-12.0	0.7	6.4×10^{-6}
Pipe	0.01%	-11.7	0.7	8.0×10^{-6}	-11.7	0.7	8.0×10^{-6}
	0.1%	-12.5	0.7	3.7×10^{-6}	-12.5	0.7	3.7×10^{-6}
	1%	-13.9	1.3	9.6×10^{-7}	-13.9	1.3	9.6×10^{-7}
	10%	-14.6	1.2	4.6×10^{-7}	-14.6	1.2	4.6×10^{-7}
	100%	-15.7	1.8	1.5×10^{-7}	-15.7	1.8	1.5×10^{-7}
Valve	0.01%	-5.9	0.2	2.9×10^{-3}	-5.9	0.2	2.9×10^{-3}
	0.1%	-7.4	0.4	5.9×10^{-4}	-7.4	0.4	5.9×10^{-4}
	1%	-9.8	1.1	5.4×10^{-5}	-9.8	1.1	5.4×10^{-5}
	10%	-10.6	0.6	2.5×10^{-5}	-10.6	0.6	2.5×10^{-5}
	100%	-12.2	1.4	4.8×10^{-6}	-12.2	1.4	4.8×10^{-6}
Instrument	0.01%	-7.4	0.7	6.2×10^{-4}	999	999	∞
	0.1%	-8.5	0.8	2.0×10^{-4}	999	999	∞
	1%	-9.1	0.9	1.1×10^{-4}	999	999	∞
	10%	-9.2	1.1	1.0×10^{-4}	999	999	∞
	100%	-10.2	1.5	3.7×10^{-5}	999	999	∞
Heat Exchanger	0.01%	999	999	∞	999	999	∞
	0.1%	999	999	∞	999	999	∞
	1%	999	999	∞	999	999	∞
	10%	999	999	∞	999	999	∞
	100%	999	999	∞	999	999	∞
Vaporizer	0.01%	999	999	∞	999	999	∞
	0.1%	999	999	∞	999	999	∞
	1%	999	999	∞	999	999	∞
	10%	999	999	∞	999	999	∞
	100%	999	999	∞	999	999	∞
Transfer Arm	0.01%	999	999	∞	999	999	∞
	0.1%	999	999	∞	999	999	∞
	1%	999	999	∞	999	999	∞
	10%	999	999	∞	999	999	∞
	100%	999	999	∞	999	999	∞

Figura 55: Frequenze annuali dei componenti del sistema per le varie dimensioni della perdita: media, deviazione standard e mediana [44]

La frequenza annuale delle altre emissioni ($f_{\text{Other releases}}$), come già detto, risulta strettamente legata agli eventi accidentali che possono avere luogo in corrispondenza del dispenser; si assume che fenomeni di questo tipo comportino grandi perdite e si considera conseguentemente il solo leak 100%. $f_{\text{Other releases}}$ viene dunque determinata mediante la formulazione riportata di seguito [44]:

$$f_{\text{Other release}} = f_{\text{Fueling demands}} \times p_{\text{Dispenser releases}}$$

Con:

- $f_{\text{Fueling demands}}$: numero di volte, in un anno, in cui il dispenser viene impiegato per rifornire un veicolo, calcolabile a sua volta a partire da numero di veicoli, numero di rifornimenti giornalieri e numero di giorni lavorativi annui mediante la seguente relazione:

$$f_{\text{Fueling demands}} = N_{\text{Vehicles}} \times N_{\text{Fuelings per day}} \times N_{\text{Annual operating days}}$$

- $p_{\text{Dispenser releases}}$: probabilità di avere perdite durante il rifornimento derivanti dal dispenser.

In HyRAM gli eventi legati al dispenser sono catalogati come:

- Incidenti: categoria nella quale rientrano le sovrappressioni del serbatoio del veicolo o il drive-off (allontanamento del veicolo con il rifornimento in corso);
- Mancato arresto: il sistema non viene arrestato dopo una fuoriuscita involontaria dalla pistola di rifornimento.

La probabilità associata a ciascuna tipologia di perdita viene stimata mediante l'albero dei guasti riportato nella figura seguente [44].

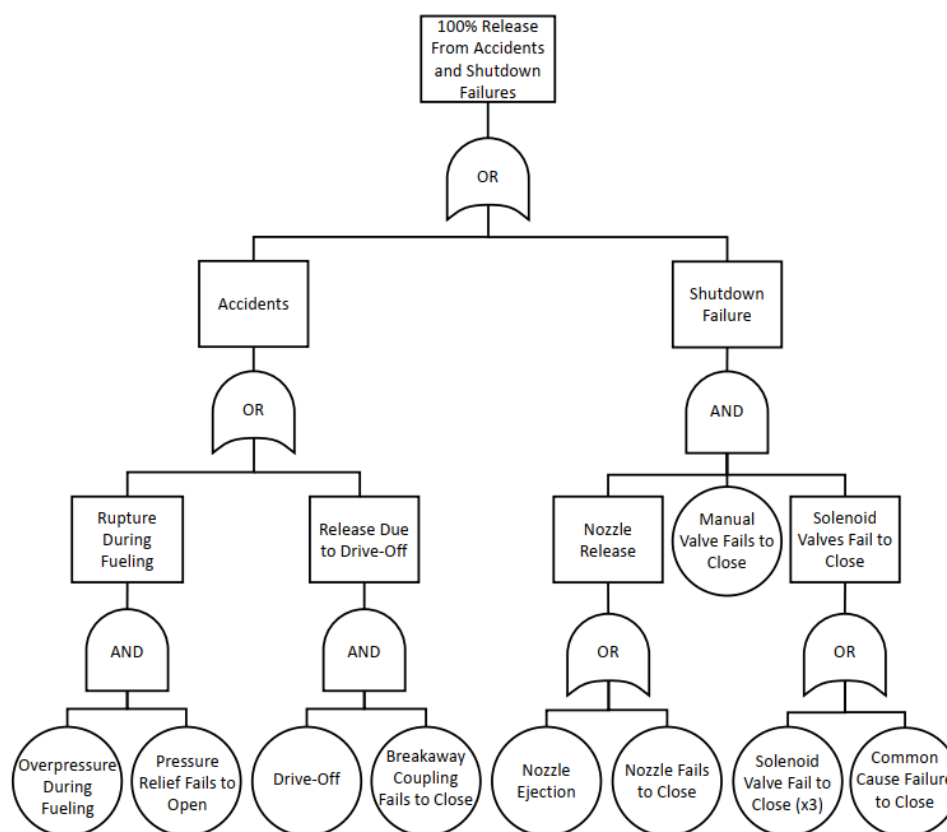


Figura 56: FT impiegato per la valutazione delle perdite legate al dispenser [44]

In questo caso le probabilità di guasto di default vengono stimate sulla base di dati derivanti da uno studio di valutazione dei rischi per il rifornimento di carrelli elevatori alimentati a idrogeno, realizzato in industrie petrolifere, chimiche e nucleari. Si riportano nelle tabelle seguenti le caratteristiche e i parametri relativi alla distribuzione delle probabilità di guasto dei componenti (Tabella 27) e delle frequenze degli incidenti (Tabella 28).

Componente	Modalità di guasto	Tipo di distribuzione	Parametri
Nozzle (erogatore)	Distaccamento	Beta (α, β)	$\alpha = 0.5, \beta = 610415.5$
Nozzle (erogatore)	Mancata chiusura	Valore atteso	0.002
Breakaway coupling (Giunto di sicurezza)	Mancata chiusura	Beta (α, β)	$\alpha = 0.5, \beta = 5031$
Pressure relief valve (Valvola di sicurezza)	Mancata apertura	Lognormale (μ, σ)	$\mu = -11.74, \sigma = 0.67$

Manual valve (Valvola manuale)	Mancata chiusura (per errore umano)	Valore atteso	0.001
Solenoid valve (Elettrovalvola)	Mancata chiusura	Valore atteso	0.002
Solenoid valves (Elettrovalvole)	Guasto da causa comune (3 valvole, metodo del fattore beta)	Valore atteso	1.28×10^{-4}

Tabella 27: Caratteristiche delle probabilità di guasto associate ai componenti del dispenser [44]

Incidente	Tipo di distribuzione	Parametri
Drive-off	Beta (α , β)	$\alpha = 31.5$, $\beta = 610384.5$
Sovrappressione durante il rifornimento	Beta (α , β)	$\alpha = 3.5$, $\beta = 310289.5$

Tabella 28: Caratteristiche delle distribuzioni delle frequenze degli incidenti legati al dispenser [44]

Si noti che nel caso di una distribuzione di tipo beta la media aritmetica, usata come valore di riferimento, viene calcolata come:

$$media = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

Presentato dunque l'approccio messo in atto da HyRAM per la determinazione delle frequenze di accadimento degli eventi di rilascio in una HRS e illustrati i valori di default, risulta interessante osservare l'impiego dei dati forniti da SNL nei vari studi del settore discussi precedentemente.

In *Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station* di Park et al. (2021) [36], già illustrato nella sezione precedente, si riportano le caratteristiche di perdita relative ad alcuni elementi tipici di una stazione di rifornimento di idrogeno, associando ad ogni scenario considerato la frequenza annuale di perdita; i dati così presentati sono tratti da documentazione fornita da SNL e rappresentano la prima fase dello studio, nel quale, come già anticipato, HyRAM viene impiegato anche per la realizzazione della CA. Si riporta di seguito la tabella presentata all'interno dello studio, così da permettere la visualizzazione dei valori.

<i>Componenti</i>	Pressione [MPa]	Scenario [Leak size]	Diametro orifizio [mm]	Portata di rilascio [kg/s]	Frequenza perdita [anno⁻¹]
<i>Carro bombolaio</i>	20	Small	0.40	1.30E-03	1.07E-03
		Medium	4.02	1.31E-01	3.21E-04
		Large	12.70	1.31E+00	1.80E-04
<i>Stoccaggio HP</i>	82	Small	0.23	1.76E-03	3.47E-03
		Medium	2.26	1.70E-01	2.09E-04
		Large	7.16	1.71E+00	1.02E-04
<i>Stoccaggio LP</i>	40	Small	0.25	1.02E-03	3.47E-03
		Medium	2.50	1.50E-01	2.09E-04
		Large	7.92	1.02E+00	1.02E-04
<i>Dispenser</i>	70	Small	0.23	1.76E-03	7.06E-04
		Medium	2.26	1.45E-01	1.85E-04
		Large	7.16	1.46E+00	9.88E-05
<i>Compressore</i>	82	Small	0.23	1.76E-03	6.03E-03
		Medium	2.26	1.70E-01	2.62E-05
		Large	7.16	1.71E+00	8.32E-05
<i>Quadro valvole</i>	82	Small	0.23	1.76E-03	1.20E-03
		Medium	2.26	1.70E-01	3.02E-04
		Large	7.16	1.71E+00	3.84E-05

Tabella 29: Frequenze annuali di perdita per gli elementi considerati in Ref. [36]

Risulta essere ancor più meticoloso l'utilizzo delle frequenze fornite da HyRAM nello studio realizzato da Joshi et al. (2024) e già citato in Ref. [5]. Gli autori riportano infatti le frequenze, associate a ciascuna dimensione di perdita, per ognuno dei nodi e dei sotto-nodi alla base del fenomeno di rilascio, il quale costituisce il nodo centrale del *bowtie diagram* presentato in Figura 47. Inoltre, considerando le probabilità di accensione immediata e ritardata in funzione delle portate di rilascio (presentate in Tabella 26) gli autori hanno determinato anche le frequenze di accadimento caratteristiche per ogni

dimensione della perdita considerata e i tassi di occorrenza degli eventi consequenziali (*jet fire*, *flash fire* e *safe dispersion*) posti a valle del nodo centrale nel diagramma a farfalla. Nella tabella posta di seguito si illustrano i risultati ottenuti.

ID	Descrizione	0.10%	1.00%	10%	100%
P1	Perdita da TTA	7.43E-02	8.65E-03	1.75E-03	4.07E-04
P1.1	Perdita da bombola	2.38E-03	1.58E-04	3.63E-05	4.66E-06
P1.2	Perdita da valvola	7.03E-06	6.53E-07	2.97E-07	5.78E-07
P1.3	Perdita da giunto	1.17E-04	6.70E-06	4.00E-06	2.21E-06
P1.4	Perdita da strumento	2.81E-05	4.72E-05	5.32E-06	2.34E-06
P1.5	Perdita da tubazione	3.70E-05	9.56E-06	4.61E-06	1.47E-06
P1.6	Perdita da flangia	6.60E-07	2.77E-08	2.84E-08	5.81E-08
P2	Perdita da HSA	1.29E-01	2.24E-02	2.23E-03	4.15E-04
P2.1	Perdita da compressore	5.09E-02	1.37E-02	4.55E-04	2.32E-04
P2.2	Perdita da bombola (Alta pressione)	2.38E-02	9.80E-04	2.04E-04	4.65E-05
P2.3	Perdita da valvola	7.03E-06	6.53E-07	2.97E-07	5.78E-07
P2.4	Perdita da giunto	1.17E-04	6.70E-06	4.00E-06	2.21E-06
P2.5	Perdita da strumento	2.81E-05	4.72E-05	5.32E-06	2.34E-06
P2.6	Perdita da tubazione	2.77E-05	7.07E-05	3.95E-06	1.05E-06

P2.7	Perdita da flangia	6.60E-07	2.77E-08	2.84E-08	5.81E-08
P2.8	Perdita da bombola (Bassa pressione)	1.19E-06	9.07E-08	5.02E-08	5.01E-09
P3	Perdita da DA	NA	NA	NA	1.42E-04
P3.1	Rottura durante rifornimento	NA	NA	NA	NA
P3.2	Guasto tubo flessibile	NA	NA	NA	1.00E-07
P3.3	Incidente del veicolo	NA	NA	NA	1.00E-07
P3.4	Demolizione intenzionale	NA	NA	NA	1.00E-07
P3.5	Rilascio dovuto al drive-off	NA	NA	NA	6.00E-05

Tabella 30: Frequenze annuali legate agli elementi del diagramma a farfalla [5]

Leak size	Hydrogen leak in the HRS [anno ⁻¹]	Jet fire (E1) [anno ⁻¹]	Flash fire (E2) [anno ⁻¹]	Safe dispersion (E3) [anno ⁻¹]
0.1%	1.35E-01	7.16E-03	1.93E-04	6.96E-03
1%	2.38E-02	1.26E-03	3.41E-05	1.23E-03
10%	2.68E-03	1.42E-04	3.84E-06	1.38E-04
100%	6.87E-04	3.64E-05	9.83E-07	3.54E-05

Tabella 31: Frequenze di accadimento delle perdite di H2 e dei possibili eventi consequenziali per varie dimensioni della perdita [5]

Le frequenze così determinate risultano fondamentali per andare a catalogare gli eventi accidentali nella matrice di rischio.

In ultima, nell'opera *Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model* di Suzuki et al. (2020) [10] le frequenze di accadimento per ciascun componente fornite dai *Sandia National Laboratories* rappresentano questa volta i dati di partenza inseriti negli *event trees* (Figura 41-42) per il calcolo dei tassi di occorrenza degli eventi finali e per la conseguente classificazione e valutazione dei rischi.

La panoramica appena illustrata permette di visualizzare gli approcci tipicamente messi in atto negli studi condotti fino al momento della stesura della presente opera. Con l'avanzare del tempo e la progressiva diffusione degli impianti di questo tipo, la raccolta di un numero sempre maggiore di dati statistici autorevoli permetterà di migliorare gli elementi a disposizione e conseguentemente i risultati delle analisi.

4. Studio simulativo di un caso impiantistico: analisi delle frequenze e delle conseguenze mediante HyRAM+ e PHAST

In aggiunta all'analisi bibliografica si è ritenuto utile realizzare lo studio simulativo di un caso impiantistico mediante l'impiego dei software specialistici HyRAM+ e PHAST, con l'obiettivo di applicare alcune delle tecniche per la valutazione del rischio illustrate in precedenza e di ottenere dati utili come base di partenza per approfondimenti futuri. Si noti che l'impianto oggetto dell'analisi è stato interamente ipotizzato con il solo scopo di consentire lo svolgimento delle simulazioni d'interesse ispirandosi alla configurazione di impianti esistenti, ma senza riprodurre fedelmente alcuna caratteristica specifica.

4.1 Descrizione dell'impianto

L'impianto in questione consiste in una stazione di rifornimento di idrogeno per mezzi pesanti (HGV, *Heavy Goods Vehicle*) con produzione e stoccaggio in loco di idrogeno "verde". Il layout impiantistico è stato definito a seguito dell'individuazione di tutti gli elementi necessari all'effettiva attività della struttura, dagli elettrolizzatori al dispenser di erogazione finale; le caratteristiche delle varie apparecchiature presenti sono le seguenti:

- Due elettrolizzatori PEM da 2 MW ciascuno, in grado di produrre H₂ a 40 bar;
- Due compressori, necessari per portare l'idrogeno ad una pressione di 500 bar;
- Buffer, usato come polmone di bilanciamento, avente capienza pari a 40 kg a 40 bar;
- Insieme di stoccaggio composto da due gruppi di bombole organizzate in rack orizzontali, ognuno dei quali diviso in tre banchi funzionali (BP: 400 bar, MP: 450 bar, HP: 500 bar) per un totale di 500 kg;
- Gruppo di riduzione pressione;
- Dispenser con erogatore singolo per veicoli pesanti.

La produzione, a piena potenza, permette di ottenere 67 kg/h di H₂ per un totale giornaliero di circa 1600 kg grazie alla totale automatizzazione del processo che consente di produrre sulle 24 ore. Il servizio di rifornimento risulta invece attivo per 8 h al giorno e viene svolto da due addetti, uno responsabile dell'erogazione e l'altro della

supervisione; questi risultano pertanto mediamente locati rispettivamente in prossimità del dispenser e nella cabina di controllo. Va considerata anche la presenza all'interno dell'impianto dell'autista del mezzo, ma solo nel momento dell'effettivo rifornimento del veicolo.

L'erogazione di idrogeno a 350 bar, destinata esclusivamente ai mezzi pesanti, viene realizzata mediante un profilo "a cascata" sfruttando i tre livelli di pressione dei gruppi di stoccaggio; tale tecnica è stata riconosciuta e regolamentata dalle ISO 19880-1 e ISO 19880-2. La fornitura "a cascata" verrà opportunamente gestita da un PLC (*Programmable Logic Controller*). Il metodo di stoccaggio e rifornimento appena descritto viene attualmente utilizzato, ad esempio, nella HRS di Aalborg, in Danimarca. Considerando la produzione no-stop e la compressione attiva, l'idrogeno a disposizione per il rifornimento risulta essere pari alla somma di quello disponibile a stock, riportato al massimo livello nelle ore di non erogazione, e di quello prodotto durante le 8 h di servizio:

$$\left(500 + \frac{1600 \cdot 8}{24}\right) kg \approx 1033 kg$$

Dunque, tenendo conto del fatto che ogni veicolo pesante necessita di circa 30 kg di H₂ per un rifornimento completo, il limite è di circa 34 veicoli per ogni turno di servizio giornaliero; va però considerata anche la durata del processo di erogazione dal dispenser, la quale risulta pari a 10 min. Si è scelto dunque di assumere, in maniera conservativa, il rifornimento di 4 veicoli/h, per un totale di 32 veicoli al giorno. Assumendo 250 giorni lavorativi si hanno conseguentemente 8000 mezzi annualmente riforniti.

Per quanto concerne le tubazioni dell'impianto si considera l'impiego di diverse tipologie, in base all'applicazione a cui sono destinate. Si assume la presenza di:

- DN 40 SCH 80, impiegati nella zona produttiva dell'impianto;
- DN 25 SCH 80, impiegati anch'essi nella zona produttiva dell'impianto;
- DN 6, impiegato per il tubo flessibile del dispenser di erogazione, secondo l'approvazione dello standard ISO 19880-5.

Le informazioni appena riportate, in particolar modo quelle riguardanti le modalità di erogazione e le caratteristiche delle apparecchiature presenti, risultano fondamentali come parametri di input per le simulazioni svolte, al fine di permettere un'adeguata analisi

del sistema. Le modalità di sfruttamento di tali dati verranno presentate maggiormente nel dettaglio più avanti nella trattazione.

Una volta individuati con accuratezza gli elementi presenti, è stato definito il layout impiantistico scegliendo la disposizione delle apparecchiature secondo una logica operativa e la distanza tra le stesse mediante le direttive riportate nel Decreto del Ministero dell'Interno del 07/07/2023, del quale si è ampiamente discusso nel primo capitolo. Si riportano nella tabella seguente le distanze indicate dal DM per gli elementi d'impianto considerabili pericolosi, dei quali fanno parte elettrolizzatori, compressori, gruppo di riduzione pressione, gruppo di stoccaggio e dispenser.

Pressione idrogeno (barg)	Distanze di sicurezza (m)		
	Esterna	Protezione	Interna
$700 < P \leq 1000$	30	15	15
$500 < P \leq 700$	25	15	15
$300 < P \leq 500$	20	15	15
$100 < P \leq 300$	17	12	12
$50 < P \leq 100$	12	8	8
$30 < P \leq 50$	8	6	6
$10 < P \leq 30$	7	5	5
$P \leq 10$	5	3	3

Figura 57: Distanze di sicurezza da garantire a partire dagli elementi pericolosi, tratte dal DM 07/07/23

Date le pressioni in gioco nell'impianto analizzato, le distanze da garantire saranno pari, a 15 m e 20 m, rispettivamente per gli elementi interni all'impianto e quelli esterni. Si è deciso inoltre di provvedere all'installazione di box di protezione e contenimento in calcestruzzo armato attorno agli elementi succitati; tali box, chiusi su tre lati e privi di copertura superiore, saranno caratterizzati da un'altezza superiore di 1 m a quella dell'elemento contenuto e da pareti aventi spessore pari a 15 cm, come imposto dal decreto. Le tre pareti perimetrali sono state disposte per ogni elemento pericoloso in modo da evitare che il lato aperto di un box si affacciasse sul lato vulnerabile di un altro box adiacente, cosicché, in caso di rilasci indesiderati, ci possa essere sempre (almeno) una barriera protettiva ad ostacolare il flusso. I box sono stati inoltre dimensionati in maniera tale da permettere le operazioni di manutenzione e controllo sull'apparecchiatura contenuta.

Si riportano in *Figura 58* e *Figura 59* rispettivamente la vista in pianta e quella tridimensionale del layout descritto finora. Nella prima immagine, gli elementi caratterizzati da un bordo rosso corrispondono ai componenti del sistema considerati

pericolosi, mentre in giallo è stata riportata la recinzione esterna e in blu il mezzo da rifornire. Si noti che le dimensioni dei diversi elementi del sistema sono state definite indicativamente sulla base delle dimensioni riportate su cataloghi tecnici e commerciali, ma risultano comunque poco influenti ai fini simulativi, essendo sensibilmente inferiori rispetto alle distanze che separano i diversi elementi.

Si considera inoltre che l'impianto in questione sia posto in una zona rurale e che conseguentemente non sia circondato da elementi sensibili (scuole, caserme, stazioni, strade trafficate, ecc.). Vagliata tale ipotesi, la distanza di 8 m tra la recinzione esterna e le pareti dei box di protezione degli elementi pericolosi risulta verosimilmente sufficiente a garantire un adeguato livello di sicurezza, in quanto all'esterno della recinzione stessa sarà presente altro spazio utile alla salvaguardia in caso di incidente.

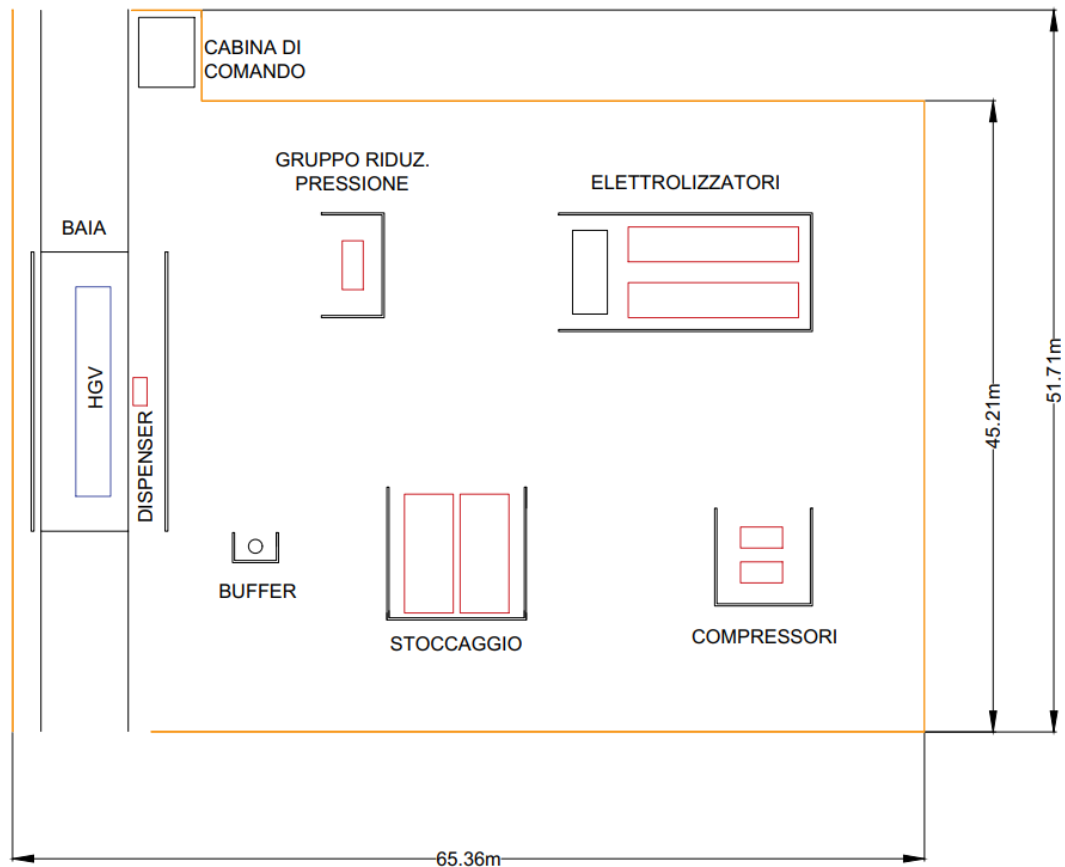


Figura 58: Layout impiantistico, vista in pianta

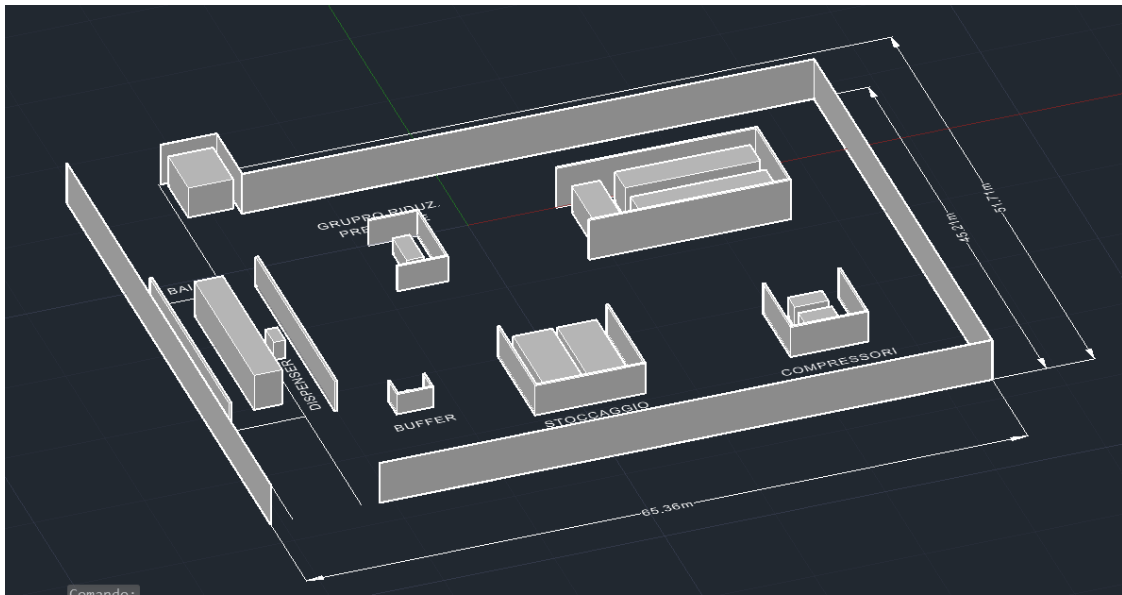


Figura 59: Layout impiantistico, vista tridimensionale

4.2 Metodologia simulativa

Definite la tipologia d'impianto e le sue caratteristiche, è stato possibile trasformare le informazioni a disposizione in dati di input per le simulazioni, al fine di realizzare un'analisi degli eventi dannosi accurata e aderente al prospetto. Il processo di valutazione si è concentrato sull'analisi delle frequenze (FA) e sull'analisi delle conseguenze (CA), come sarà possibile osservare nel prosieguo della trattazione.

Si intende sottolineare che questa sezione sarà preposta alla presentazione della metodologia messa in atto per lo svolgimento dello studio e per la determinazione dei risultati desiderati, ma che questi ultimi verranno mostrati solamente in una sezione dedicata posta in seguito.

Nel diagramma di flusso riportato nella figura sottostante si riassumono i passaggi chiave del processo messo in atto al fine di permetterne una facile visualizzazione.

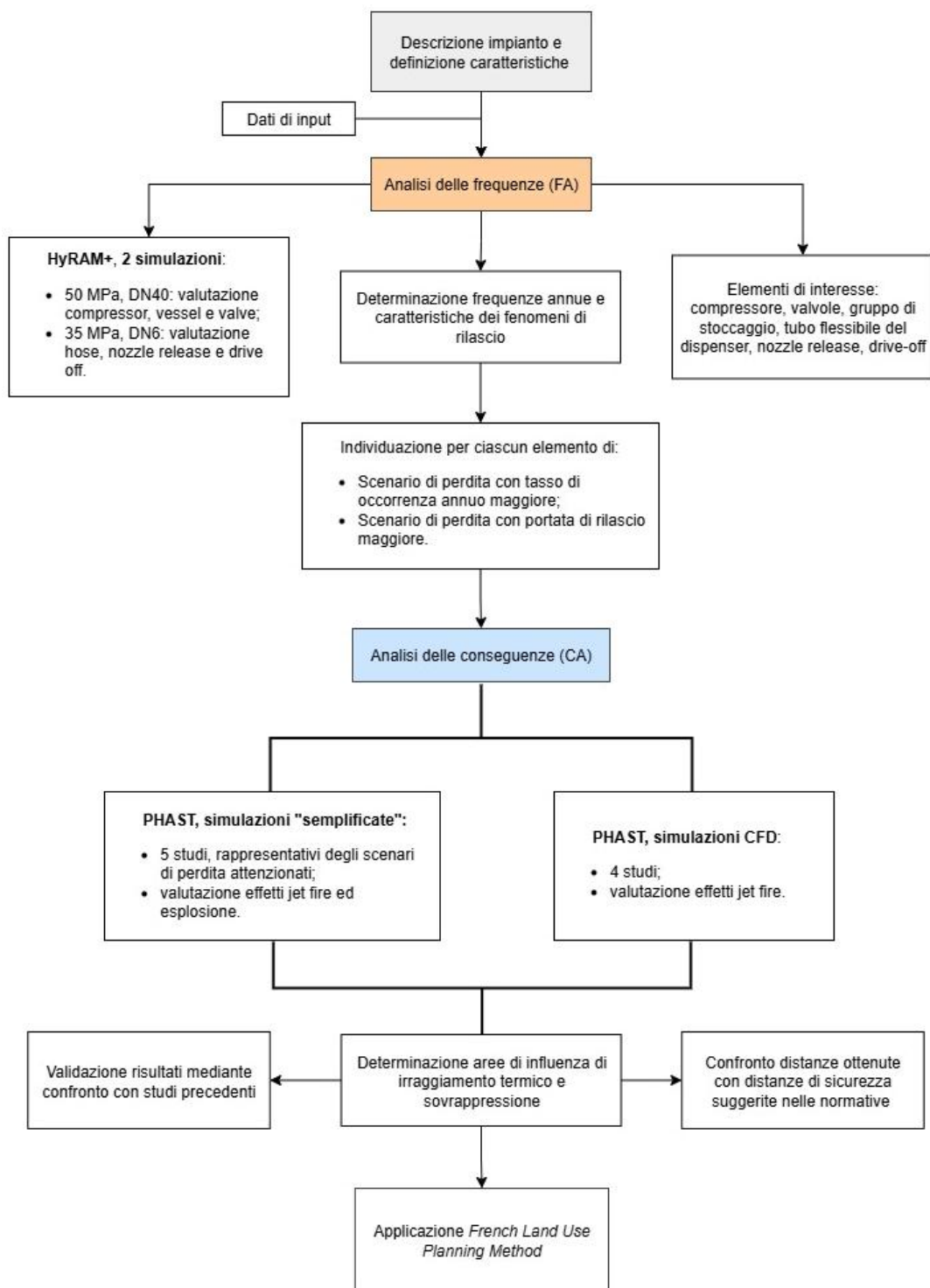


Figura 60: Diagramma di flusso che rappresenta il processo di studio messo in atto

4.2.1 Analisi delle frequenze

Il processo ha avuto inizio dall'individuazione delle frequenze di accadimento di fenomeni di perdita (*leakage*) legati ad alcuni elementi del sistema, quali:

- compressore (*compressor*);
- gruppo di stoccaggio (*vessel*);
- valvole (*valve*);
- tubo flessibile del dispenser (*hose*).

Tali elementi sono stati scelti per l'analisi in quanto giudicati maggiormente critici, mentre l'elettrolizzatore, ad esempio, è stato trascurato supponendo garantiti dall'azienda fornitrice determinati livelli di sicurezza. Si noti che, oltre ai succitati, sono stati considerati anche ulteriori due scenari di perdita, legati più direttamente all'errore umano e scelti dunque in rappresentanza di quest'ultimo; questi sono:

- *nozzle release* (fuoriuscita dal bocchettone di rifornimento);
- *drive-off* (mezzo che si allontana con il rifornimento ancora in atto).

Si ricorda infatti che l'errore umano rappresenta una delle principali cause d'incidente negli impianti di questo tipo, costituendo il motivo di origine degli inneschi in più del 20% dei casi secondo gli studi del settore mostrati nel secondo capitolo della trattazione [8] [6] [11] [35].

Questa prima fase dell'analisi è stata condotta mediante il supporto di HyRAM+, per mezzo del quale è stato possibile realizzare due simulazioni in condizioni specifiche in modo da valutare frequenze di accadimento (1/anno) e portate di rilascio (kg/s) relative alle perdite derivanti dai vari elementi del sistema. I parametri di simulazione per i due casi sono stati selezionati al fine di determinare i risultati dell'analisi nelle condizioni di funzionamento maggiormente critiche per ognuno degli elementi valutati. Si riportano di seguito le caratteristiche delle due simulazioni:

- Pressione nel sistema pari a 50 MPa e tubazioni DN 40 SCH 80: condizioni scelte per la valutazione degli scenari di perdita relativi a compressori, gruppi di stoccaggio e valvole, i quali, trovandosi nella zona operativa, operano a tale pressione;
- Pressione nel sistema pari a 35 MPa e tubazioni DN 6: condizioni scelte per la valutazione degli scenari di perdita legati al tubo flessibile, al *nozzle release* e ai *drive-offs*; il dispenser, trovandosi nella zona di rifornimento, è infatti interessato unicamente da questa pressione.

Si illustrano nelle figure seguenti i parametri caratteristici per le due configurazioni simulative. Per una più facile e diretta visualizzazione si è scelto di presentare le finestre di interfaccia di HyRAM+.

Common Inputs

Fluid phase

Notional nozzle model

☒ Fluid pressure is absolute

Parameter	Value	Unit
Tank fluid temperature	288,15	Kelvin
Tank fluid pressure (absolute)	50	MPa
Ambient temperature	293,15	Kelvin
Ambient pressure	0,101325	MPa
Discharge coefficient	0,72	...

Figura 61: Condizioni di impiego del fluido nella prima configurazione, immagine tratta da HyRAM+

Common Inputs

Fluid phase

Notional nozzle model

☒ Fluid pressure is absolute

Parameter	Value	Unit
Tank fluid temperature	288,15	Kelvin
Tank fluid pressure (absolute)	35	MPa
Ambient temperature	293,15	Kelvin
Ambient pressure	0,101325	MPa
Discharge coefficient	0,72	...

Figura 62: Condizioni di impiego del fluido nella seconda configurazione, immagine tratta da HyRAM+

Piping Environment

Parameter	Value	Unit
Pipes (length)	75	Meter
Pipe outer diameter	48,3	Millimeter
Pipe wall thickness	5,08	Millimeter
Relative humidity	0,89	---

Release mass flow rate (if unchoked)

0.01% leak size KgPerSecond

Figura 63: Caratteristiche delle tubazioni nella prima configurazione, immagine tratta da HyRAM+

Piping Environment

Parameter	Value	Unit
Pipes (length)	5	Meter
Pipe outer diameter	12,6	Millimeter
Pipe wall thickness	3,15	Millimeter
Relative humidity	0,89	---

Release mass flow rate (if unchoked)

0.01% leak size KgPerSecond

Figura 64: Caratteristiche delle tubazioni nella seconda configurazione, immagine tratta da HyRAM+

Illustrati gli input che differiscono per le due simulazioni condotte in HyRAM+, si riportano ora di seguito i parametri rimasti invariati nei due casi, legati principalmente al materiale in uso e alle caratteristiche strumentali del sistema impiantistico.

Fuel Specification

Fuel (overrides table) Hydrogen

Specify single fuel or fuel blend by adjusting concentrations.

Active	Fuel	Formula	Percent (vol-%)
☒	Hydrogen	H2	100.000%
☐	Methane	CH4	0.000%
☐	Propane	C3H8	0.000%
☐	Nitrogen	N2	0.000%
☐	Carbon Dioxide	CO2	0.000%
☐	Ethane	C2H6	0.000%
☐	n-Butane	N-C4H10	0.000%
☐	Isobutane	ISOBUTANE	0.000%
☐	n-Pentane	N-C5H12	0.000%
☐	Isopentane	ISOPENTANE	0.000%
☐	n-Hexane	N-C6H14	0.000%

Total 100.000%

Allocate remainder: Methane Allocate

Figura 65: Combustibile scelto, immagine tratta da HyRAM+

Components Facility Overrides

Components

Parameter	Value	Unit
# Compressors	2	...
# Vessels (cylinders, tanks)	2	...
# Valves	25	...
# Instruments	5	...
# Joints	43	...
# Hoses	1	...
# Filters	3	...
# Flanges	0	...
# Heat exchangers	0	...
# Vaporizers	0	...
# Loading arms	0	...
# Extra component 1	0	...
# Extra component 2	0	...

Refueling Demands

Parameter	Value	Unit
Number of Vehicles	32	...
Number of Fuelings Per Vehicle Day	1	...
Number of Vehicle Operating Days per Year	250	...
Annual Demands (calculated)	8000	...

Figura 66: Caratteristiche dell'impianto, immagine tratta da HyRAM+

Si noti che sono stati imposti 2 *Vessels* al fine di considerare i due gruppi di stoccaggio,

trascurando dunque il buffer impiegato come polmone di bilanciamento; tale scelta è stata presa date le condizioni di impiego notevolmente meno critiche di quest'ultimo rispetto ai gruppi bombolai, caratterizzate da un ordine di grandezza di differenza sia in termini di pressione (40 bar - 500 bar) che di capacità (40 kg - 500 kg). Il numero di elementi scelti per gli altri componenti del sistema è stato assunto di caso in caso facendo ipotesi basate sulla configurazione tipica di impianti realmente esistenti.

Una volta determinate le frequenze di accadimento globali degli scenari di perdita relativi ai diversi elementi selezionati, si è scelto di considerare per il prosieguo dell'analisi due eventi in particolare per ognuno di essi:

- scenario di perdita caratterizzato dal tasso di occorrenza più elevato;
- scenario di perdita con le conseguenze potenzialmente più catastrofiche (portata di rilascio più elevata).

Le frequenze fornite da HyRAM+ sono infatti riferite a varie dimensioni di perdita: leak 0.01%, leak 0.1%, leak 1%, leak 10% e leak 100%; le percentuali, riferite all'area di flusso della tubazione di riferimento (come meglio illustrato nel Cap. 3), permettono di determinare il diametro dell'orifizio di perdita e conseguentemente la portata di rilascio. Per le apparecchiature di interesse del sistema (*compressor, vessel, valve, hose*) sono state dunque definite le caratteristiche dello scenario di perdita per le due condizioni succitate, riportando tipologia del *leakage* [%], diametro dell'orifizio [mm], portata di rilascio [kg/s] e frequenza globale di accadimento della perdita [1/anno]. Per gli altri due eventi considerati, *nozzle release* e *drive-off*, i risultati sono stati riportati per il solo leak 100%, in quanto unico scenario considerato in HyRAM+. A partire dalle frequenze così determinate è stato possibile approfondire la tipologia di evento conseguente alla perdita, analizzando due scenari distinti: accensione immediata con conseguente *jet fire* e accensione ritardata con conseguente esplosione (VCE). Note la tipologia di leakage e la relativa frequenza globale, la determinazione dei tassi di occorrenza dei due eventi succitati è stata realizzata mediante il prodotto tra la frequenza di accadimento totale e la probabilità di avere uno o l'altro fenomeno; quest'ultima viene fornita da HyRAM+ al variare della portata di rilascio come mostrato in *Tabella 26* (Cap. 3).

4.2.2 Analisi delle conseguenze

Una volta terminata la fase di determinazione delle frequenze di accadimento per i vari scenari legati all'impianto sopra descritto, il focus è stato spostato sulla valutazione delle

conseguenze derivanti dai fenomeni di rilascio finora discussi, con particolare attenzione alla determinazione delle distribuzioni di temperatura, irraggiamento termico e sovrappressione. Ciò è stato realizzato mediante l'impiego del software PHAST in due fasi:

- analisi dell'impatto di *jet fire* ed *explosion* mediante simulazioni basate su modelli ingegneristici, costruiti sulla base di correlazioni fenomenologiche e approcci analitici consolidati;
- valutazione conseguenze di un eventuale *jet fire* legato a perdite di vario genere mediante simulazioni CFD.

Le prime verranno indicate come simulazioni “semplificate”. Oltre a definire in maniera più chiara e precisa i pericoli derivanti da possibili eventi dannosi aventi luogo in un impianto di questo tipo, tale approccio ha permesso di effettuare un confronto finale tra le distanze dagli elementi pericolosi indicate nel DM del 07/07/2023, secondo le quali è stato inizialmente sviluppato il layout impiantistico, e quelle derivanti dalle simulazioni realizzate via software, così da definire l'affidabilità dello strumento di analisi (PHAST) e nel contempo il grado di conservatività del decreto di riferimento. Le distanze suggerite dal decreto sono state confrontate anche con altri riferimenti normativi, così da fornire una prospettiva più vasta degli approcci comunemente adottati.

Le simulazioni semplificate sono state condotte per ognuno degli scenari di interesse individuati nella fase di analisi delle frequenze, racchiudibili in cinque studi distinti, i quali sono stati realizzati a partire dai seguenti parametri di rilascio:

- Leak 0.01% su DN 6 a 350 bar (scenario plausibile caratterizzato da frequenza maggiore per il tubo flessibile);
- Leak 100% su DN 6 a 350 bar (scenario plausibile caratterizzato da portata maggiore per il tubo flessibile e unico scenario considerato per *nozzle release* e *drive-off*);
- Leak 0.01% su DN 40 a 500 bar (scenario plausibile caratterizzato da frequenza maggiore per il gruppo di stoccaggio, le valvole e il compressore);
- Leak 10% su DN 40 a 500 bar (scenario plausibile caratterizzato da portata maggiore per il gruppo di stoccaggio);
- Leak 100% su DN 40 a 500 bar (scenario plausibile caratterizzato da portata maggiore per le valvole e il compressore).

Per ognuno dei casi succitati le analisi sono state condotte con l'obiettivo di trarre informazioni accurate sulla distribuzione dell'area interessata da determinati livelli di intensità di irraggiamento termico (kW/m^2) e di sovrappressione (bar), come conseguenze rispettivamente di un *jet fire* e di una VCE derivanti dall'iniziale rilascio di idrogeno. A tal fine l'attenzione è stata concentrata su quattro tipologie di risultati fornite da PHAST; queste sono:

- *Radiation Ellips*, legata al *jet fire*, con soglie di attenzione per l'irraggiamento poste pari a 2.5, 4, 12.5 e 37.5 kW/m^2 ;
- *Radiation vs Distance*, legata al *jet fire*;
- *Worst case*, legata all'esplosione, con soglie di attenzione per l'*overpressure* poste pari a 0.03, 0.07, 0.14 e 0.35 bar;
- *Overpressure vs Distance*, legata all'esplosione.

Le soglie scelte sono state in entrambi i casi opportunamente selezionate a partire da quelle consigliate da PHAST, in quanto adeguate a definire le aree interessate da determinati livelli di rischio per gli occupanti e per le strutture. Il livello più basso corrisponde generalmente a condizioni che potrebbero provocare lesioni alle persone e danneggiamenti alle strutture a seguito di un'esposizione prolungata e non protetta, mentre il livello più elevato comporterebbe in tempi minimi la perdita di vite umane e il potenziale crollo delle strutture coinvolte. I valori limite impiegati risultano essere in linea con quelli scelti in studi pregressi e presenti nelle normative internazionali ed ogni valore differente è stato scelto al solo fine di garantire una valutazione maggiormente conservativa. Per quanto concerne i livelli scelti per la valutazione della radiazione termica risulta possibile trovare diversi riscontri in corrispondenza del DM 03/08/2015 e s.m.i. e conseguenti applicazioni; si segnala l'utilizzo di soglie simili nell'analisi riportata in *Assessing the Quantitative Risk of Urban Hydrogen Refueling Station in Seoul, South Korea, Using SAFETI Model* di H. Kwak et al. (2024) [9] e in altri studi selezionati in *Global risk assessment of hydrogen refueling stations: Trends, challenges, and future directions* (2025) di Park et al. [6]. Per le soglie di sovrappressione è invece possibile confrontarsi con le linee guida per gli stabilimenti a rischio incidente rilevante, come la direttiva *Seveso III*, ed osservarne l'applicazione negli articoli già citati per l'irraggiamento termico. Un ulteriore esempio riguardante le soglie di attenzione tipicamente adottate è presente in *Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station in an*

Urban Area di J. Kwak et al. (2023) [19], all'interno del quale vengono presentate anche delle brevi descrizioni dei danni alla persona causati dai livelli interessati.

Si noti che, oltre ad aver specificato di caso in caso la pressione di esercizio e il diametro dell'orifizio di uscita, per le cinque simulazioni è stato scelto di assumere un rilascio posto ad 1 m da terra in condizioni meteorologiche 1.5/F, corrispondenti ad un vento debole e ad una stabilità atmosferica molto elevata; si garantisce in questo modo la realizzazione di simulazioni nelle condizioni peggiori (*worst-condition scenario*).

Le simulazioni così realizzate hanno permesso non solamente di determinare le aree interessate dai predefiniti livelli di irraggiamento e sovrappressione, ma anche di ottenere ulteriori dati relativi alle condizioni di rilascio per ognuno degli scenari analizzati, come la temperatura del getto [°C], la massima portata di rilascio [kg/s], il tempo necessario per l'intero svolgimento del processo di rilascio [s] e la velocità del getto [m/s]. Tali parametri, oltre a rappresentare un interessante risultato dell'analisi, costituiscono anche i dati di input necessari per condurre mediante PHAST le simulazioni CFD in studi *standalones*; si è scelto infatti di selezionare la tipologia di analisi *standalone* tra quelle proposte dal software al fine di valutare le conseguenze degli eventi di rilascio a partire dai dati a disposizione tratti dalle altre analisi.

Dunque, a seguito delle simulazioni semplificate sono state condotte delle simulazioni maggiormente approfondite basate sulla fluidodinamica computazionale, in modo da determinare gli effetti conseguenti ad un *jet fire* scaturito a partire dal rilascio avvenuto in corrispondenza di diversi possibili elementi, tenendo conto delle barriere presenti all'interno dell'impianto e della geometria generale del layout. Essendo tale fase dello studio concentrata sul solo *jet fire* e trascurando dunque l'esplosione e le sue conseguenze, i risultati sui quali si è posta particolare attenzione sono:

- *Radiation contour*: risultato grafico e proiezione sull'impianto reale, con soglie di attenzione corrispondenti a quelle già impiegate nelle simulazioni semplificate;
- *Temperature contour*: risultato grafico e proiezione sull'impianto reale, con soglie di attenzione pari a 60, 80, 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 °C.

Gli scenari analizzati sono invece gli stessi già presentati nella fase precedente, fatta eccezione per quello corrispondente ad un leak 0.01% su DN 6 a 350 bar, che è stato trascurato in quanto privo di risultati confrontabili e utili a causa delle dimensioni estremamente ridotte del rilascio. In questo caso, volendo tener conto dell'influenza delle

strutture facenti parte del sistema, ogni scenario è stato analizzato ipotizzando un luogo di origine del rilascio. In particolare:

- Leak 100% su DN 6 a 350 bar: perdita in corrispondenza del dispenser;
- Leak 0.01% su DN 40 a 500 bar: perdita in corrispondenza del gruppo compressori;
- Leak 10% su DN 40 a 500 bar: perdita in corrispondenza del gruppo di stoccaggio;
- Leak 100% su DN 40 a 500 bar: perdita in corrispondenza del gruppo compressori.

Le simulazioni sono state condotte ipotizzando un rilascio orizzontale ad 1 m da terra diretto verso nord e condizioni meteorologiche 1.5/F, con vento orizzontale diretto anch'esso verso nord.

Si precisa che i risultati ottenuti nell'analisi delle conseguenze sono stati validati mediante un lavoro di confronto con i risultati derivanti da studi del settore precedenti, così da assicurarsi che le simulazioni svolte fossero accurate. Ciò è stato realizzato verificando che per scenari caratterizzati da portate di rilascio simili le distanze ottenute fossero simili.

I risultati inerenti alle conseguenze dei fenomeni di perdita verranno riportati nella sezione seguente.

4.3 Presentazione e discussione dei risultati

Questa sezione verrà riservata ai risultati ottenuti mediante le analisi condotte, dapprima dedicando spazio alle frequenze di accadimento determinate attraverso l'impiego di HyRAM+ e in seguito riportando i risultati relativi alle conseguenze degli scenari di perdita studiati. L'esposizione dei risultati verrà opportunamente accompagnata da commenti descrittivi e valutativi.

4.3.1 Caratteristiche di perdita e frequenze di accadimento

Nelle tabelle seguenti si riportano le caratteristiche di perdita (diametro dell'orifizio e portata di rilascio calcolata mediante HyRAM+ e PHAST) e i tassi di evento in relazione ad ognuno degli elementi del sistema considerati nell'analisi; si riportano in particolare gli scenari caratterizzati da una maggiore frequenza di rilascio.

Elemento	P [bar]	leak	DN	Di [mm]	A [m ²]	A _{leak} [m ²]	D _{leak} [mm]
Compressore	500	0.01%	40	38.1	1.14E-03	1.14E-07	3.81E-01
Vessel	500	0.01%	40	38.1	1.14E-03	1.14E-07	3.81E-01
Valve	500	0.01%	40	38.1	1.14E-03	1.14E-07	3.81E-01
Hose	350	0.01%	6	6.35	3.17E-05	3.17E-09	6.35E-02

Tabella 32: Caratteristiche dello scenario di perdita nei casi con maggior tasso di evento

Elemento	Q _{HyRAM+} [kg/s]	Q _{PHAST} [kg/s]	f tot. [anno ⁻¹]	f immediate [anno ⁻¹]	f delayed [anno ⁻¹]
Compressore	2.44E-03	2.80E-03	1.99E-01	1.60E-04	7.98E-05
Vessel	2.44E-03	2.80E-03	3.00E-06	2.40E-09	1.20E-09
Valve	2.44E-03	2.80E-03	7.17E-02	5.73E-05	2.87E-05
Hose	4.75E-05	4.75E-05	5.79E-04	4.63E-07	2.32E-07

Tabella 33: Portate di rilascio e frequenze di accadimento nei casi con maggior tasso di evento

Presentati dunque i valori relativi agli scenari caratterizzati da un maggiore tasso di occorrenza, si riportano nelle tabelle poste di seguito quelli legati alle casistiche contraddistinte da quantità di rilascio maggiori e quindi da conseguenze potenziali maggiormente critiche.

Elemento	P [bar]	leak	DN	Di [mm]	A [m ²]	A _{leak} [m ²]	D _{leak} [mm]
Compressore	500	100%	40	38.1	1.14E-03	1.14E-03	3.81E+01
Vessel	500	10%	40	38.1	1.14E-03	1.14E-04	1.20E+01
Valve	500	100%	40	38.1	1.14E-03	1.14E-03	3.81E+01
Hose	350	100%	6	6.35	3.17E-05	3.17E-05	6.35E+00

Tabella 34: Caratteristiche dello scenario di perdita nei casi peggiori in termini di quantità di rilascio

Elemento	Q _{HyRAM+} [kg/s]	Q _{PHAST} [kg/s]	f _{TOT} [anno ⁻¹]	f immediate [anno ⁻¹]	f delayed [anno ⁻¹]
Compressore	2.44E+01	2.39E+01	2.90E-05	6.67E-07	3.48E-07
Vessel	2.44E+00	2.80E+00	1E-06	5.30E-09	2.70E-09

<i>Valve</i>	2.44E+01	2.39E+01	1.20E-04	2.76E-06	1.44E-06
<i>Hose</i>	4.75E-01	4.75E-01	6.20E-05	3.29E-07	1.67E-07

Tabella 35: Portate di rilascio e frequenze di accadimento nei casi peggiori in termini di quantità di rilascio

Per ultimi si riportano i dati ottenuti in relazione ai due scenari di perdita legati all'errore umano: *drive-offs* e *nozzle release*. Si ricorda che per i due casi specificati risultano presenti solamente i risultati derivanti da una tipologia di perdita, corrispondente ad un leak 100%.

Elemento	P [bar]	leak	DN	Di [mm]	A [m ²]	A _{leak} [m ²]	D _{leak} [mm]
<i>Drive-offs</i>	350	100%	6	6.35	3.17E-05	3.17E-05	6.35E+00
<i>Nozzle release</i>	350	100%	6	6.35	3.17E-05	3.17E-05	6.35E+00

Tabella 36: Caratteristiche dello scenario di perdita nei due casi legati all'attività di rifornimento

Elemento	Q _{HyRAM+} [kg/s]	Q _{PHAST} [kg/s]	f _{TOT} [anno ⁻¹]	f immediate [anno ⁻¹]	f delayed [anno ⁻¹]
<i>Drive-offs</i>	4.75E-01	4.75E-01	4.10E-05	2.17E-07	1.11E-07
<i>Nozzle release</i>	4.75E-01	4.75E-01	1.60E-02	8.48E-05	4.32E-05

Tabella 37: Portate di rilascio e frequenze di accadimento nei casi legati all'attività di rifornimento

Risulta evidente dai valori riportati che le frequenze di accadimento più elevate corrispondono alle perdite caratterizzate da diametri dell'orifizio molto ridotti; per *compressor*, *vessel*, *valve* e *hose* il leak 0.01% rappresenta infatti lo scenario più probabile, mentre la possibilità di avere perdite caratterizzate da un diametro e una portata di rilascio maggiori risulta fortemente più bassa. Inoltre, a partire dal tasso di occorrenza globale, gli eventi annui in termini di accensione immediata e accensione ritardata risultano ancor più ridotti, essendo prevalenti i fenomeni di *shutdown* e mancata accensione, a prescindere dal tipo di *leakage* in esame. Per quanto concerne gli scenari maggiormente catastrofici, tutti gli elementi considerati presentano una frequenza, seppur ridotta, diversa da zero in corrispondenza del leak 100%, eccezion fatta per il gruppo di stoccaggio, per il quale è stato pertanto considerato lo scenario relativo al leak 10%.

Le portate di rilascio determinate mediante HyRAM+ e PHAST e riportate per ognuna delle casistiche considerate risultano coerenti, essendo le prime inferiori alle seconde, in quanto PHAST restituisce il *peak flowrate*, ossia il valore massimo della portata durante il fenomeno di rilascio in esame.

4.3.2 Analisi delle conseguenze mediante simulazioni semplificate

Per quanto concerne le simulazioni semplificate delle conseguenze legate ai fenomeni di *jet fire* ed esplosione si riportano di seguito i risultati tratti in relazione alle cinque casistiche analizzate. Si noti che le coordinate “zero” presenti sui grafici che verranno presentati rappresentano il punto di origine del fenomeno di perdita.

Per un leak 0,01% su DN 40 a 500 bar, valido per la valutazione di perdite derivanti da compressore, gruppo di stoccaggio e valvole nello scenario proposto in *Tabella 32* e *Tabella 33*, si hanno unicamente i grafici legati all’irraggiamento termico riportati di seguito, in quanto a causa delle dimensioni estremamente ridotte dell’orifizio di uscita e delle minime portate di rilascio non è possibile determinare effetti di sovrappressione legati all’esplosione.

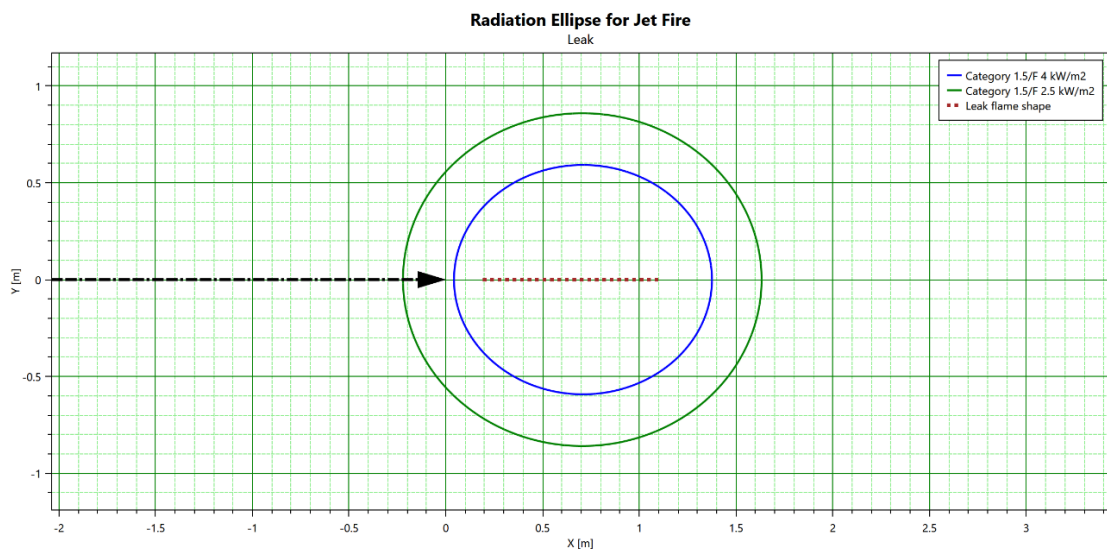


Figura 67: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 0.01% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST

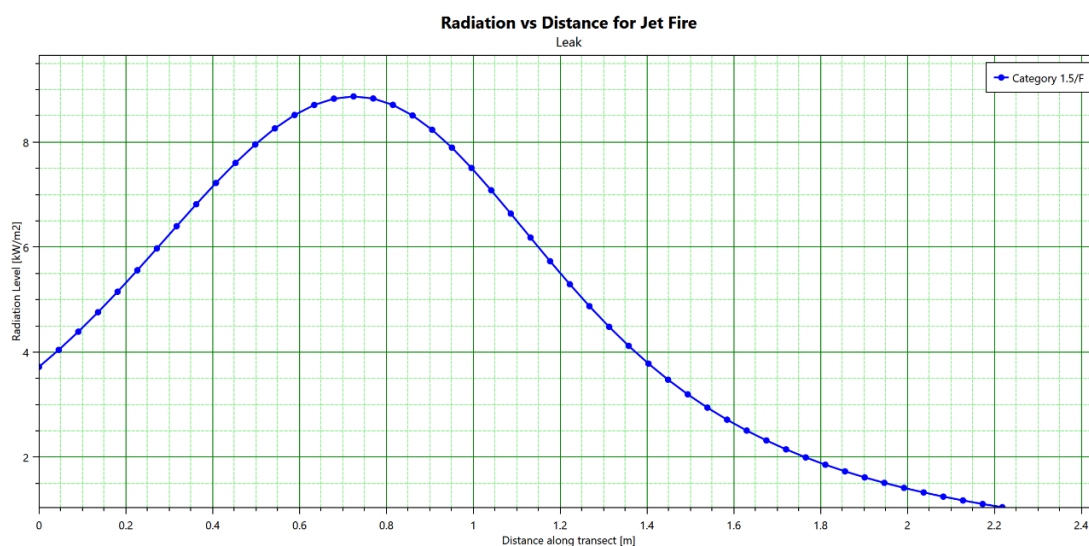


Figura 68: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 0.01% su DN 40 a 500 bar; grafico tratto da PHAST

Oltre all'assenza di riscontri riguardanti il fenomeno di esplosione, risulta evidente dai grafici illustrati nelle ultime due immagini come in corrispondenza di questo primo scenario analizzato non si verifichi il raggiungimento della terza soglia di intensità dell'irraggiamento termico considerata (12.5 kW/m^2), essendo il valore massimo raggiunto lievemente inferiore a 9 kW/m^2 , ottenuto ad una distanza di 0.73 m dal punto di origine della perdita. L'area caratterizzata da un'intensità dell'irraggiamento termico di almeno 2.5 kW/m^2 risulta peraltro essere molto ridotta, espandendosi diametralmente per meno di 2 m.

Per un leak 10% su DN 40 a 500 bar, valido per la valutazione di perdite derivanti dal gruppo di stoccaggio nello scenario proposto in *Tabella 34* e *Tabella 35*, si hanno invece i seguenti riscontri:

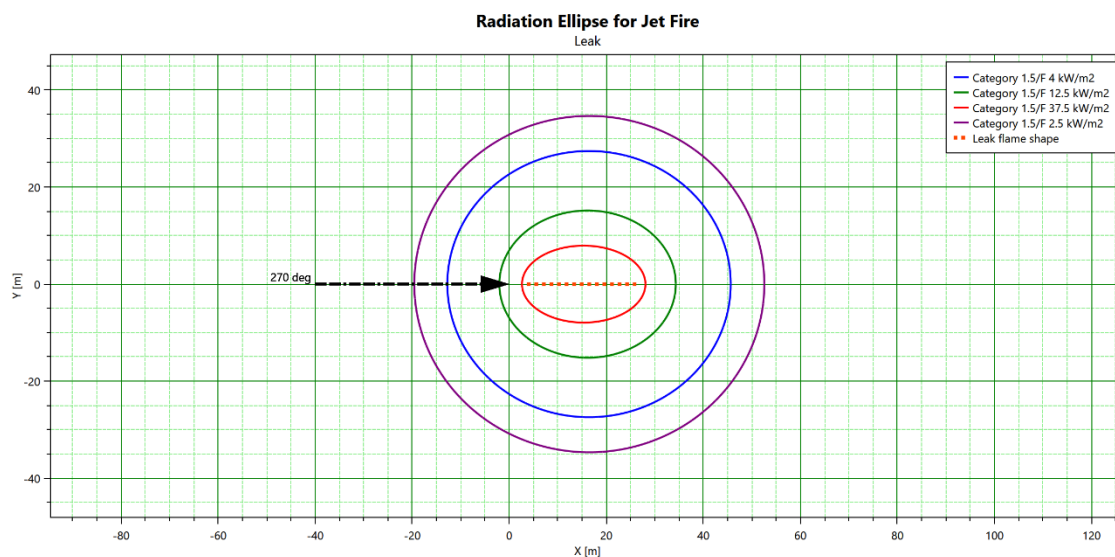


Figura 69: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 10% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST

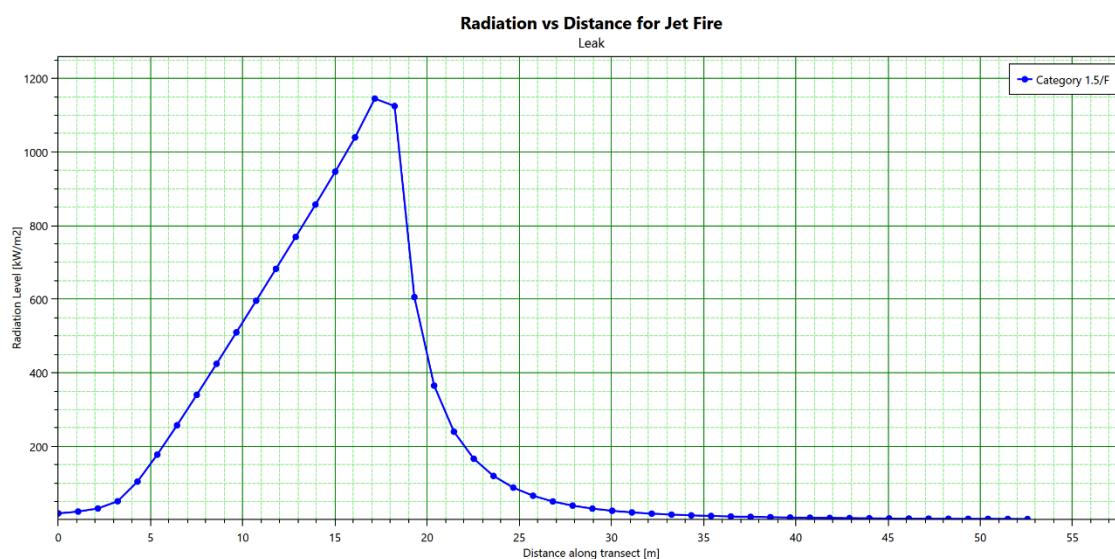


Figura 70: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 10% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST

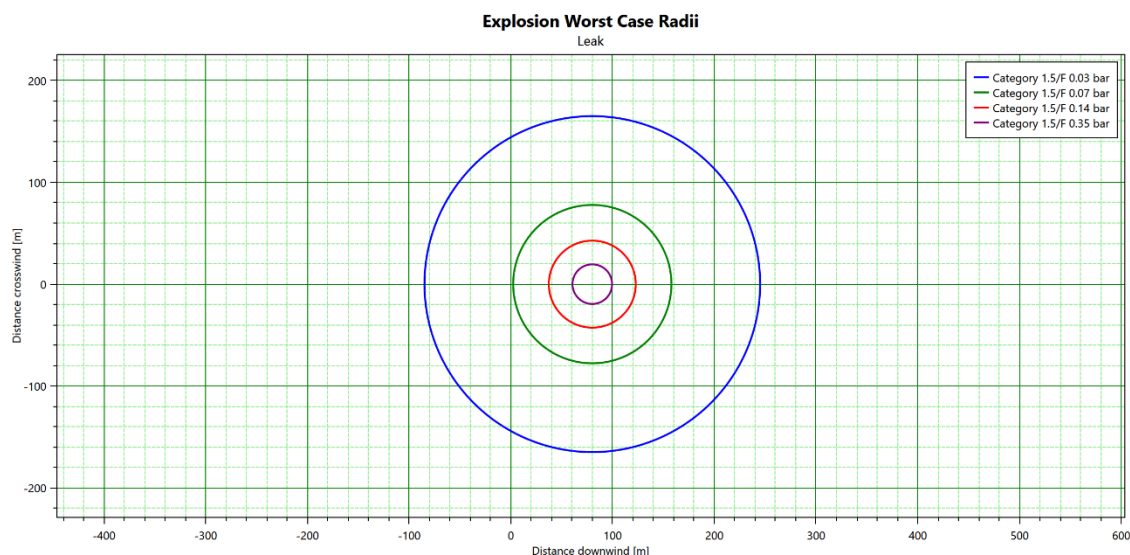


Figura 71: Distribuzione delle aree di sovrappressione conseguenti all'esplosione per leak 10% su DN 40 a 500 bar; grafico tratto da PHAST

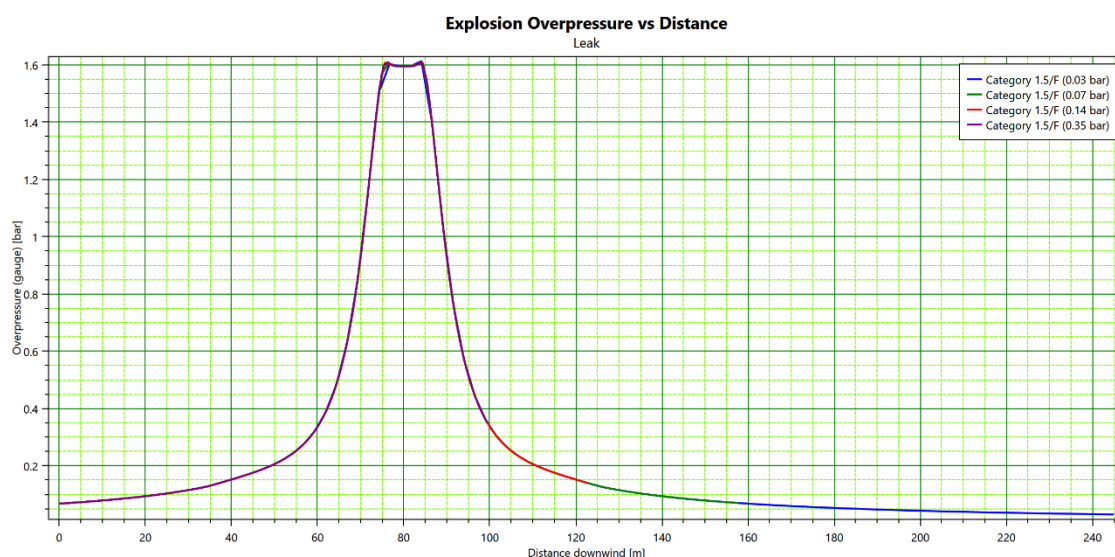


Figura 72: Andamento della sovrappressione d'esplosione in funzione della distanza per leak 10% su DN 40 a 500 bar; grafico tratto da PHAST

In questo caso, a differenza del precedente, risultano visibili tutti i livelli richiesti sia per l'irraggiamento termico che per la pressione. In particolare, l'area interessata da un'intensità di irraggiamento termico di almeno 2.5 kW/m^2 risulta essere anche particolarmente ampia, espandendosi nella direzione più critica per circa 70 m; tale zona si sviluppa prevalentemente nello spazio posto anteriormente rispetto al punto di origine, in maniera coerente con la direzione del rilascio. Ancora più vasta è l'area circolare

interessata da un livello di sovrappressione di almeno 0.03 bar, espandendosi per più di 300 m, anch'essa prevalentemente nella direzione di rilascio.

Per il leak 100% su DN 40 a 500 bar, valido per la valutazione di perdite derivanti da compressori e valvole nello scenario proposto in *Tabella 34* e *Tabella 35*, si ha invece:

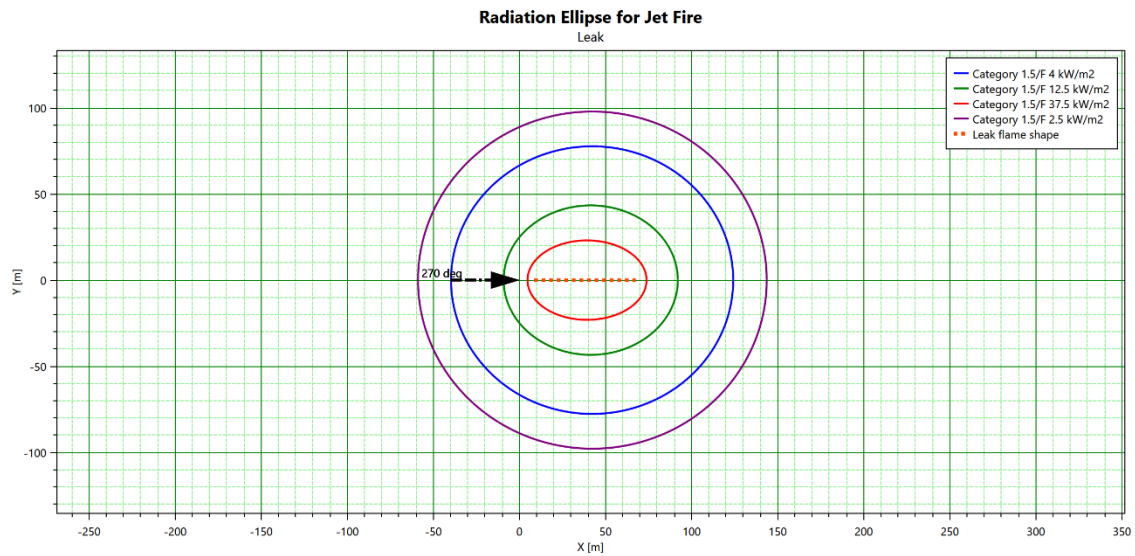


Figura 73: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 100% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST

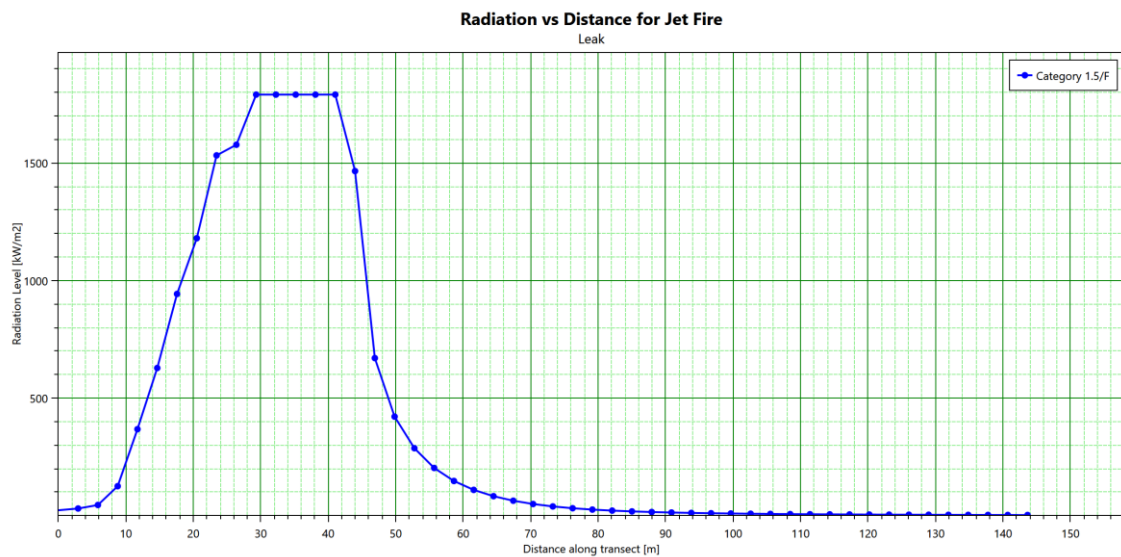


Figura 74: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 100% su DN 40 a 500 bar, grafico tratto da PHAST

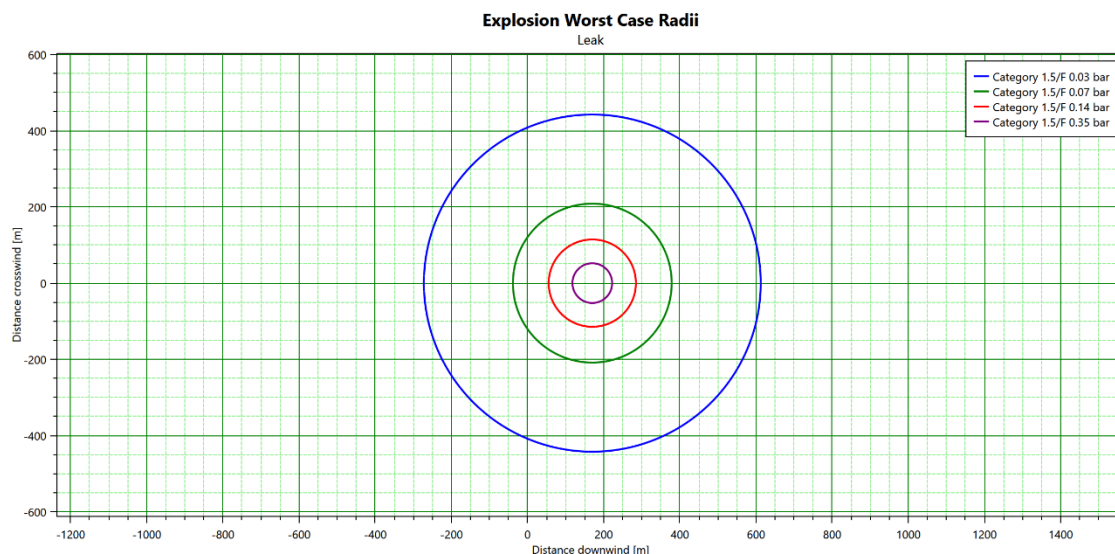


Figura 75: Distribuzione delle aree di sovrappressione conseguenti all'esplosione per leak 100% su DN 40 a 500 bar; grafico tratto da PHAST

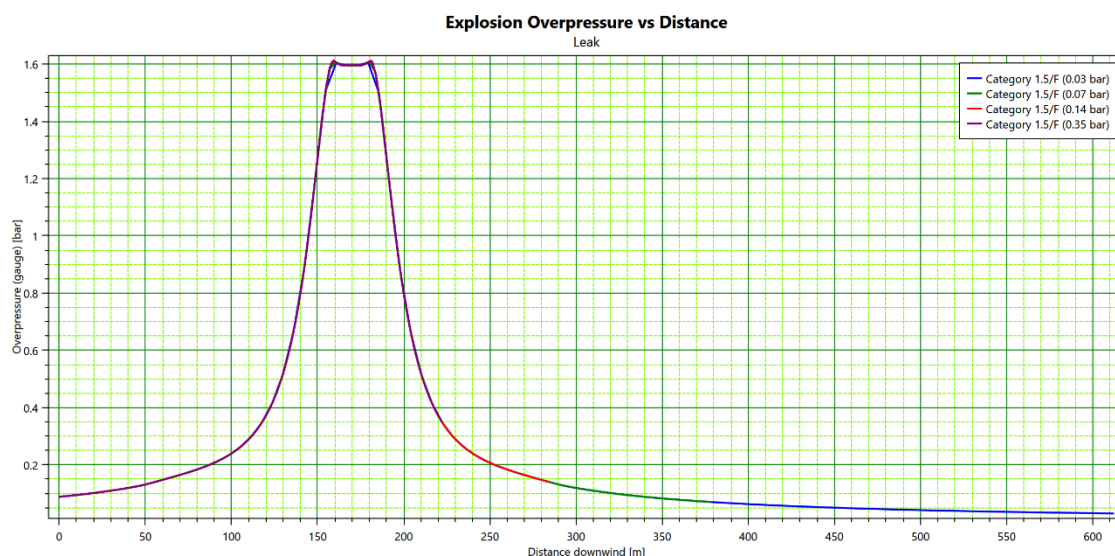


Figura 76: Andamento della sovrappressione d'esplosione in funzione della distanza per leak 100% su DN 40 a 500 bar; grafico tratto da PHAST

L'entità del danno relativo allo scenario di perdita appena presentato emerge chiaramente dai grafici riportati. Rispetto ai casi precedenti, le zone interessate da un danno effettivo derivante dall'irraggiamento termico o dalla sovrappressione risultano infatti notevolmente più ampie, raggiungendo distanze dall'origine nella direzione di rilascio rispettivamente di 180 m e 600 m. Anche le soglie più elevate, pari a 37.5 kW/m^2 e 0.35 bar, vengono raggiunte all'interno di aree piuttosto vaste, caratterizzate da un'espansione nella direzione più critica di circa 70 m e 100 m.

Per un leak 0,01% su DN 6 a 350 bar, valido per la valutazione di perdite derivanti dal tubo flessibile nello scenario proposto in *Tabella 32* e *Tabella 33*, è stato possibile trarre unicamente il grafico relativo all'intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza, in quanto a causa delle dimensioni estremamente ridotte dell'orifizio di uscita e delle minime portate di rilascio non è possibile determinare effetti di sovrappressione dovuti all'esplosione e le *radiation ellipse* legate al *jet fire*. Il livello di intensità di irraggiamento termico risulta trascurabile. Si illustra di seguito il grafico ottenuto:

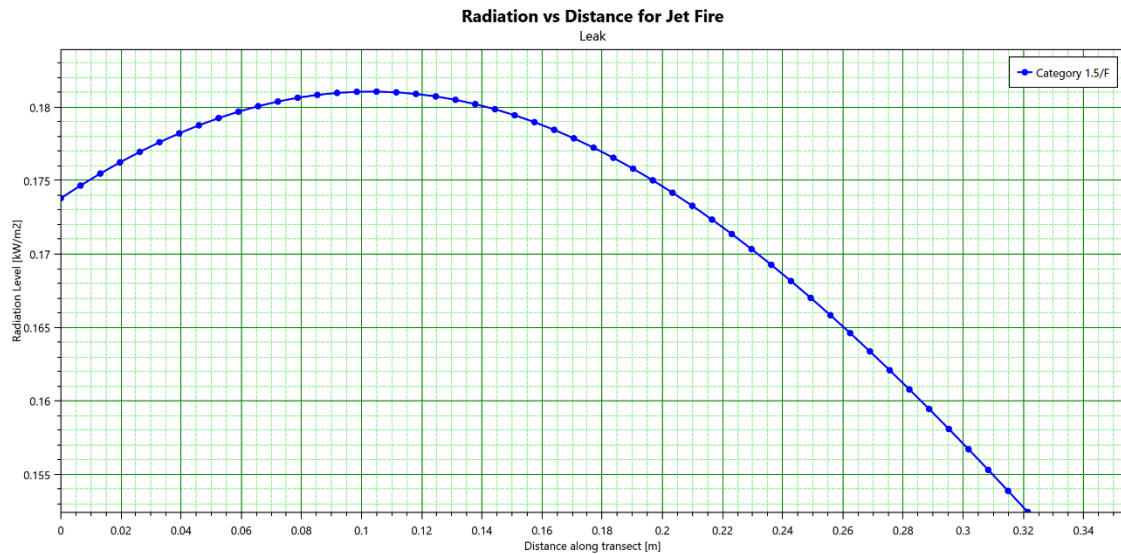


Figura 77: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 0.01% su DN 6 a 350 bar; grafico tratto da PHAST

L'ultimo caso analizzato corrisponde al leak 100% su DN 6 a 350 bar e risulta valido per la valutazione di perdite derivanti dal tubo flessibile, nello scenario proposto in *Tabella 34* e *Tabella 35*, e per quelle legate a *nozzle release* e *drive-offs*, illustrate in *Tabella 36* e *Tabella 37*. Si presentano di seguito i risultati.

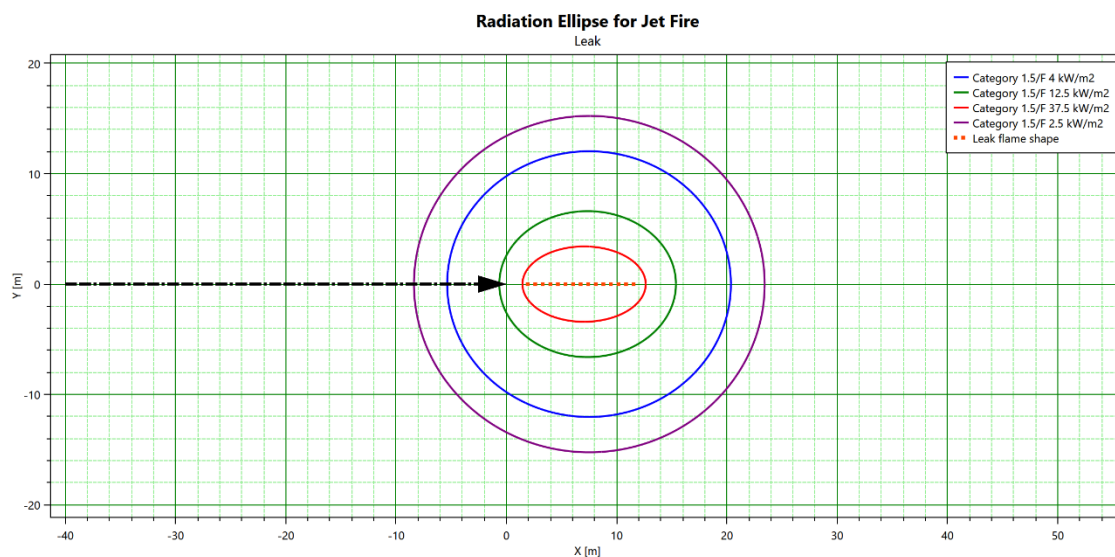


Figura 78: Radiation ellipse conseguente al jet fire con soglie prestabilite per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST

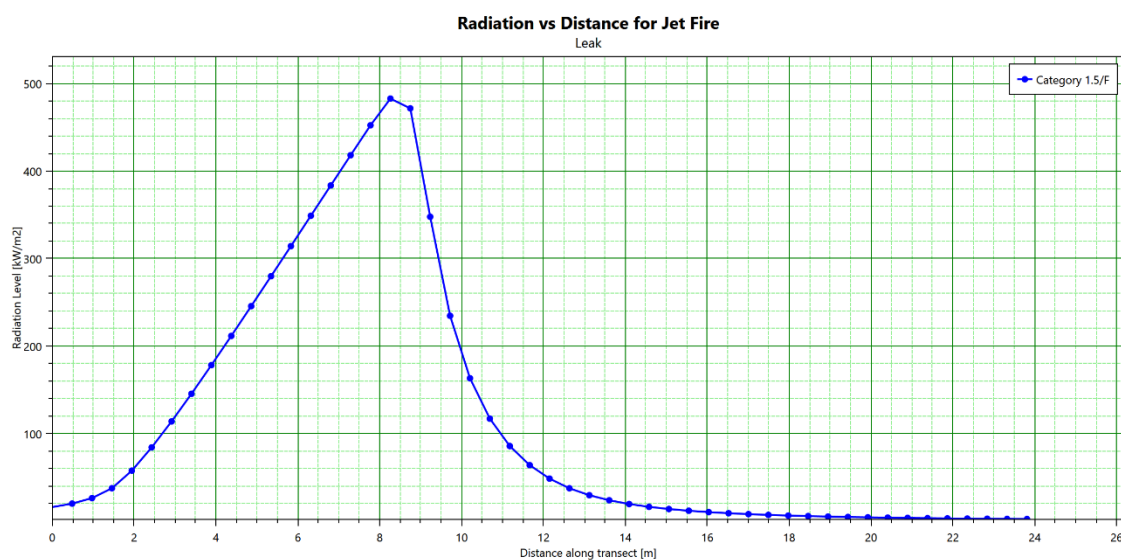


Figura 79: Intensità dell'irraggiamento in funzione della distanza per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST

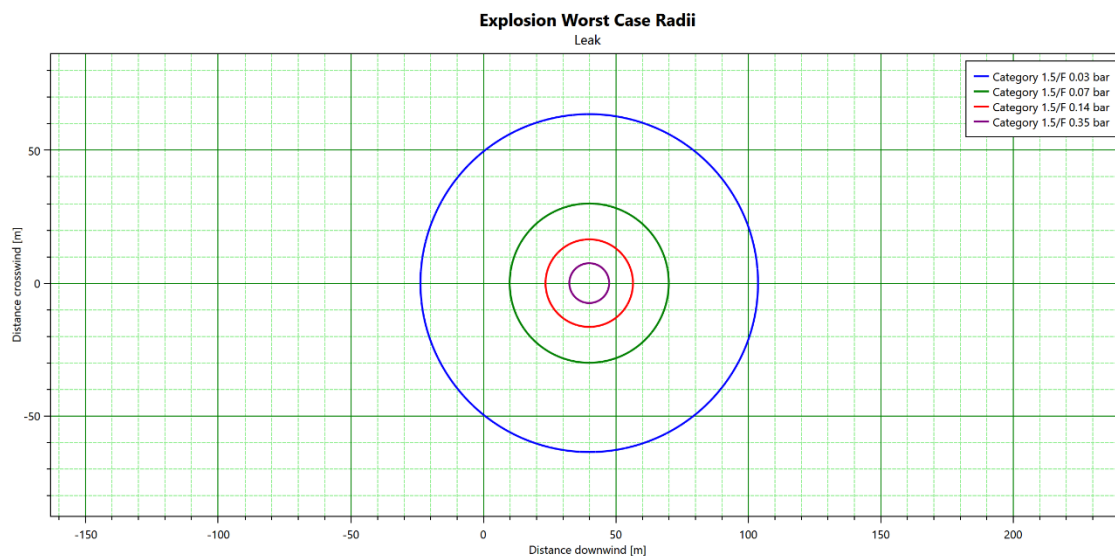


Figura 80: Distribuzione delle aree di sovrappressione conseguenti all'esplosione per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST

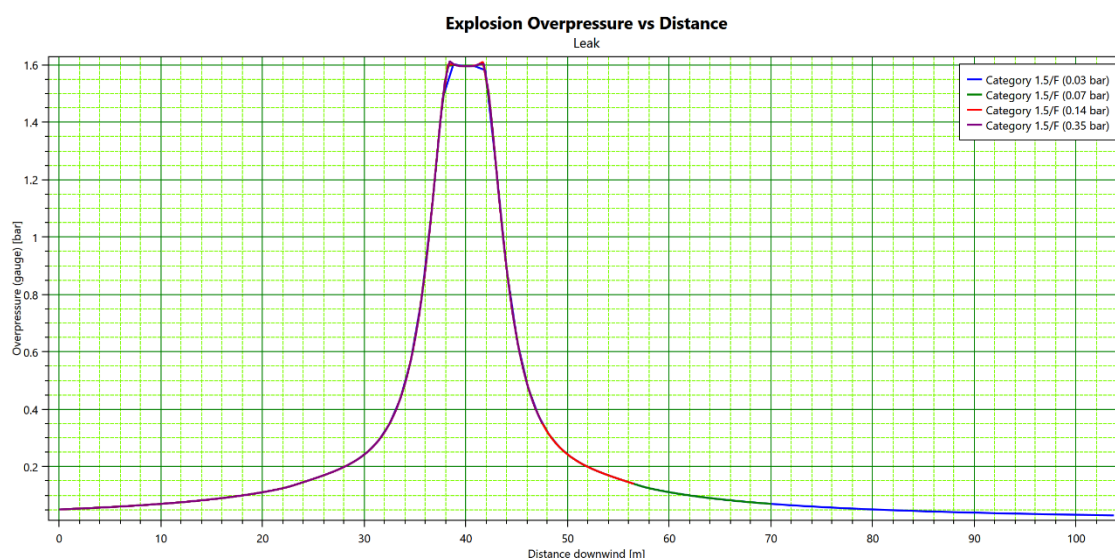


Figura 81: Andamento della sovrappressione d'esplosione in funzione della distanza per leak 100% su DN 6 a 350 bar, grafico tratto da PHAST

Per questo ultimo caso studio si riscontra dalle simulazioni semplificate il raggiungimento di tutte le soglie di attenzione prefissate, con ampiezze coerentemente inferiori rispetto a quelle precedentemente ottenute per orifizi di perdita più ampi e pressioni maggiori. In particolare, la zona caratterizzata da un'intensità di irraggiamento termico di almeno 2.5 kW/m² si espande diametralmente per circa 32 m, mentre quella interessata da un livello di sovrappressione di almeno 0.03 bar risulta maggiore di 120 m.

Si riportano nelle tabelle seguenti le massime distanze alle quali si manifestano i livelli di irraggiamento termico e di sovrappressione scelti per gli scenari analizzati, le aree delle ellissi isovalore di influenza del *jet fire* e i diametri delle circonferenze isovalore di influenza della VCE; le tabelle così strutturate risultano utili per l'attività di confronto tra gli effetti dei diversi scenari (righe delle tabelle).

Leak	DN	2.5 kW/m ²	4 kW/m ²	12.5 kW/m ²	37.5 kW/m ²
0.01%	6	-	-	-	-
100%	6	23.4 m	20.4 m	15.4 m	12.6 m
0.01%	40	1.6 m	1.4 m	-	-
10%	40	52.6 m	45.6 m	34.3 m	28.1 m
100%	40	143.6 m	124.2 m	92 m	73.8 m

Tabella 38: Distanze massime dall'origine di raggiungimento dei valori soglia per l'irraggiamento termico nei vari scenari

Leak	DN	Lunghezza fiamma	2.5 kW/m ²	4 kW/m ²	12.5 kW/m ²	37.5 kW/m ²
0.01%	6	0.16 m	-	-	-	-
100%	6	12.28 m	761.14 m ²	486.37 m ²	166.36 m ²	59.92 m ²
0.01%	40	1.13 m	2.5 m ²	1.24 m ²	-	-
10%	40	27.26 m	3923.99 m ²	2514 m ²	865.77 m ²	316.39 m ²
100%	40	71.34 m	31133 m ²	19996.4 m ²	6892.94 m ²	2502.81 m ²

Tabella 39: Lunghezza di fiamma e area dell'ellisse isovalore di irraggiamento termico per i vari scenari di rilascio

Leak	DN	0.03 bar	0.07 bar	0.14 bar	0.35 bar
0.01%	6	-	-	-	-
100%	6	103.7 m	70 m	56.5 m	47.5 m
0.01%	40	-	-	-	-
10%	40	245 m	157.8 m	122.7 m	99.5 m
100%	40	612.3 m	378.5 m	284.5 m	222.1 m

Tabella 40: Distanze massime dall'origine di raggiungimento dei valori soglia per la sovrappressione nei vari scenari

Leak	DN	0.03 bar	0.07 bar	0.14 bar	0.35 bar
0.01%	6	-	-	-	-
100%	6	127.42 m	60.06 m	32.99 m	15.02 m
0.01%	40	-	-	-	-
10%	40	329.93 m	155.5 m	85.42 m	38.9 m
100%	40	884.55 m	416.91 m	229.02 m	104.28 m

Tabella 41: Diametri delle circonferenze isovalore di sovrappressione per i vari scenari di rilascio

Come già anticipato, la validazione delle simulazioni finora svolte è stata realizzata confrontandone i risultati con quelli conseguiti in studi precedenti. In generale, i risultati ottenuti mediante il processo finora esposto risultano coerenti e in linea con quelli presenti in altri casi studio già discussi precedentemente nella trattazione, presentando valori confrontabili con quelli ottenuti per portate di rilascio simili sia in termini di irraggiamento termico legato al *jet fire* che di sovrappressione legata alla VCE. Gli studi con i quali è stato effettuato il confronto sono: *Assessing the Quantitative Risk of Urban Hydrogen Refueling Station in Seoul, South Korea, Using SAFETI Model* (2024) di Kwak et al. [9], *Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station* (2021) di Park et al. [36] e *Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station in an Urban Area* (2023) di Kwak et al. [19]. Si noti che le distanze e i diametri determinati risultano ovviamente differenti tra i vari studi, dipendendo fortemente dagli strumenti impiegati e dalle assunzioni fatte in fase di simulazione; nonostante ciò, risulta positivo constatare che i risultati ottenuti nel presente lavoro siano coerenti con quelli riportati in studi accademici simili.

4.3.3 Analisi delle conseguenze mediante simulazioni CFD

In questa sezione si riportano i risultati derivanti dalle simulazioni CFD svolte in merito ai quattro casi studio espliciti nella sezione precedente. Si ricorda che l'attenzione dell'analisi è stata concentrata sul solo fenomeno di *jet fire*, con l'obiettivo di determinare le distribuzioni dell'irraggiamento termico e delle zone aventi determinati livelli di temperatura. Per ognuno degli scenari verranno riportate le immagini reputate maggiormente utili per un'adeguata e corretta valutazione del fenomeno.

Prima di presentare i risultati, si espongono in *Tabella 42* i parametri di input impiegati per i quattro scenari, derivanti dalle simulazioni semplificate precedentemente condotte.

Leak	DN	Q [kg/s]	D _{leak} [mm]	T [°C]	v [m/s]	Origine	Direzione rilascio	Direzione vento
100%	6	0,4748	6,35	-132,00	2188,79	Dispenser	Nord	Nord
0,01%	40	0,0028	0,381	-133,95	2256,42	Gruppo compressori	Nord	Nord
10%	40	2,7961	12	-133,90	2256,42	Gruppo stoccaggio	Nord	Nord
100%	40	23,8986	38,1	-133,95	2256,42	Gruppo compressori	Nord	Nord

Tabella 42: Parametri di input per le simulazioni CFD

Si noti che la direzione di rilascio da analizzare è stata scelta per ognuno degli scenari considerati in maniera indipendente, individuando la direzione che permettesse di considerare l'evento maggiormente critico per la sicurezza dell'impianto. La direzione nord risulta particolarmente interessante ai fini della simulazione in quanto rilasci di questo tipo aventi origine nei punti prestabiliti coinvolgono le altre strutture e le zone sensibili del sistema, non venendo da subito frenate da barriere o altri sistemi di contenimento.

Al fine di facilitare la visione e la conseguente interpretazione dei risultati illustrati in forma grafica, nelle figure seguenti si riportano le legende utili all'individuazione delle soglie di attenzione per la temperatura e per l'intensità di irraggiamento termico.

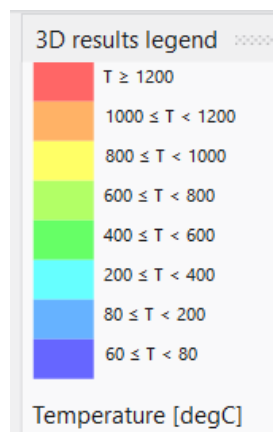


Figura 82: Legenda dei risultati grafici relativi alla distribuzione delle zone isotermitiche, tratta da PHAST

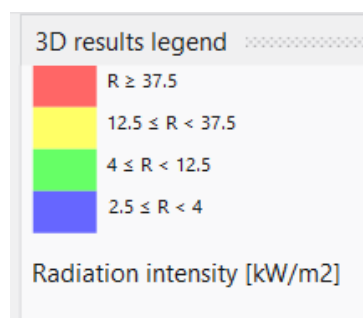


Figura 83: Legenda dei risultati grafici relativi alla distribuzione dei livelli di irraggiamento termico, tratta da PHAST

Si specifica inoltre che le superfici isovalore di intensità di irraggiamento e temperatura rappresentate nelle figure seguenti fanno riferimento rispettivamente ad un valore di 4 kW/m² e di 300 °C.

Per quanto concerne il primo dei casi analizzati, relativo ad un leak 100% su DN 6 in corrispondenza del dispenser, si riportano di seguito i grafici ottenuti relativamente alla distribuzione delle zone di temperatura e di quelle caratterizzate da determinati livelli di intensità di irraggiamento termico, in questo ordine.

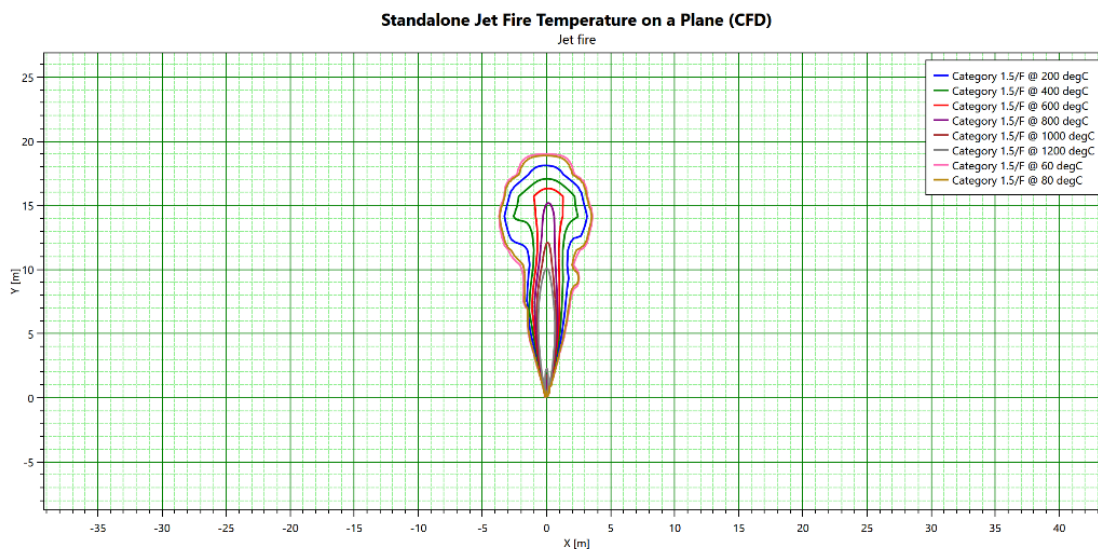


Figura 84: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

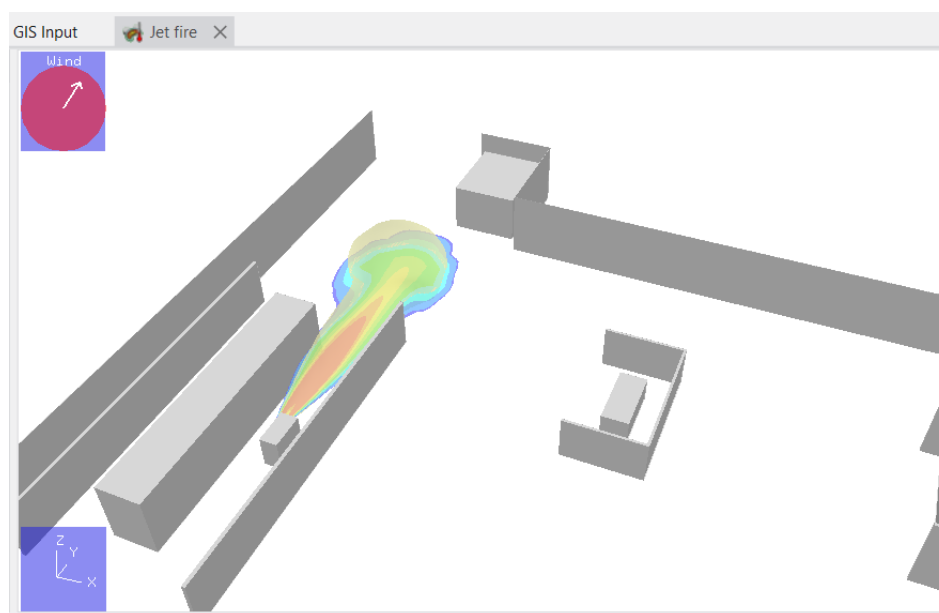


Figura 85: Superficie isotermica e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST



Figura 86: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

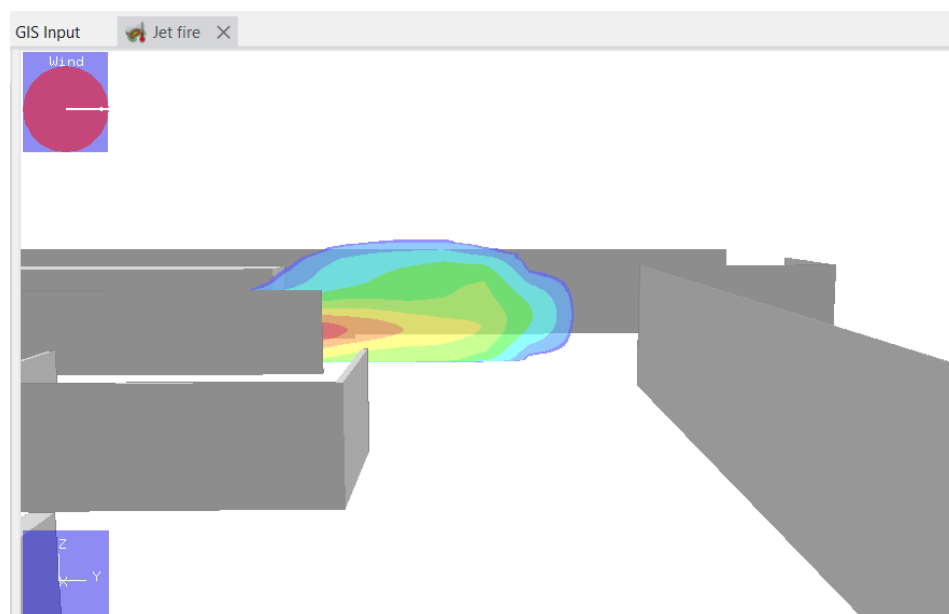


Figura 87: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

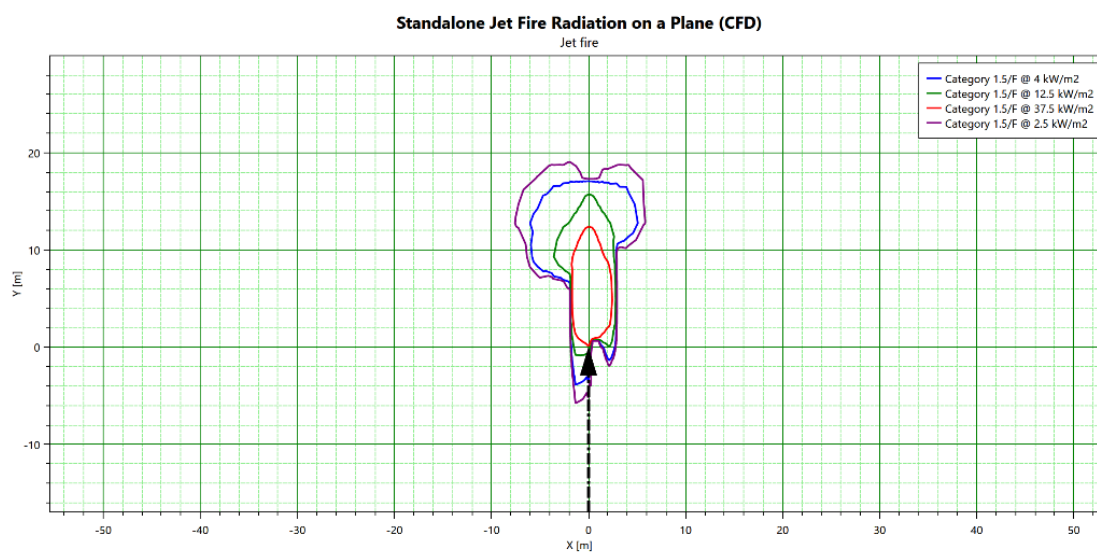


Figura 88: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

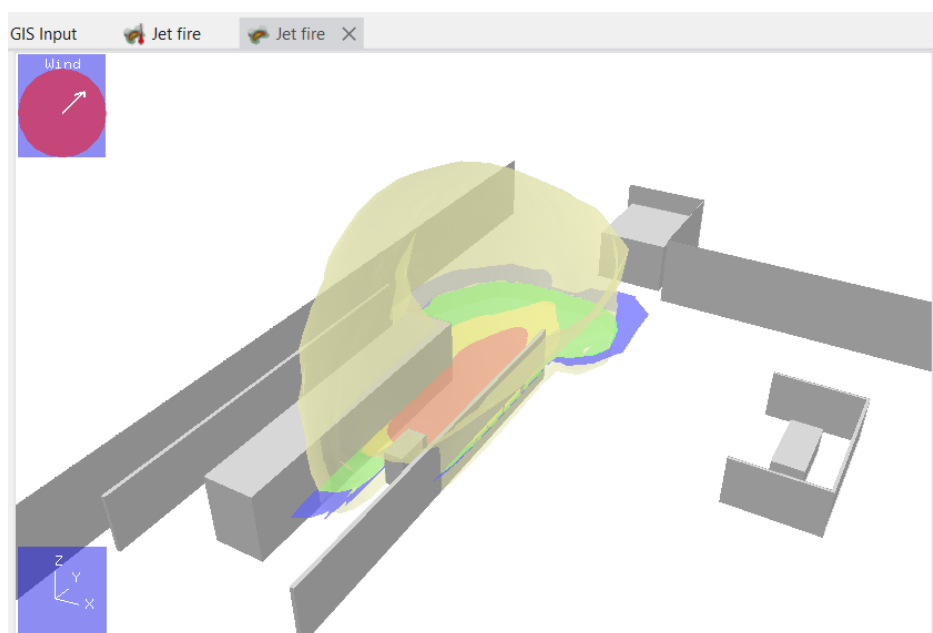


Figura 89: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

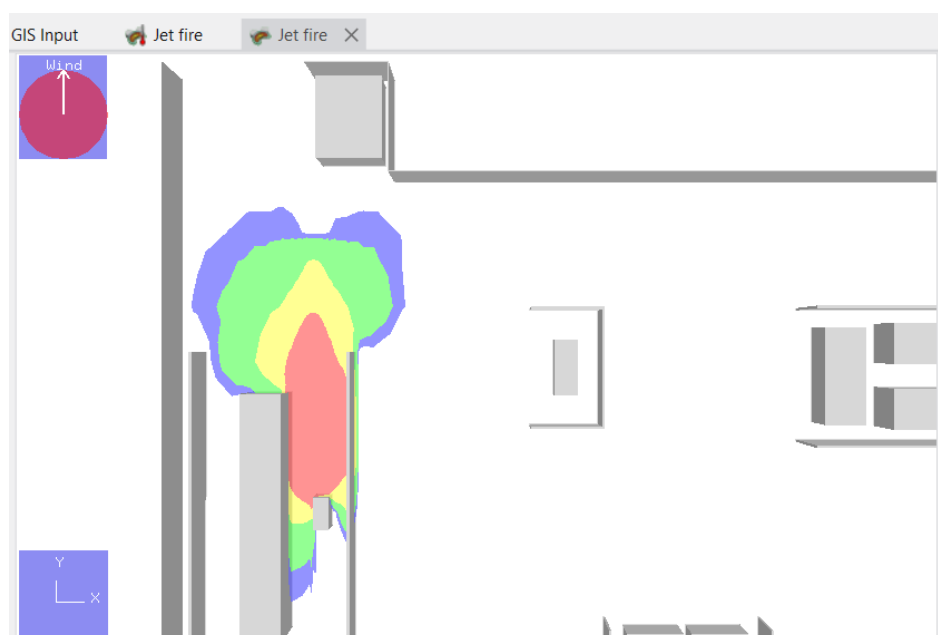


Figura 90: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

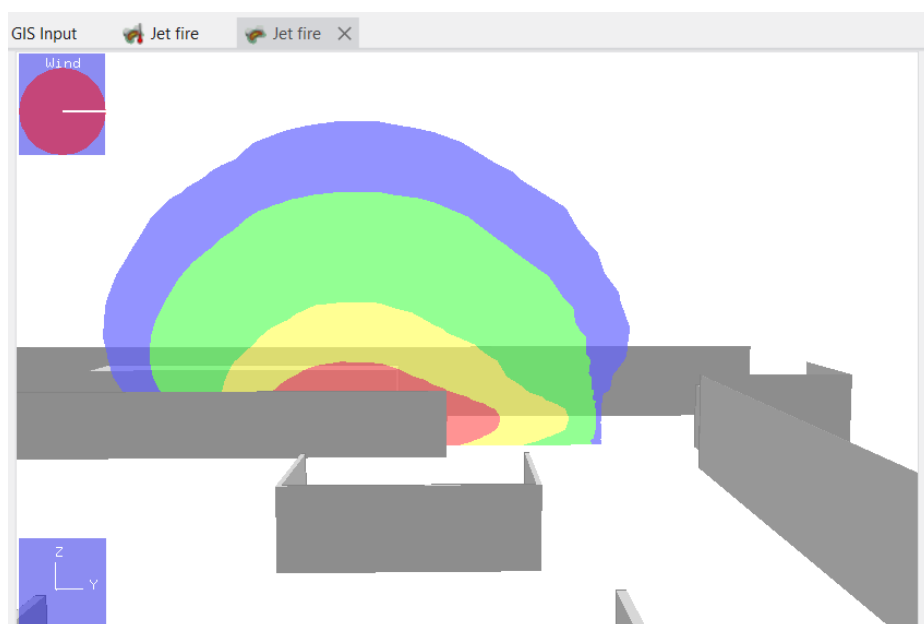


Figura 91: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

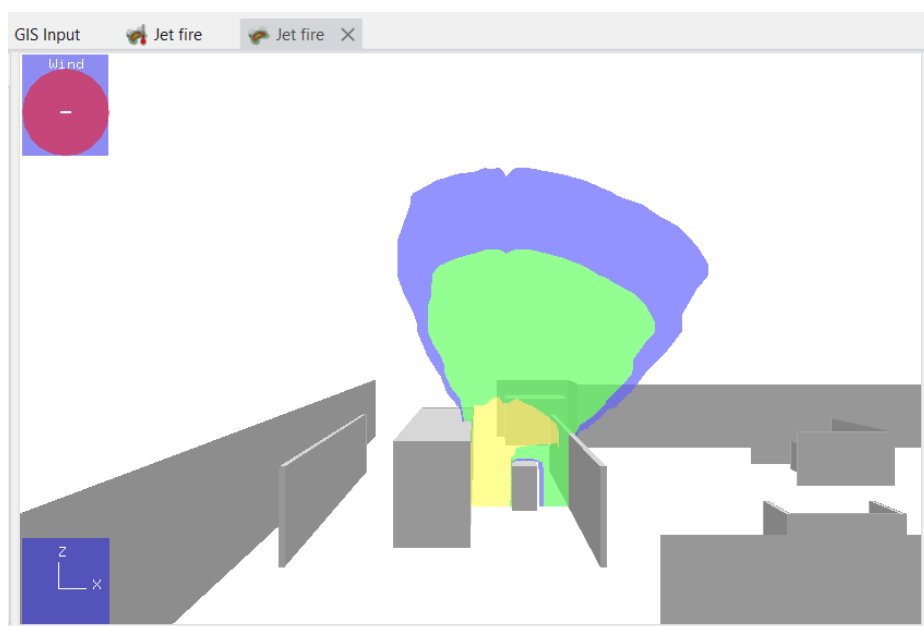


Figura 92: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista frontale, 100% DN 6, immagine tratta da PHAST

Dai risultati appena presentati emerge chiaramente che il possibile *jet fire* scaturito da un *leakage* derivante dal dispenser, il quale può essere legato ad un danneggiamento o ad una rottura del tubo flessibile, ma anche a fenomeni del tipo *nozzle release* e *drive-offs*, non comporta pericoli diretti per la cabina di comando e controllo ospitante un operatore della stazione. D'altro canto, l'operatore addetto all'effettivo rifornimento e l'autista del

mezzo risulterebbero in caso senz'altro interessati dalle conseguenze del fenomeno. La barriera posta alla destra del dispenser risulta invece sufficiente a garantire che l'irraggiamento e le zone ad elevata temperatura non vadano ad interessare la zona produttiva dell'impianto.

Allo scenario relativo al leak 0.01% su DN 40 originato dal gruppo compressori corrispondono invece i seguenti risultati.

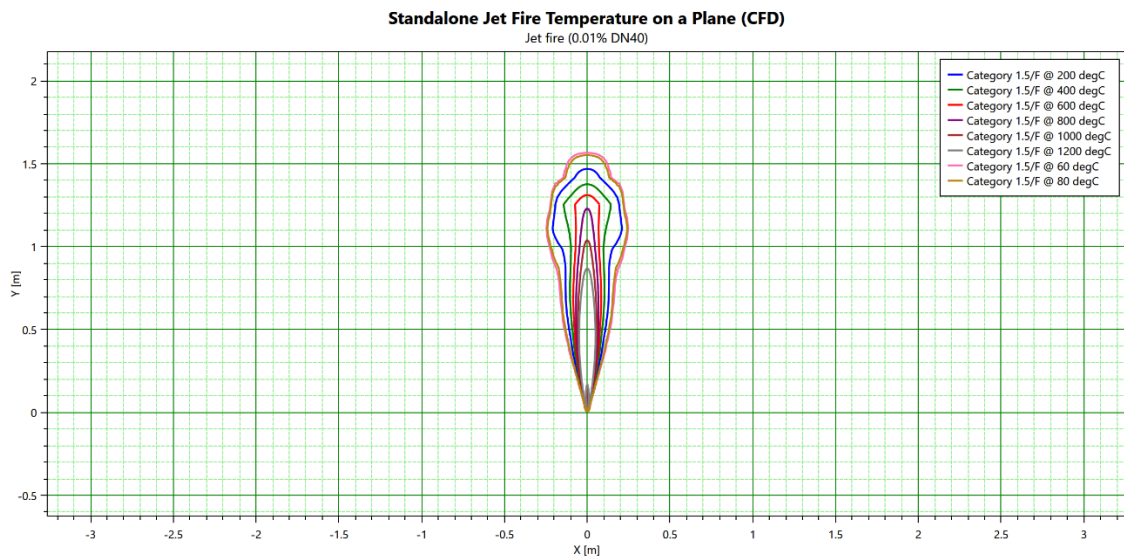


Figura 93: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

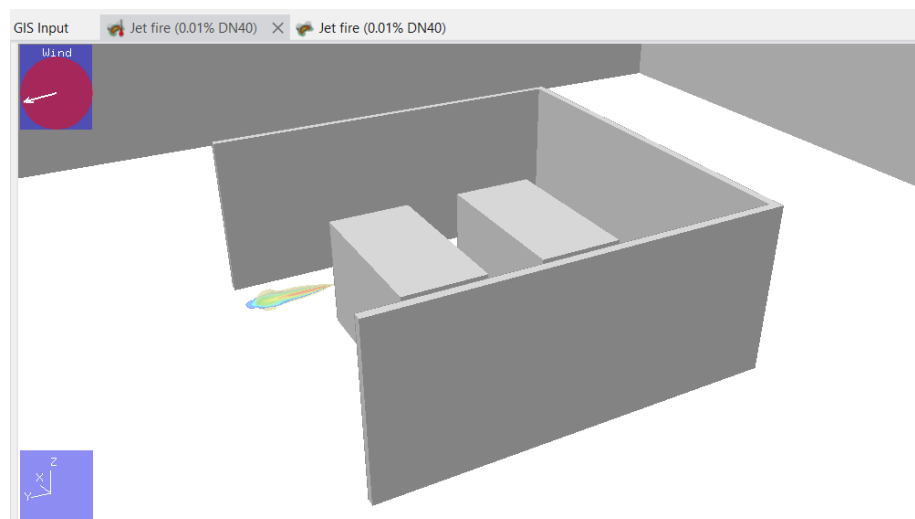


Figura 94: Superficie isoterma e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

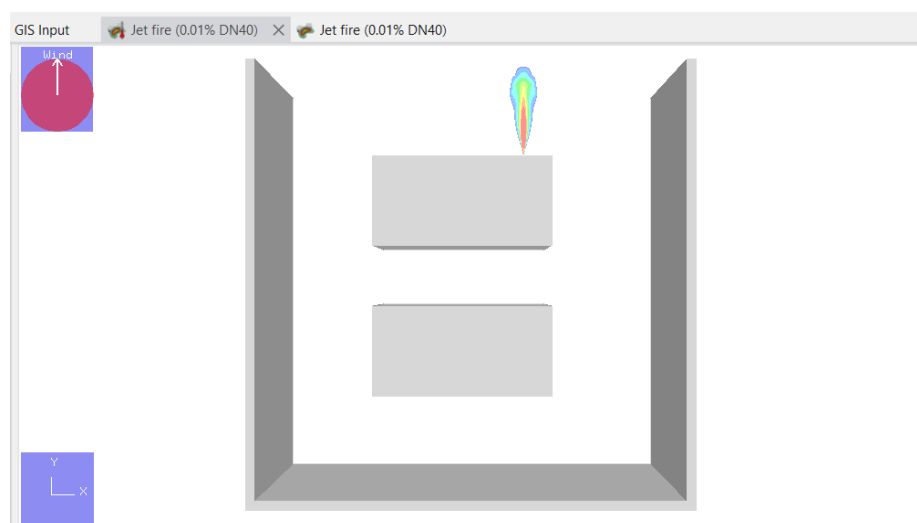


Figura 95: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

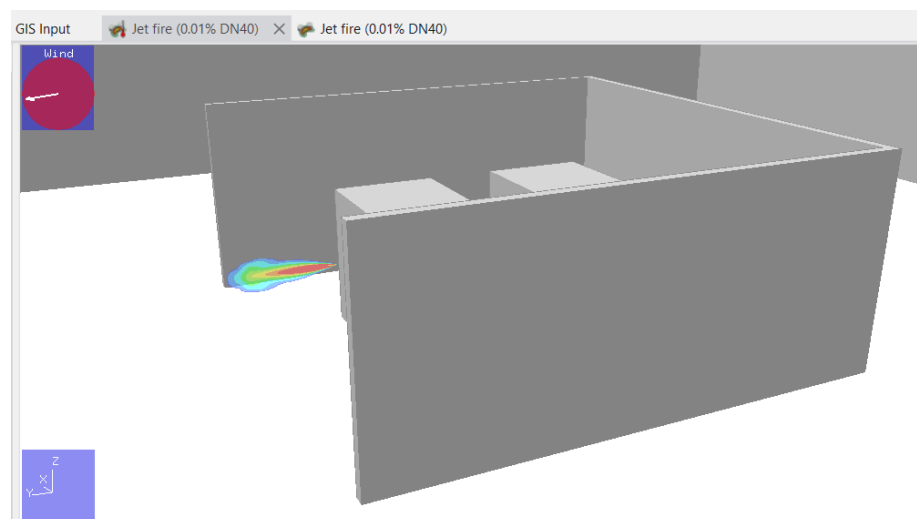


Figura 96: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

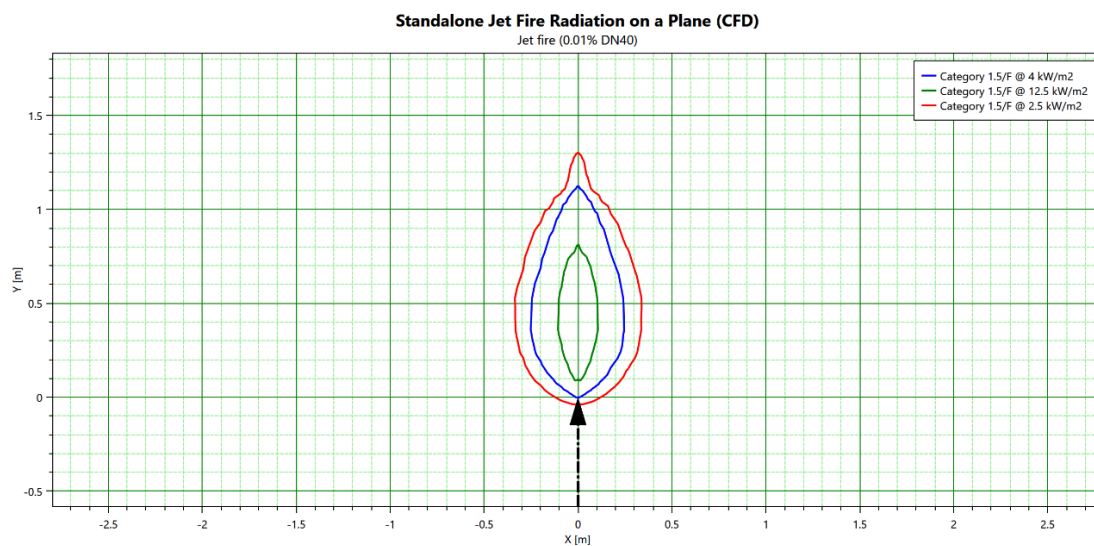


Figura 97: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

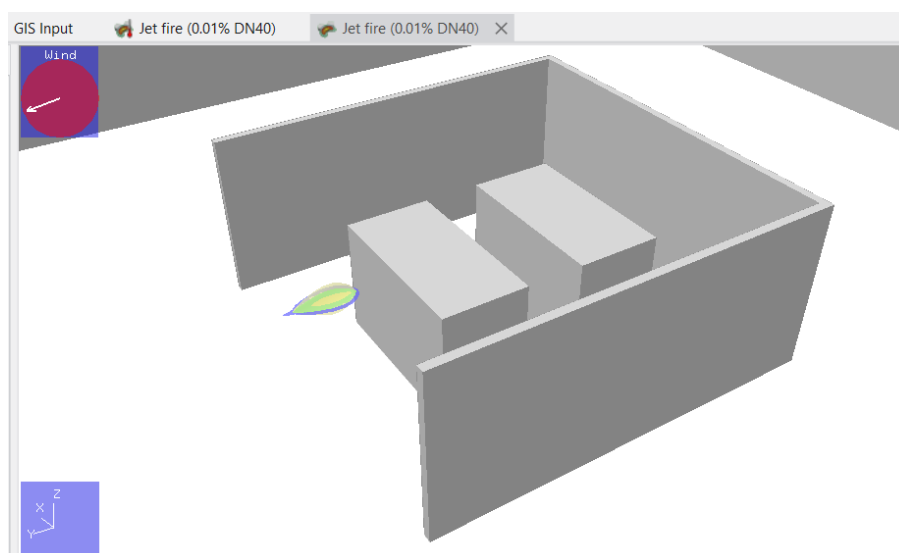


Figura 98: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST



Figura 99: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

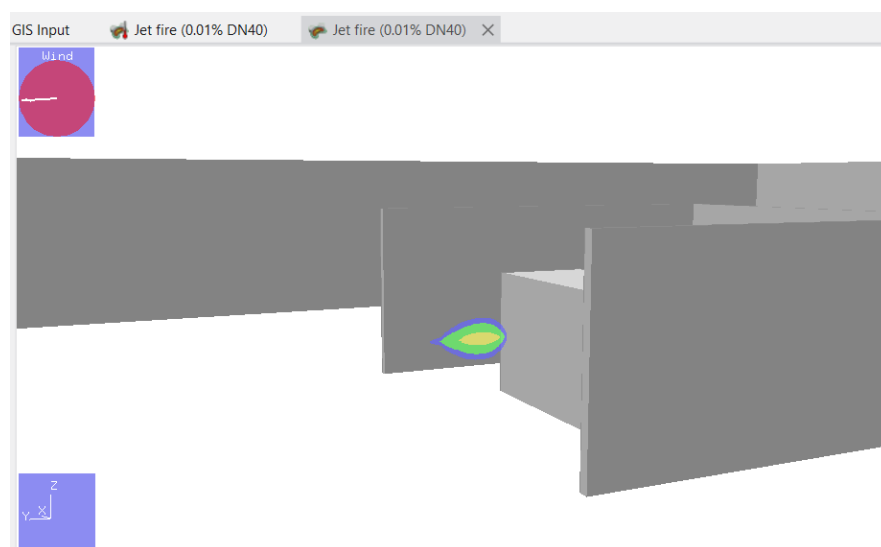


Figura 100: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

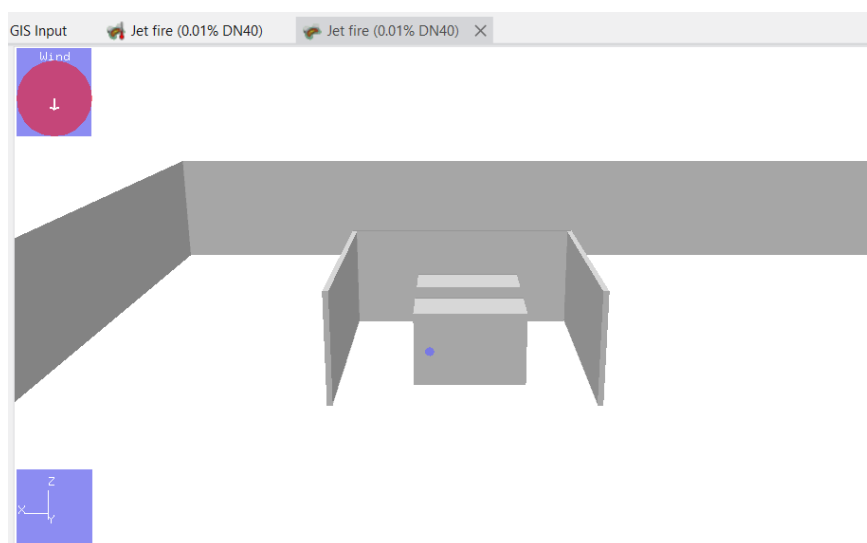


Figura 101: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista frontale, 0.01% DN 40, immagine tratta da PHAST

Lo scenario appena illustrato presenta evidentemente le conseguenze meno impattanti tra quelle valutate nel corso dello studio. Gli effetti, sia in termini di aumento di temperatura che di irraggiamento termico sviluppato, risultano infatti pienamente controllabili, interessando una zona molto ristretta e non influenzando in alcun modo sul funzionamento degli altri elementi del sistema e sulla sicurezza degli occupanti.

Allo stesso modo vengono illustrati i risultati inerenti allo scenario caratterizzato da un leak 10% su DN 40, con perdita in corrispondenza del gruppo di stoccaggio.

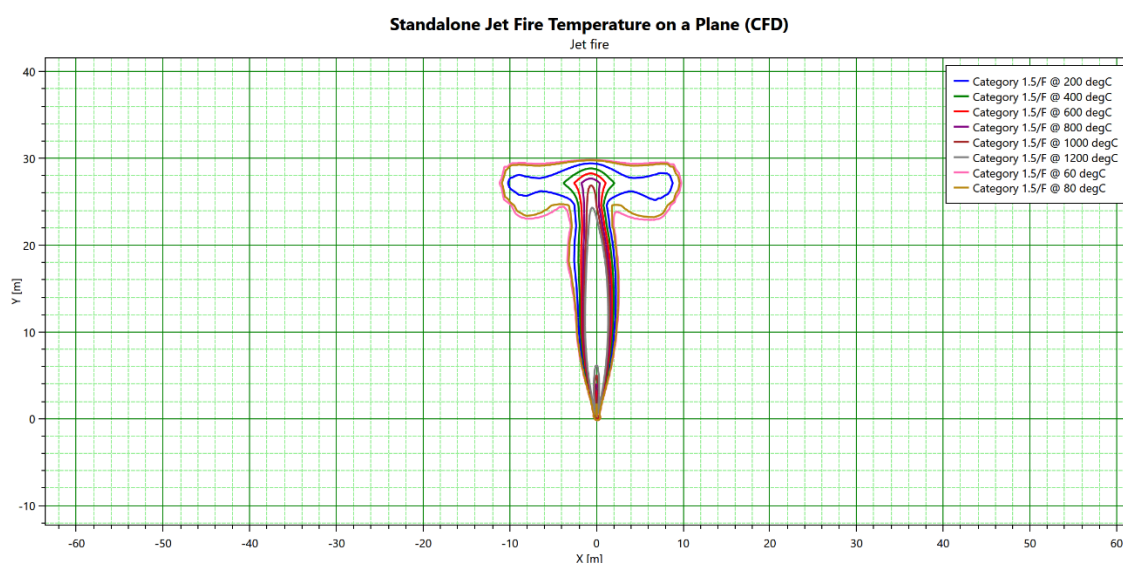


Figura 102: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

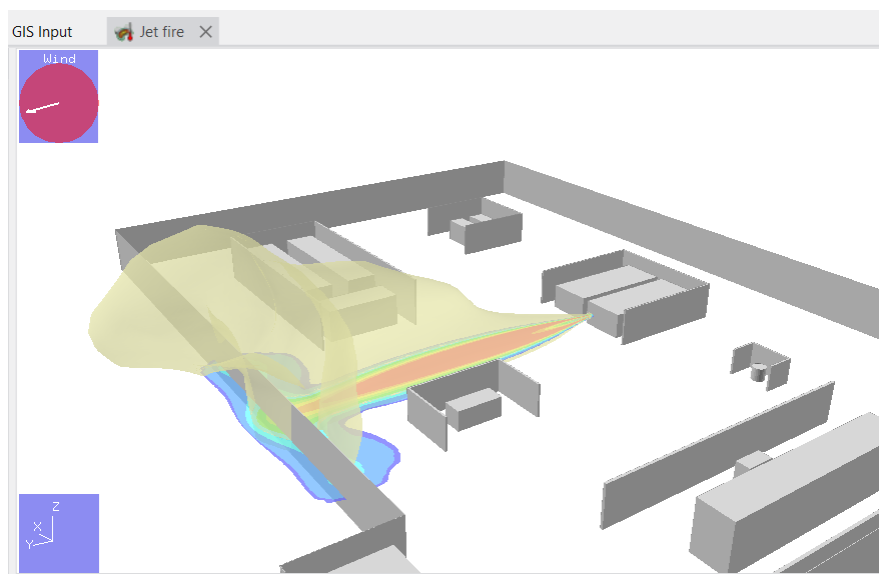


Figura 103: Superficie isotermica e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

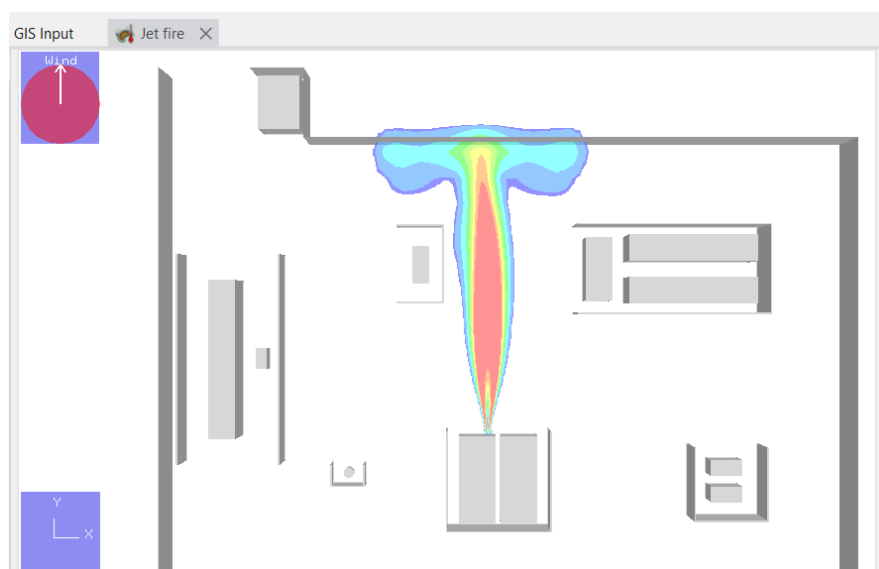


Figura 104: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

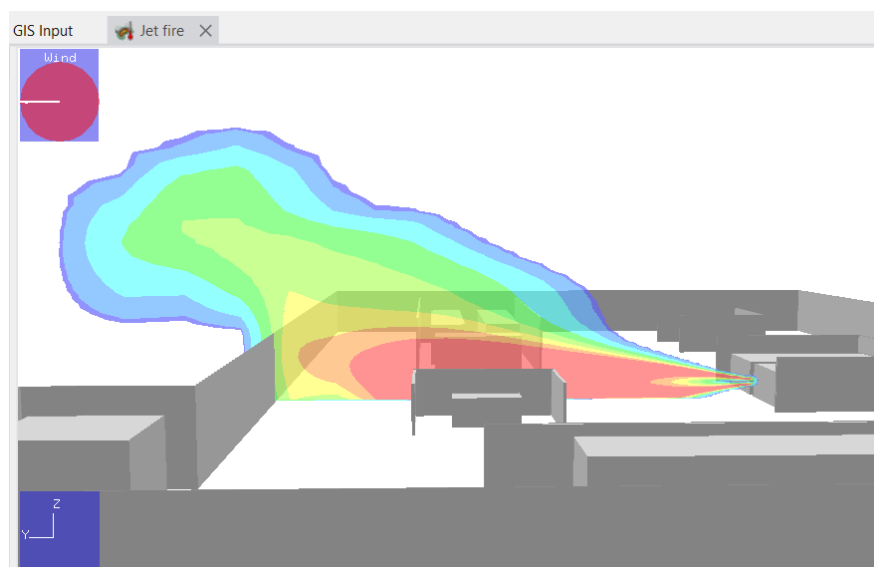


Figura 105: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

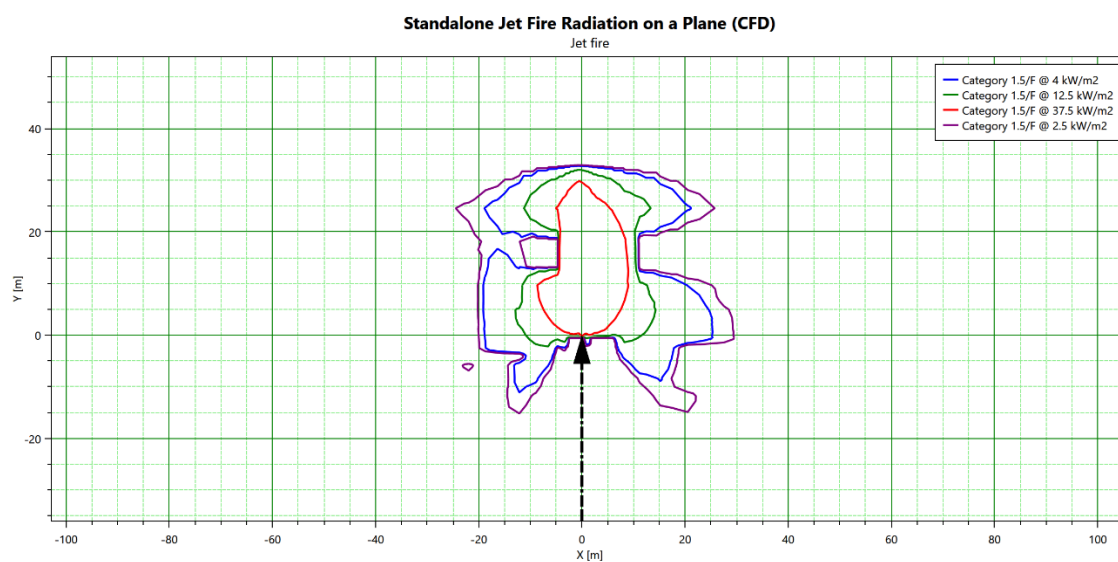


Figura 106: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

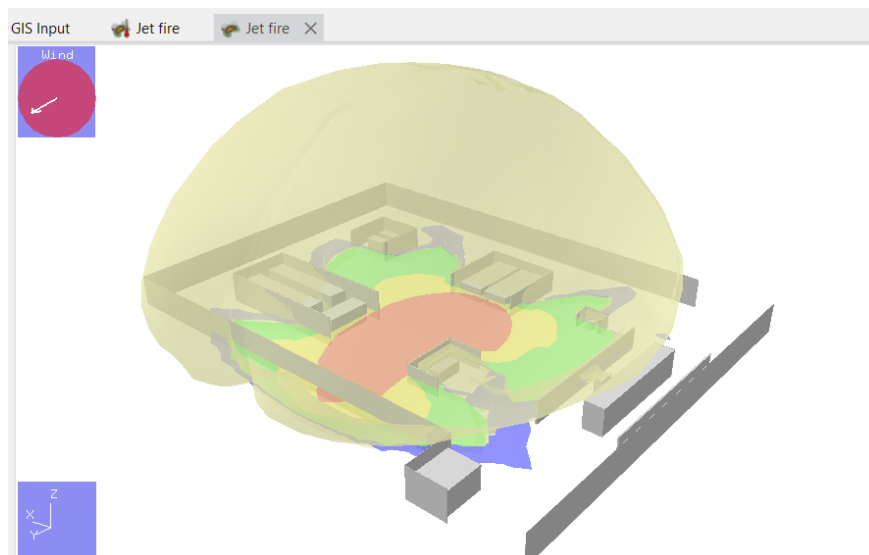


Figura 107: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

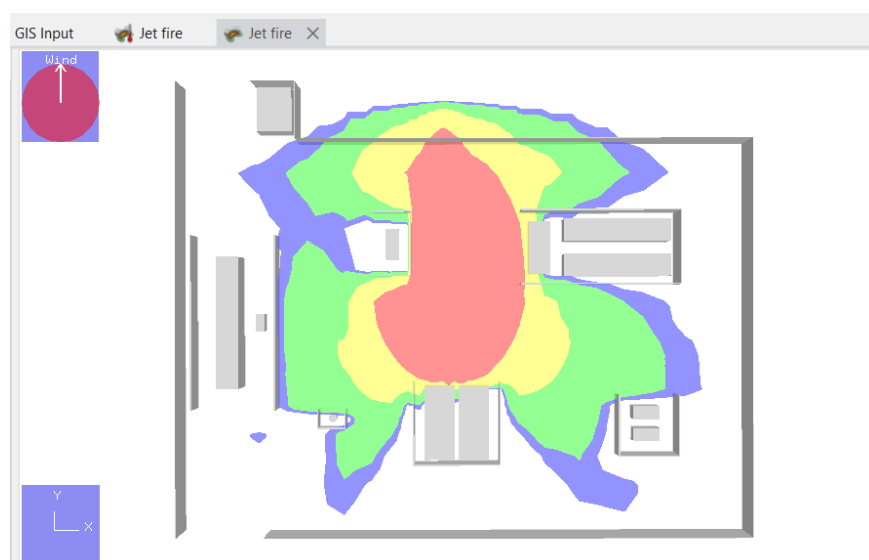


Figura 108: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST



Figura 109: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

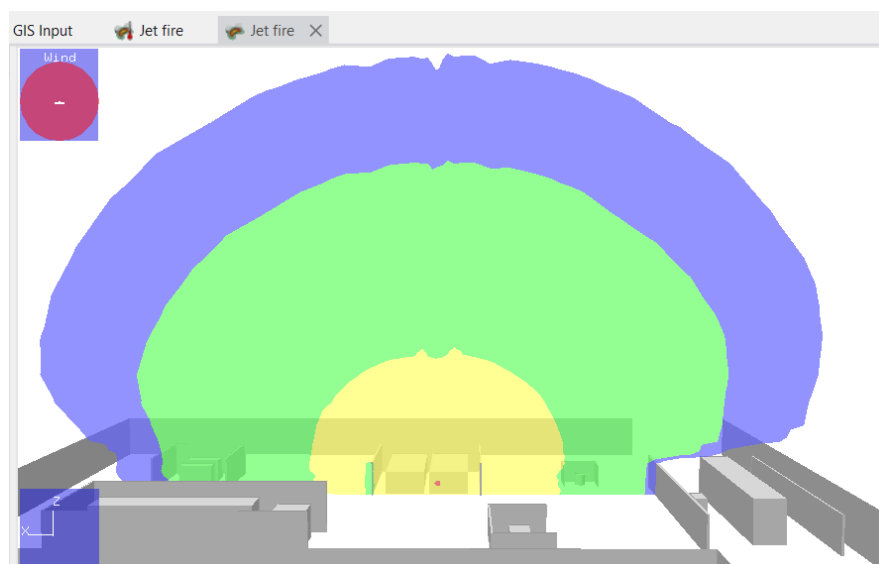


Figura 110: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista frontale, 10% DN 40, immagine tratta da PHAST

Come emerge dalle figure finora riportate, la portata delle conseguenze di un evento di questo tipo risulta essere fortemente impattante per la totalità dell'impianto. L'irraggiamento termico, in particolare, risulta caratterizzato da livelli di intensità elevati su gran parte dell'estensione del sistema e solo le pareti dei box protettivi permettono di attenuare l'impatto sugli altri strumenti presenti. L'influenza delle barriere interne ed esterne si dimostra chiaramente influente soprattutto sulla distribuzione delle zone di temperatura, impedendo che anche all'esterno dell'impianto si raggiungano temperature eccessivamente elevate. Si ricorda che un evento di questo tipo risulta essere

caratterizzato da un tasso di occorrenza molto ridotto e che è stato analizzato proprio al fine di valutare gli imponenti effetti del fenomeno.

Infine, si illustrano i risultati legati all'ultimo scenario considerato, relativo ad un leak 100% su DN 40 con origine posto in corrispondenza del gruppo compressori.

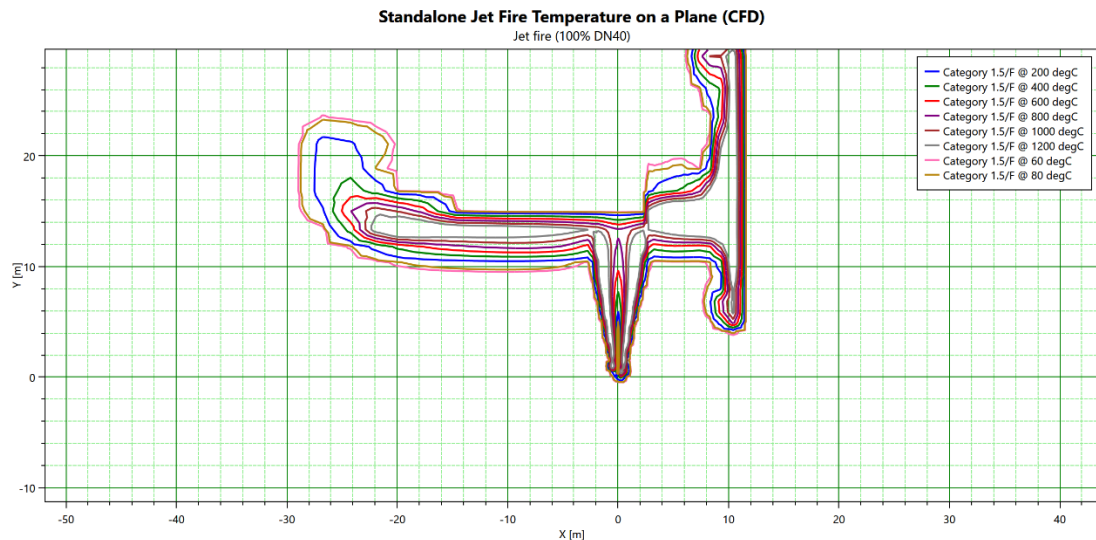


Figura 111: Distribuzione della temperatura secondo soglie di attenzione prefissate a partire dall'origine, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST

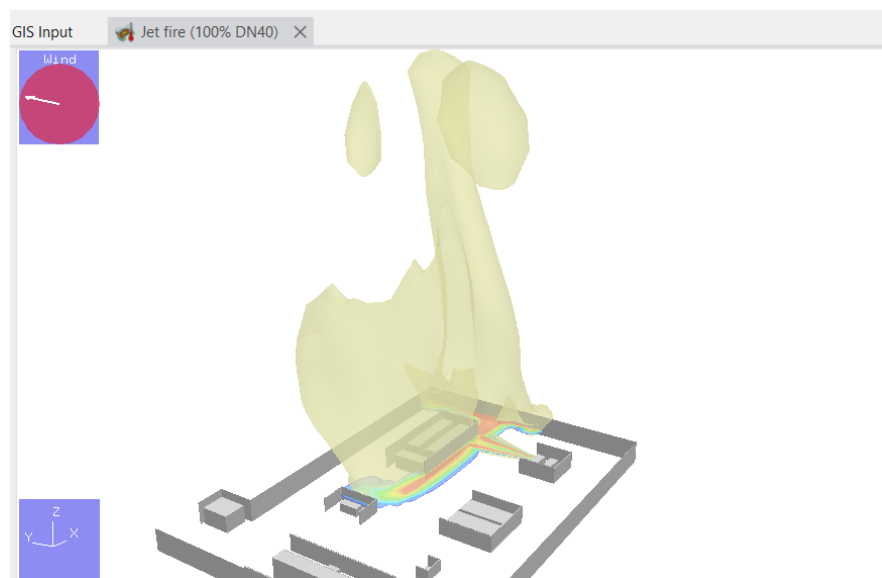


Figura 112: Superficie isoterma e proiezione livelli di temperatura, vista tridimensionale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST

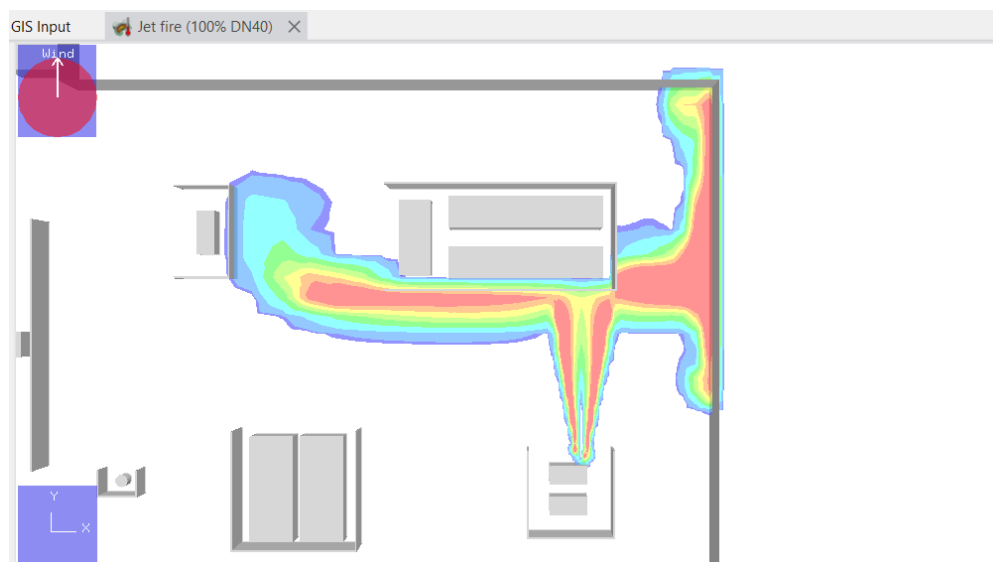


Figura 113: Proiezione livelli di temperatura, vista dall'alto, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST



Figura 114: Proiezione livelli di temperatura, vista laterale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST

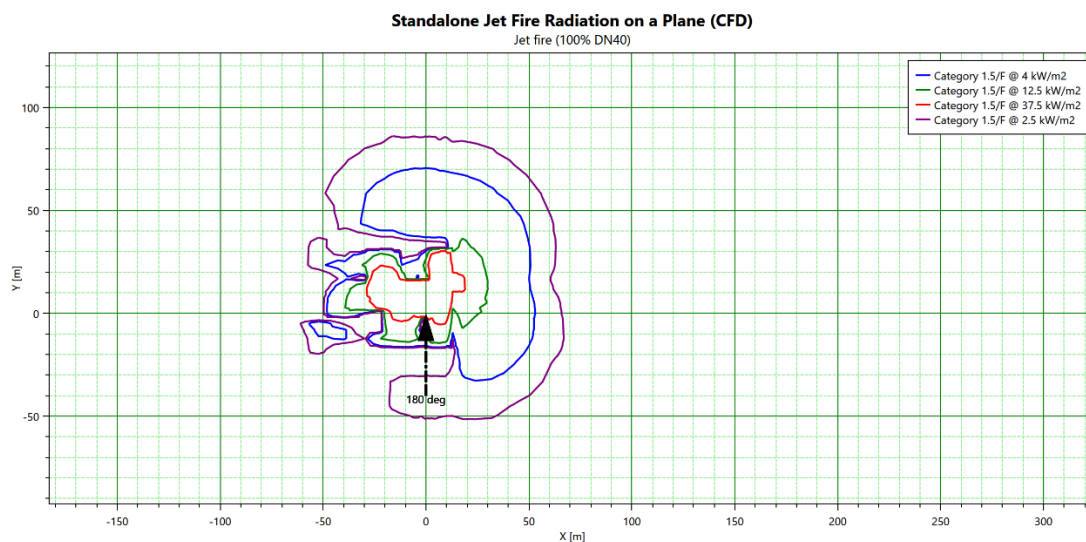


Figura 115: Livelli di irraggiamento termico secondo soglie di attenzione prefissate, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST



Figura 116: Superficie isovalore e proiezione livelli di irraggiamento termico, vista tridimensionale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST

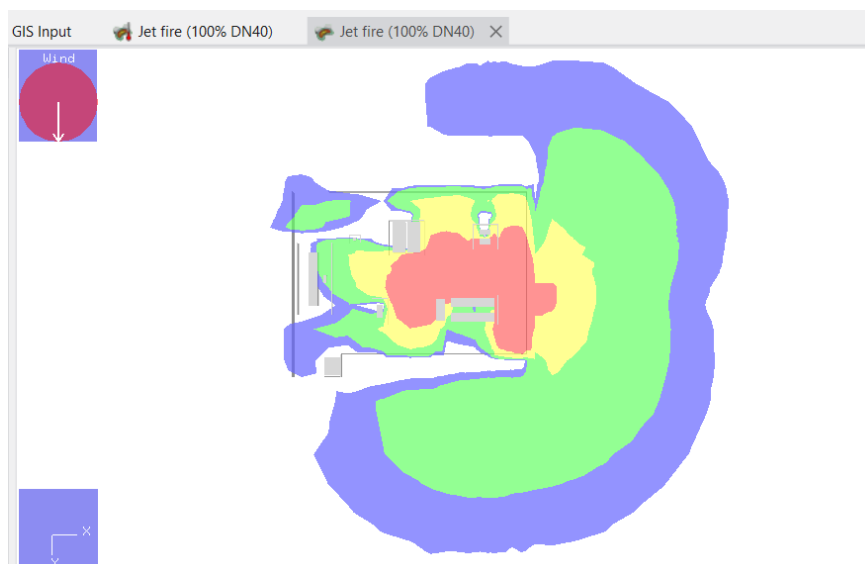


Figura 117: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista dall'alto, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST



Figura 118: Proiezione livelli di irraggiamento termico, vista laterale, 100% DN 40, immagine tratta da PHAST

Le simulazioni CFD di quest'ultimo caso analizzato mostrano con evidenza il devastante impatto che avrebbe un evento di questo tipo sotto i diversi punti di vista valutati. L'area interessata da temperature elevate e da un forte irraggiamento termico non si limiterebbe infatti a sovrastare l'impianto, ma andrebbe ad influenzare anche la zona circostante, compromettendo la sicurezza dell'intero contesto. Si ricorda anche in questo caso che un evento di questo tipo risulta essere caratterizzato da un tasso di occorrenza molto ridotto e che è stato analizzato proprio al fine di valutare gli imponenti effetti del fenomeno.

4.4 Valutazione delle distanze di sicurezza

Come già anticipato nella sezione introduttiva al lavoro simulativo, le analisi condotte mediante l'impiego di PHAST, delle quali sono stati illustrati i risultati per ognuno degli scenari considerati, permettono di effettuare dei confronti utili alla determinazione delle adeguate distanze di sicurezza da garantire per la realizzazione di impianti di questo tipo. Si ricorda che il layout impiantistico adottato per il sistema finora analizzato è stato sviluppato considerando le distanze di sicurezza (tra elementi interni e tra elementi interni ed esterni) indicate nel Decreto del Ministero dell'Interno del 07/07/2023.

Si intende dapprima realizzare un confronto tra le distanze suggerite dal DM 07/07/2023, utilizzato in questo caso come riferimento per la progettazione impiantistica, e quelle riportate in altri documenti di rilievo, quali il Decreto Ministeriale del 23/10/2018 (anche noto come “regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione”) e la norma tecnica volontaria NFPA 2 – *Hydrogen Technologies Code*, impiegata come riferimento negli Stati Uniti d'America. Va sottolineato che, mentre il DM 07/07/2023 non fa distinzione tra i vari elementi del sistema per la definizione delle distanze (racchiudendoli nella categoria “elementi pericolosi”), le altre due normative riportano misure differenti in base al componente in esame. In questo caso verranno considerati gruppo di stoccaggio, gruppo compressori e dispenser, in quanto elementi critici del sistema. Si riportano dunque nella tabella seguente le distanze individuate nei diversi documenti, così da permetterne il confronto.

<i>Elemento</i>	Distanza meno conservativa [m]			Distanza più conservativa [m]		
	DM 07.07.23	DM 23.10.18	NFPA 2	DM 07.07.23	DM 23.10.18	NFPA 2
<i>Stoccaggio</i>	15	15	18	20	30	40.8
<i>Compressore</i>		15	18		30	40.8
<i>Dispenser</i>		12	3		30	3

Tabella 43: Confronto tra le distanze di sicurezza indicate in: DM 07.07.23, DM 23.10.18 e NFPA 2

Per i decreti ministeriali si è assunta come distanza meno conservativa quella riferita agli elementi interni al sistema e come più conservativa quella riferita agli elementi esterni.

All'interno della NFPA 2 la distanza più conservativa viene invece consigliata per la salvaguardia di elementi particolarmente critici come porte/finestre degli edifici esterni, prese d'aria di sistemi HVAC e possibili fonti di accensione (motori, apparecchiature elettriche, ecc.), mentre quella meno conservativa è riservata ad elementi come serbatoi, depositi di materiale non pericoloso e costruzioni interne all'impianto.

Emerge dunque che le distanze suggerite dalla NFPA 2 per compressore e gruppo di stoccaggio risultano essere maggiori, soprattutto rispetto a quelle indicate nel DM 07/07/23; ciò può essere giustificato dalla maggiore accuratezza di calcolo delle distanze nella norma statunitense, all'interno della quale le misure vengono determinate tenendo fortemente in considerazione le caratteristiche operative (pressione, diametro delle tubazioni, ecc.). Per il dispenser le distanze suggerite dalla NFPA 2 non possono essere considerate altrettanto accurate, in quanto vengono proposte senza considerare le precise condizioni di utilizzo; non a caso per l'erogatore la distanza suggerita nei decreti ministeriali risulta essere maggiore, garantendo conseguentemente livelli di salvaguardia maggiori.

Realizzato quindi un primo confronto tra le distanze di sicurezza suggerite in diversi documenti di riferimento del settore, risulta possibile realizzarne un secondo utile all'evidenziazione della differenza tra le distanze indicate nel Decreto del Ministero dell'Interno del 7 luglio 2023 (in quanto guida assunta per la realizzazione del layout) e quelle determinabili a partire dalle aree di influenza definite dalle simulazioni svolte e presentate nelle sezioni precedenti. Nella tabella seguente vengono dunque illustrate le distanze riportate nel DM e quelle determinate per diversi livelli di intensità di irraggiamento termico mediante le simulazioni, permettendo così di effettuare opportune considerazioni.

<i>Scenario</i>	Dist. DM (esterna)	Dist. DM (interna)	Sim. Sempl. (2.5 kW/m²)	Sim. Sempl. (37.5 kW/m²)	Sim. CFD (2.5 kW/m²)	Sim. CFD (37.5 kW/m²)
<i>Leak 100% DN 6</i>	20 m	15 m	23.4 m	12.6 m	19 m	12 m
<i>Leak 0.01% DN 40</i>			1.6 m	-	1.3 m	-
<i>Leak 10% DN 40</i>			52.6 m	28.1 m	33 m	30 m

<i>Leak 100% DN 40</i>			143.6 m	73.8 m	85 m	29 m
----------------------------	--	--	---------	--------	------	------

Tabella 44: Confronto tra le distanze indicate dal DM 07/07/2023 e quelle determinate mediante le simulazioni semplificate e CFD svolte tramite PHAST

I valori riportati nelle colonne relative ai risultati simulativi fanno riferimento alla distanza massima dal punto di origine alla quale sono stati riscontrati i livelli di intensità di irraggiamento termico indicati tra parentesi nella riga di intestazione; sono state considerate le due soglie limite inferiore (2.5 kW/m^2) e maggiore (37.5 kW/m^2), al fine di evidenziare al meglio il range ottenuto.

Considerando le distanze presenti nella tabella è possibile effettuare diverse considerazioni riguardanti i risultati dello studio. In primo luogo, va sottolineato che le distanze ottenute mediante le simulazioni CFD risultano per ogni scenario considerato inferiori a quelle precedentemente dedotte dalle simulazioni semplificate; ciò può essere motivato dall'influenza degli elementi strutturali presenti nell'impianto, i quali influiscono fortemente sulla propagazione dell'irraggiamento. Inoltre, risulta evidente che le distanze indicate nel Decreto Ministeriale rappresentano dei valori di compromesso, risultando sovradimensionate e conservative per gli eventi caratterizzati da un tasso di occorrenza maggiore (leak 0.01%) e allo stesso tempo non sufficienti per garantire un'adeguata protezione nel caso di eventi maggiormente invasivi, come quelli legati a leakage di portata superiore. Tale approccio risulta in ogni caso essere appropriato, in quanto le distanze suggerite devono provvedere a garantire un livello di sicurezza adeguato, ma anche la fattibilità realizzativa degli impianti interessati. I risultati grafici delle simulazioni CFD riportati nella sezione precedente avevano infatti già messo in evidenza come le distanze adottate nella progettazione dell'impianto risultassero efficaci nel caso degli scenari di perdita più probabili.

Si ritiene utile sottolineare che le simulazioni di perdita sono state realizzate considerando dei diametri di riferimento per i rilasci, per quanto riguarda gli elementi dell'area produttiva dell'impianto (*compressor, vessel, valve*), riconducibili a quelli delle tubazioni maggiori comunemente impiegate nell'impianto (DN 40), mantenendo in questo modo un approccio fortemente conservativo e sovradimensionando le conseguenze dei rilasci; NFPA 2, ad esempio, indica diametri inferiori per lo studio degli elementi in questione. A fronte di ciò, le distanze di sicurezza previste nei decreti e adottate per la realizzazione

del layout possono essere ancora una volta considerate ampiamente sufficienti, tenendo conto anche del fatto di non aver coinvolto nell'analisi eventuali sistemi di mitigazione.

Si precisa inoltre che lo studio realizzato si basa sui dati e le informazioni limitate attualmente a disposizione nel settore e conseguentemente i risultati ottenuti risultano fortemente influenzati dalle assunzioni fatte all'inizio dell'analisi. Come già sottolineato diverse volte nel corso della trattazione, nel caso delle HRS la principale difficoltà nella realizzazione di analisi di questo tipo risiede nell'incertezza legata alle informazioni disponibili e nel numero limitato di studi e approfondimenti precedentemente svolti. L'analisi qui presente si propone dunque come opera preliminare utile alla valutazione di alcuni aspetti dell'ambito in esame e in quanto tale lascia ampio spazio ad eventuali futuri lavori di revisione ed approfondimento, grazie ai quali potrà essere maggiormente ampliata e strutturata.

4.5 Applicazione del French Land Use Planning Method

Esposte dunque le interessanti considerazioni riguardanti il confronto tra le distanze caratteristiche ricavate dalle simulazioni e quelle di sicurezza suggerite dai diversi riferimenti normativi, è stato ritenuto utile approfondire la tematica degli effetti sul territorio mediante l'applicazione del *French Land Use Planning Method* secondo le indicazioni riportate in *Guidance on Land-Use Planning, the Siting of Hazardous Activities and related Safety Aspects* [42], come fatto da Kwak et al. (2023) in Ref. [19]; tale tecnica risulta infatti essere un approccio valido per integrare la pianificazione territoriale con la gestione dei rischi industriali.

Determinate le frequenze di accadimento di ogni scenario accidentale e le aree di influenza dei fenomeni di *jet fire* ed esplosione, risulta possibile catalogare, in base alle persone coinvolte dagli effetti e ai tassi di occorrenza, ciascuno degli scenari di perdita considerati per gli elementi del sistema. Le categorie impiegate sono quelle già definite nella guida [42] e riportate in *Tabella 11* e *Tabella 12*. Si noti che in questo caso, per i vari livelli di effetto sulla popolazione, sono state opportunamente adattate le soglie di interesse per irraggiamento termico e sovrappressione già scelte su PHAST, tenendo conto degli effetti reali forniti dal software. Si espongono le categorie nella tabella seguente.

Effetti sulla popolazione	Intensità Irr. Termico [kW/m ²]	Sovrappressione [bar]
5% lethal effects	2.5	0.03
1% lethal effects	4	0.14
Irreversible effects	12.5	0.35

Tabella 45: Livelli considerati per irraggiamento termico e sovrappressione e relativi effetti sulla popolazione

Nel corso dell'analisi si è tenuto conto anche della superficie complessiva dell'impianto in esame $A_{impianto}$, pari a 3379.8 m², e della densità abitativa ρ della zona in cui sorge, assunta pari a 150 persone/km², in quanto si è precedentemente ipotizzato che l'impianto fosse situato in una zona rurale/industriale. Sono state conseguentemente determinate le persone coinvolte dalle conseguenze dei vari scenari di perdita simulati mediante PHAST, a partire dalle aree caratteristiche $A_{influenza}$ determinate per ogni soglia di interesse; il numero di persone interessate è stato definito per ogni categoria di conseguenze riportata nella tabella precedente. Ciò è stato possibile a partire dalla seguente formulazione:

$$n^{\circ} \text{ persone} = \rho \cdot A_{netta} = \rho \cdot (A_{influenza} - A_{impianto})$$

Si noti che nella popolazione utile alla catalogazione del livello di pericolosità di ciascun scenario non vengono compresi gli operatori dell'impianto, in quanto il metodo qui applicato si concentra sulla valutazione dell'accettabilità del sistema analizzato concentrandosi sugli effetti sul suolo pubblico.

Si riporta nelle tabelle seguenti la catalogazione dei vari scenari precedentemente simulati, secondo le categorie proposte in Tabella 11.

Scenario	Irr. Termico [kW/m ²]	Area [m ²]	Area [km ²]	Area netta [km ²]	Persone	Livello
leak 0.01% DN40	2.5	2.5	0.000003	0	0	Moderate
	4	1.2	0.000001	0	0	Moderate
	12.5	-	-	-	-	Moderate
leak 10% DN40	2.5	3924	0.003924	0.000544	0	Moderate
	4	2514	0.002514	0	0	Moderate
	12.5	865.8	0.000866	0	0	Moderate

leak 100% DN40	2.5	31133	0.031133	0.027753	4	Serious
	4	19996.4	0.019996	0.016617	2	Major
	12.5	6892.9	0.006893	0.003513	1	Major
leak 0,01% DN6	2.5	-	-	-	-	Moderate
	4	-	-	-	-	Moderate
	12.5	-	-	-	-	Moderate
leak 100% DN6	2.5	761.1	0.000761	0	0	Moderate
	4	486.4	0.000486	0	0	Moderate
	12.5	166.4	0.000166	0	0	Moderate

Tabella 46: N° persone nelle potenziali aree di impatto dei vari scenari di jet fire

Scenario	Sovrapp. [bar]	Diametro [m]	Area [m ²]	Area [km ²]	Area netta [km ²]	Persone	Livello
leak 0.01% DN40	0.03	-	-	-	-	-	Moderate
	0.14	-	-	-	-	-	Moderate
	0.35	-	-	-	-	-	Moderate
leak 10% DN40	0.03	320	80424.8	0.0804	0,077	12	Major
	0.14	40	1256.6	0.0013	0	0	Moderate
	0.35	20	314.2	0.0003	0	0	Moderate
leak 100% DN40	0.03	870	594467.9	0.5945	0,5911	89	Major
	0.14	240	45238.9	0.0452	0,0419	6	Major
	0.35	100	7854.0	0.0079	0,0045	1	Major
leak 0,01% DN6	0.03	-	-	-	-	-	Moderate
	0.14	-	-	-	-	-	Moderate
	0.35	-	-	-	-	-	Moderate
leak 100% DN6	0.03	125	12271.8	0.0123	0	1	Serious
	0.14	35	962.1	0.0010	0	0	Moderate
	0.35	16	201.1	0.0002	0	0	Moderate

Tabella 47: N° persone nelle potenziali aree di impatto dei vari scenari di esplosione

A seguito della determinazione delle categorie basate sugli effetti sulla popolazione, l'attenzione è stata spostata sulla catalogazione degli scenari relativi a ciascun elemento del sistema secondo le categorie di frequenze riportate in *Tabella 12*.

Scenario	Elemento	Frequenza jet fire [1/anno]	Classe freq. jet fire	Frequenza explosion [1/anno]	Classe freq. explosion
leak 0.01% DN40	Compressore	1.60E-04	C	7.98E-05	D
	Vessel	2.40E-09	E	1.2E-09	E
leak 10% DN40	Vessel	5.30E-09	E	2.7E-09	E
leak 100% DN40	Compressore	6.67E-07	E	3.48E-07	E
leak 0,01% DN6	Hose	4.63E-07	E	2.32E-07	E
	Hose	3.29E-07	E	1.67E-07	E
leak 100% DN6	Nozzle release	8.48E-05	D	1.11E-07	E
	Drive-off	2.17E-07	E	4.32E-05	D

Tabella 48: Catalogazione scenari secondo classi di frequenza

Definiti dunque i livelli di gravità e le classi di frequenza, è stato possibile determinare per ogni scenario i livelli di ingresso (OK, MMR1, MMR2 o NO) nella matrice francese di definizione dell'accettabilità del rischio, illustrata in *Figura 39*. Si riportano di seguito i livelli stabiliti, dapprima per gli scenari di *jet fire* e in seguito per quelli di esplosione.

Elemento	Scenario	Classe frequenza	Irr. [kW/m²]	Livello gravità	Livello
Compressore	leak 0.01% DN40	C	2.5	Moderate	OK
			4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK
	leak 100% DN40	E	2.5	Serious	OK
			4	Major	MMR1
			12.5	Major	MMR1
Vessel		E	2.5	Moderate	OK

Hose	leak 0.01% DN40		4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK
	leak 10% DN40	E	2.5	Moderate	OK
			4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK
	leak 0,01% DN6	E	2.5	Moderate	OK
			4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK
	leak 100% DN6	E	2.5	Moderate	OK
			4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK
Nozzle release	leak 100% DN6	D	2.5	Moderate	OK
			4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK
Drive-off	leak 100% DN6	E	2.5	Moderate	OK
			4	Moderate	OK
			12.5	Moderate	OK

Tabella 49: Classificazione per gli scenari di jet fire

Elemento	Scenario	Classe frequenza	Sovrapp. [bar]	Livello gravità	Livello
Compressore	leak 0.01% DN40	D	0.03	Moderate	OK
			0.14	Moderate	OK
			0.35	Moderate	OK
	leak 100% DN40	E	0.03	Major	MMR1
			0.14	Major	MMR1
			0.35	Major	MMR1
Vessel	leak 0.01% DN40	E	0.03	Moderate	OK
			0.14	Moderate	OK
			0.35	Moderate	OK
	leak 10% DN40	E	0.03	Major	MMR1
			0.14	Moderate	OK
			0.35	Moderate	OK
Hose	leak 0,01% DN6	E	0.03	Moderate	OK
			0.14	Moderate	OK

Nozzle release	leak 100% DN6	E	0.35	Moderate	OK
			0.03	Serious	OK
			0.14	Moderate	OK
			0.35	Moderate	OK
	leak 100% DN6		0.03	Serious	OK
			0.14	Moderate	OK
			0.35	Moderate	OK
	leak 100% DN6	D	0.03	Serious	OK
			0.14	Moderate	OK
			0.35	Moderate	OK

Tabella 50: Classificazione per gli scenari di esplosione

Il sistema analizzato, considerando le categorie riportate nelle due tabelle, risulta pienamente accettabile ma, essendo presenti diversi scenari catalogati come “MMR1” (4 legati alla sovrappressione generata e 2 legati all’irraggiamento termico generato), secondo le direttive nazionali francesi il rilascio del permesso per la gestione dell’impianto pericoloso può avvenire solamente a seguito dell’implementazione di tutte le misure di sicurezza realizzabili. L’assenza di eventi catalogati come “MMR2” e come “NO” mostra la sicurezza di un sistema di questo tipo, dovuta alle caratteristiche dell’impianto e alla sua posizione.

Va infatti sottolineato come la modesta densità abitativa (150 persone/km²) riduca fortemente il numero di persone coinvolte negli eventi accidentali, determinando livelli di gravità ridotti anche per gli scenari maggiormente critici. Nessuno scenario è stato conseguentemente catalogato come “Disastrous” o “Catastrophic” e sono stati identificati solamente pochi eventi “Major” (6) e “Serious” (4). Ciò evidenzia d’altro canto l’assoluta criticità legata alla nascita di HRS in centri urbani caratterizzati da elevate densità abitative, già trattata negli studi riportati nelle sezioni precedenti e in particolare in Ref. [19]. Anche le classi di frequenza si sono rivelate moderate, con solamente un caso di classe C e un numero ridotto di classi D (3).

5. Conclusioni

Le diverse fasi del lavoro illustrate finora hanno dunque permesso di ottenere un quadro piuttosto ampio che ben si inserisce nelle tendenze dell'attuale scenario energetico globale, mettendo in luce le potenzialità ma anche le principali complessità legate all'impiego dell'idrogeno ed evidenziando gli inevitabili ed ampi sforzi da compiere al fine di sviluppare i mezzi necessari alla diffusione dei sistemi operanti con esso. Il lavoro svolto ha avuto fin dall'inizio come obiettivo quello di illustrare lo stato attuale dell'evoluzione degli impianti di questo tipo, concentrandosi sulla diffusione delle HRS e sull'importanza dell'analisi del rischio per uno sviluppo sicuro e funzionale di tali sistemi. Per fare ciò è stata dapprima condotta un'accurata analisi bibliografica che ha coinvolto articoli scientifici, database, siti web e riviste di riferimento e in seguito l'opera è stata completata con la realizzazione dello studio simulativo di un ipotetico caso impiantistico; solamente l'unione delle due fasi ha permesso di stilare un quadro completo e meticoloso dell'attuale stato dell'arte.

5.1 Sintesi del lavoro svolto e principali evidenze emerse

Dopo aver messo in luce l'attuale e il (potenziale) futuro ruolo dell'idrogeno nello scenario energetico globale, le sue principali caratteristiche e le conseguenze derivanti da esse, ampio spazio è stato dedicato alle potenzialità delle *hydrogen refueling stations*, sottolineando come diversi Paesi stiano investendo copiosamente per incrementarne la diffusione, con 1160 stazioni attualmente funzionanti distribuite in 45 nazioni. Il processo risulta particolarmente avanzato in Asia, con Cina, Giappone e Corea del Sud che ospitano un numero di impianti che supera di gran lunga quello delle HRS presenti nel resto del mondo. Anche in Italia la diffusione è risultata essere in una fase di crescita consistente, con 3 impianti attualmente in funzione e 36 progetti approvati per la realizzazione di nuove stazioni mediante il supporto del PNRR. Data la complessità e la conseguente pericolosità dei sistemi di questo tipo, è risultato opportuno sottolineare l'importanza delle normative e degli standard nazionali ed internazionali atti a garantire determinati livelli di sicurezza, indicando mezzi impiegabili nella progettazione e nella gestione, disposizioni utili e linee guida di riferimento. A fronte di ciò, è emersa la forte eterogeneità sul panorama internazionale delle norme impiegate, ma anche la volontà

convinta da parte degli enti nazionali di perseguire un processo di delineazione di norme adottabili a livello globale, che ha trovato un primo compimento nella nascita delle serie ISO 19880 e ISO 22734; ciò garantirebbe un aumento della sicurezza degli impianti e una conseguente crescita della fiducia pubblica nei confronti di essi (*social license to operate*), permettendone l'istallazione anche in siti prossimi ad elementi sensibili, come nel caso dei centri urbani.

Particolare importanza all'interno dell'opera è stata riservata all'analisi del rischio, in quanto approccio utile all'individuazione degli aspetti maggiormente critici delle HRS e conseguentemente al miglioramento dei sistemi a partire dagli elementi che li compongono. Sono state quindi evidenziate le tecniche maggiormente impiegate nell'ambito di interesse della presente trattazione, mettendo in risalto come gran parte degli studi condotti tenda a concentrarsi sulla realizzazione di un'analisi completa e basata sulle fasi di *hazard identification* (HI), *consequence analysis* (CA), *frequency analysis* (FA) e *risk analysis* (RA). Allo stesso modo è stata messa opportunamente in luce l'importanza nel processo di valutazione dei software disponibili e dei database contenenti l'elenco degli eventi accidentali che hanno avuto luogo negli anni negli impianti operanti con l'idrogeno. Per quanto concerne i primi, i mezzi maggiormente impiegati risultano essere HyRAM, per l'analisi delle frequenze annue di accadimento degli scenari di perdita, PHAST e SAFETI, per l'analisi delle conseguenze legate a fenomeni come *jet fire*, *flash fire* e VCE. Riguardo i database, sono diversi quelli che hanno trovato largo impiego negli studi del settore, risultando utili per la realizzazione di analisi preliminari e statistiche che permettano di individuare mediante lo studio dei casi passati le cause più comuni, gli elementi tendenzialmente più fragili del sistema e le conseguenze più probabili, come fatto in Ref. [6] [8] [11] e discusso nella sezione 2.2.3.

L'analisi bibliografica è risultata inoltre utile nell'individuazione dei casi studio più significativi tra quelli inerenti all'applicazione dell'analisi del rischio alle stazioni di rifornimento di idrogeno. Dalla valutazione di diversi lavori pregressi è stato infatti possibile mostrare le modalità di applicazione delle tecniche esistenti, gli strumenti più impiegati e i risultati ottenuti, evidenziando poi ancora una volta il ruolo cruciale rivestito da HyRAM nella fase di determinazione delle frequenze di accadimento, ampiamente trattato nella sezione 3.2. Dagli studi realizzati è emerso ancora una volta come il processo di identificazione della pericolosità dell'impianto risulti particolarmente complesso nel caso delle HRS, richiedendo varie fasi di analisi accuratamente strutturate.

Per quanto concerne gli elementi tipicamente presenti nei sistemi di questo tipo, carro bombolaio, compressore, gruppo di stoccaggio e dispenser sono stati individuati come elementi maggiormente critici, essendo caratterizzati da scenari di perdita più frequenti e più impattanti. Il *jet fire*, dal canto suo, si presenta come l'evento consequenziale al rilascio maggiormente analizzato in quanto più probabile e viene definito, in diversi casi, come il contributo principale allo sviluppo di situazioni di rischio. Nei lavori proposti viene inoltre mostrato che le aree di influenza dei fenomeni consequenziali al rilascio, specificatamente in termini di irraggiamento termico e sovrappressione generati, risultano solitamente non più vaste della superficie di sviluppo dell'impianto stesso, garantendo livelli di *individual risk* per le persone poste al di fuori della recinzione al di sotto dei livelli ALARP consigliati dai riferimenti internazionali (10^{-6} /anno). Considerando una panoramica più ampia, gli studi evidenziano come il rischio globale che tipicamente caratterizza le HRS risulta essere leggermente superiore ai livelli individuati dagli standard internazionali come pienamente accettabili, richiedendo l'adozione di sistemi mitigativi quali: sistema di rilevamento dei gas, sistema di spegnimento automatico o sistema di ventilazione d'emergenza. Tali sistemi sono costituiti da più elementi, i quali risultano caratterizzati da una *probability of failure on demand* (PFD) che va opportunamente tenuta in considerazione nel processo di analisi. La presenza di sistemi di questo tipo permette di ottenere evidenti diminuzioni dei livelli di rischio: in Ref. [9], ad esempio, la realizzazione di un'analisi degli strati di protezione (*layer of protection analysis*, LOPA) ha evidenziato come l'istallazione nel sistema di una *shutoff valve* singola permettesse di ridurre i livelli di *individual risk* e *social risk* di un ordine di grandezza, garantendo conseguentemente la possibilità di rientrare nella zona di rischio accettabile. I diversi lavori citati nel terzo capitolo della trattazione permettono inoltre di notare il forte interesse della comunità scientifica riguardo lo sviluppo di HRS in contesti urbani, rappresentando una soluzione dotata di ampio potenziale e nel contempo fortemente complessa a causa degli ingenti requisiti di sicurezza imposti dall'elevata densità abitativa.

Lo studio simulativo dell'impianto ipotizzato, proposto nella quarta sezione della trattazione, ha permesso a sua volta di constatare le difficoltà legate all'applicazione delle tecniche di analisi del rischio alle HRS e di offrire un contributo originale all'argomento. A partire dalle condizioni assunte, le frequenze determinate mediante HyRAM+ individuano il compressore come elemento maggiormente critico del sistema, seguito dalle valvole e dal dispenser. È emerso inoltre che la possibilità di avere perdite di

dimensioni molto ridotte risulta piuttosto elevata, con frequenze di accadimento del *leak* 0.01% pari a $1.99 \times 10^{-1} \text{ anno}^{-1}$ e $7.17 \times 10^{-2} \text{ anno}^{-1}$ rispettivamente per il compressore e le valvole, ma anche che le frequenze decrescono fortemente nel caso delle perdite maggiormente impattanti, con $2.9 \times 10^{-5} \text{ anno}^{-1}$ e $1.2 \times 10^{-4} \text{ anno}^{-1}$ per compressore e valvole nel caso di un *leak* pari al 100% dell'area di flusso della tubazione. Sono risultati meritevoli di attenzione anche gli eventi di *nozzle release* e *drive-off*, scelti a rappresentanza degli eventi accidentali che possono avere luogo in corrispondenza del dispenser a causa dell'intervento umano, già individuato come frequente causa d'incidente dai lavori presentati nella sezione 2.2.3. L'analisi delle conseguenze, realizzata mediante il supporto di PHAST, ha permesso d'altro canto di definire, nelle condizioni scelte, le aree di influenza dei fenomeni di *jet fire* e *VCE* a seguito dei rilasci, consentendo di realizzare una valutazione preliminare delle distanze di sicurezza opportune dagli elementi facenti parte dell'impianto. L'impiego delle simulazioni CFD ha inoltre fornito la possibilità di stimare l'influenza degli elementi strutturali sulla propagazione degli effetti legati al *jet fire*, ottenendo un utile confronto con le distanze precedentemente definite mediante le simulazioni "semplificate"; le barriere strutturali, considerate tridimensionalmente, conducono ad una riduzione delle aree interessate dall'irraggiamento termico e all'ottenimento di profili isolivello pertinenti, fornendo dati maggiormente accurati per la progettazione del layout.

Ottenute le distanze, è stato ritenuto utile impiegarle in un confronto con le distanze di sicurezza suggerite in diversi riferimenti normativi nazionali ed internazionali, quali: DM 07/07/23 (scelto come riferimento per la progettazione preliminare del layout), DM 23/10/2018 e NFPA 2. Quest'ultima è risultata maggiormente accurata, indicando le distanze di riferimento sulla base delle effettive condizioni di impiego degli elementi pericolosi; inoltre, eccezion fatta per il dispenser, risulta anche essere maggiormente conservativa rispetto ai decreti ministeriali italiani. Le distanze suggerite dai DM sono state comunque giudicate opportune a fronte delle aree di influenza precedentemente determinate, considerando i dati di input e le condizioni assunte per lo svolgimento delle simulazioni; le misure indicate si presentano come un compromesso funzionale tra i requisiti di sicurezza e la fattibilità realizzativa dei layout, risultando sovradimensionate per gli scenari di perdita meno impattanti e più frequenti (*leak* di piccole dimensioni) e sottodimensionate per gli scenari di perdita più nefasti ma molto rari (*leak* di grandi dimensioni).

L'applicazione del *french land use planning method* ha permesso infine di valutare l'accettabilità dell'impianto ipotizzato mediante la matrice di rischio nazionale francese, a partire dai dati di frequenza e dalle aree ottenute dalle precedenti simulazioni. Quasi la totalità degli scenari analizzati è considerabile ininfluente e quindi pienamente accettabile, mentre 6 particolari scenari sono stati classificati nella categoria "MMR1", richiedendo conseguentemente il rilascio all'impianto del permesso di operare solamente a seguito dell'adozione di tutti i sistemi mitigativi attuabili.

5.2 Implicazioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto ha permesso di evidenziare la necessità di proseguire il processo di sviluppo messo in atto, coordinando i vari elementi dell'ambito su scala nazionale e internazionale, così da sfruttare la fitta collaborazione tra comunità scientifica, aziende e enti legislatori per la crescita dell'impiego dell'idrogeno come vettore energetico, in via generale, e della diffusione nello specifico delle *hydrogen refueling stations*, in quanto sistemi avanzati e funzionali al processo di emancipazione del settore energetico dall'impiego di combustibili fossili. In questo quadro riveste un ruolo cruciale l'applicazione mirata dell'analisi del rischio, in quanto strumento necessario per garantire uno sviluppo della filiera caratterizzato da livelli di sicurezza elevati. L'aumento del numero degli impianti presenti a livello globale renderà meno complesso il processo di analisi, aumentando i dati statistici a disposizione e le evidenze pratiche; le analisi così condotte consentiranno a loro volta una maggiore consapevolezza nella progettazione futura degli impianti, riuscendo a garantire standard di sicurezza maggiori, in grado di soddisfare anche i requisiti dei contesti maggiormente critici.

A livello globale, gli obiettivi risultano dunque essere i seguenti:

- Continuare a condividere su larga scala i dati operativi derivanti dagli impianti reali, così da affinare le informazioni a disposizione e da migliorare conseguentemente i dati di input per le analisi future;
- Aggiornare costantemente i dati sulle frequenze di accadimento dei fenomeni di rilascio a partire dalle informazioni derivanti dagli impianti reali in funzione;
- Omogenizzare gli standard normativi così da permettere analisi e studi coerenti legati ad impianti sviluppati sulla base di linee guida fisse;

- Tenere conto dei risultati delle QRA nella stesura dei riferimenti normativi, integrandoli in maniera opportuna;
- Aumentare l'influenza dell'analisi del rischio fin dalle prime fasi della progettazione delle HRS;
- Proseguire lo sviluppo dei software utili nelle varie fasi dell'analisi considerando i dati derivanti dalle applicazioni pratiche per il miglioramento dei modelli;
- Sviluppare modelli CFD più accurati e validati sperimentalmente, così da farne il principale mezzo per l'analisi delle conseguenze, migliorando la progettazione dei layout (evitando eccessivi sovradimensionamenti) e la definizione dei livelli di rischio;
- Integrare le nuove tecnologie nelle varie fasi di analisi e nello sviluppo degli strumenti a disposizione (al momento, ad esempio, risultano interessanti le prospettive offerte dallo sviluppo dell'intelligenza artificiale per la velocizzazione dei processi di analisi).

Per quanto concerne il lavoro presentato in questa trattazione, esso si presta a futuri ampliamenti, miglioramenti ed approfondimenti. L'analisi bibliografica svolta è stata realizzata con l'obiettivo di fornire un'ampia panoramica del tema d'interesse, raccogliendo informazioni riguardanti vari aspetti legati all'impiego dell'idrogeno nel settore energetico. Future estensioni potrebbero trattare con maggiore attenzione alcuni degli argomenti toccati, realizzando analisi approfondite sui database esistenti o valutando le tecniche di analisi impiegabili, discutendo l'affidabilità dei modelli sui quali si basano e la loro influenza sui risultati ottenuti. Inoltre, l'opera presentata illustra l'attuale stato di avanzamento degli studi e degli approcci messi in atto, richiedendo conseguentemente un costante aggiornamento che tenga conto delle metodologie più innovative e dei nuovi strumenti a disposizione, tra i quali spicca al momento l'impiego del *machine learning* e del metodo bayesiano, i quali permettono la realizzazione di un processo di apprendimento continuo ed accurato durante le varie fasi dell'analisi. Lo studio simulativo realizzato potrebbe anch'esso essere soggetto di eventuali modifiche ed estensioni, atte a valutare aspetti diversi o ad approfondire quelli già trattati. Va fortemente sottolineato che le ipotesi fatte e i dati di input assunti hanno influenzato profondamente le simulazioni svolte, restituendo risultati coerenti con le scelte fatte, ma che non risultano assumibili come riferimenti assoluti. A fronte di ciò, l'analisi svolta potrebbe essere ripetuta variando le condizioni di partenza, in modo da denotare le differenze nei riscontri ottenuti. Ad esempio, l'aver considerato come tubazione di

riferimento per gli elementi facenti parte della zona produttiva un DN 40 risulta essere una condizione fortemente conservativa e risulterebbe di assoluto interesse una nuova valutazione realizzata a partire da diametri maggiormente ridotti. Allo stesso tempo, si noti che le simulazioni sono state condotte facendo riferimento sulle informazioni e i dati attualmente a disposizione e che quindi possano essere migliorate con il progressivo aggiornamento dei dati stessi; la scarsità di dati reali rappresenta un limite intrinseco per ogni fase della valutazione. Inoltre, all'interno dello studio sono stati analizzati solamente alcuni scenari incidentali caratteristici del sistema, valutandone tassi di occorrenza e conseguenze; un ottimo spunto di miglioramento è pertanto rappresentato dalla possibilità di realizzare un'analisi globale, non trascurando alcun aspetto operativo. Per quanto riguarda eventuali futuri ampliamenti, l'aggiunta di un'accurata fase preliminare di identificazione dei pericoli (HI) permetterebbe di aumentare la rigorosità e la precisione della valutazione, mentre la realizzazione di una fase conclusiva di analisi dei rischi (RA) consentirebbe di definire le zone interessate da determinati livelli di *individual risk* e di tracciare la curva F-N caratteristica del sistema, riuscendo a valutare accuratamente anche il *social risk*, per poi poterlo confrontare con i livelli di accettabilità e tollerabilità definiti a livello internazionale.

Si noti per di più che, come già detto, lo studio è stato condotto su un impianto ipotetico le cui caratteristiche sono state definite a partire da quelle tipiche dei sistemi realmente esistenti e funzionanti. Inoltre, l'impianto è stato ipoteticamente posizionato in una zona rurale/industriale caratterizzata da una modesta densità abitativa (150 persone/km²), il che ha influito fortemente sulle considerazioni fatte in occasione dell'applicazione del *french land use planning method*. Può risultare dunque di forte interesse la ripetizione del processo di studio messo in atto considerando un impianto reale posto in un centro urbano, così da sottolineare le differenze riscontrate.

In conclusione, il lavoro finora presentato ha permesso di evidenziare come l'analisi del rischio rappresenti uno strumento imprescindibile per accompagnare in sicurezza la transizione verso un largo impiego dell'idrogeno nello scenario energetico del futuro prossimo, superando gli ostacoli dovuti alla limitata esperienza operativa. Mediante la combinazione di basi teoriche solide ed accurate e di moderni approcci simulativi, risulta infatti possibile fornire ai progettisti, ai legislatori e alla società gli elementi necessari per prendere decisioni consapevoli, ridurre i rischi futuri e realizzare conseguentemente il potenziale dell'idrogeno come vettore energetico chiave per un futuro sostenibile.

6. Bibliografia

- [1] «Security, affordability and sustainability – World Energy Outlook 2024 – Analysis», IEA. Consultato: 15 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/security-affordability-and-sustainability>
- [2] K. B. Debnath e M. Mourshed, «Forecasting methods in energy planning models», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, pp. 297–325, mag. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.002.
- [3] S. Aslam, H. Herodotou, S. M. Mohsin, N. Javaid, N. Ashraf, e S. Aslam, «A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, p. 110992, lug. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110992.
- [4] K. Jiang, Z. Tian, I. Cullis, W. G. Proud, e S. Hillmanssen, «Towards sustainable mobility: A systematic review of hydrogen refueling station security assessment and risk prevention», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 105, pp. 1266–1280, mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.348.
- [5] A. Joshi, F. Sattari, L. Lefsrud, M. Tufail, e M. A. Khan, «Mitigating uncertainty: A risk informed approach for deploying hydrogen refueling stations», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 74, pp. 136–150, lug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.085.
- [6] S. Park, B. Hashim, U. Zahid, e J. Kim, «Global risk assessment of hydrogen refueling stations: Trends, challenges, and future directions», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 106, pp. 1462–1479, mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.438.
- [7] N. Ade, B. Wilhite, e H. Goyette, «An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, fasc. 56, pp. 32713–32729, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.232.
- [8] R. Alfafos, J. Sillman, e R. Soukka, «Lessons learned and recommendations from analysis of hydrogen incidents and accidents to support risk assessment for the hydrogen economy», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 60, pp. 1203–1214, mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.226.

- [9] H. Kwak, M. Kim, M. Min, B. Park, e S. Jung, «Assessing the Quantitative Risk of Urban Hydrogen Refueling Station in Seoul, South Korea, Using SAFETI Model», *Energies*, vol. 17, fasc. 4, p. 867, feb. 2024, doi: 10.3390/en17040867.
- [10] T. Suzuki *et al.*, «Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, fasc. 11, pp. 8329–8343, feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.035.
- [11] F. Yang *et al.*, «Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, fasc. 61, pp. 31467–31488, set. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005.
- [12] S. Rowan *et al.*, «Hydrogen Safety Review for Gas Turbines, SOFC, and High Temperature Hydrogen Production», DOE/NETL--2022/3329, 1969531, mar. 2023. doi: 10.2172/1969531.
- [13] M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, e C. Lombardo, «Safety studies of a hydrogen refuelling station: Determination of the occurrence frequency of the accidental scenarios», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, fasc. 14, pp. 5846–5854, lug. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.096.
- [14] F. Dawood, M. Anda, e G. M. Shafiullah, «Hydrogen production for energy: An overview», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, fasc. 7, pp. 3847–3869, feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- [15] «Hydrogen Refueling Stations». Consultato: 19 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://hyfindr.com/en/page/hydrogen-refueling-station>
- [16] «Idrogeno, poco più di 100 stazioni aperte nel 2024: ecco la mappa globale», <https://www.clubalfa.it/automobili>. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.clubalfa.it/automobili/idrogeno-poco-piu-di-100-stazioni-aperte-nel-2024-ecco-la-mappa-globale-26119>
- [17] «Stations Map», H2Stations.org. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.h2stations.org/stations-map/>
- [18] «China plans to build more than 1,200 hydrogen refueling stations by 2025, more than the current total worldwide», Interact Analysis. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://interactanalysis.com/insight/china-plans-to-build-more-than-1200-hydrogen-refueling-stations-by-2025-more-than-the-current-total-worldwide/>

- [19] J. Kwak, H. Lee, S. Park, J. Park, e S. Jung, «Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station in an Urban Area», *Energies*, vol. 16, fasc. 9, p. 3963, mag. 2023, doi: 10.3390/en16093963.
- [20] J. Nakano, «Japan's Hydrogen Industrial Strategy», ott. 2021, Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy>
- [21] «Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Fueling Stations». Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen-stations>
- [22] «H2.LIVE: Hydrogen Stations in Germany & Europe», H2.LIVE. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://h2.live/en/>
- [23] «Nearly 80% of global hydrogen refueling stations are located in just five countries», Electric Vehicle Charging & Infrastructure. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.evcandi.com/news/nearly-80-global-hydrogen-refueling-stations-are-located-just-five-countries>
- [24] «IIT Hydrogen | l'impianto di produzione idrogeno a Bolzano». Consultato: 18 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://iithydrogen.it/impianto-di-produzione-idrogeno-a-bolzano/>
- [25] A. Abdelfatah, S. Moktar, A. Sheta, e B. Solaiman, «Forecast Global Carbon Dioxide Emission using Swarm Intelligence», *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 77, fasc. 12, pp. 1–5, set. 2013, doi: 10.5120/13443-1343.
- [26] «Eni: a Venezia Mestre la prima stazione di servizio per il rifornimento di idrogeno per la mobilità». Consultato: 18 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2022/06/eni-inaugurates-the-first-hydrogen-refuelling-station-in-venice-mestre.html>
- [27] FNM_EDITOR, «MILANO SERRAVALLE - MILANO TANGENZIALI Nasce la prima rete nazionale per la mobilità a idrogeno in Italia», FNM Group. Consultato: 18 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.fnmgroup.it/2025/06/30/milano-serravalle-milano-tangenziali-nasce-la-prima-rete-nazionale-per-la-mobilita-a-idrogeno-in-italia/>
- [28] «H2IT Italia » Progetti H2IT». Consultato: 18 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.h2it.it/projects/tutti_progetti/

- [29] «Produzione idrogeno, specifiche regole antincendio», Reteambiente. Consultato: 20 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.reteambiente.it/news/52095/produzione-idrogeno-specifiche-regole-antincendio/>
- [30] «NFPA 2 Hydrogen Technologies Code | H2tools | Hydrogen Tools». Consultato: 22 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://h2tools.org/fuel-cell-codes-and-standards/nfpa-2-hydrogen-technologies-code>
- [31] «Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Act - Climate Change Laws of the World». Consultato: 22 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: https://climate-laws.org/documents/hydrogen-economy-promotion-and-hydrogen-safety-management-act_d5a7
- [32] «Hydrogen Safety Portal Website Launched». Consultato: 22 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.meti.go.jp/english/press/2023/0630_002.html
- [33] «Idrogeno: stazioni di rifornimento - UNI - Ente Italiano di Normazione». Consultato: 22 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.uni.com/idrogeno-stazioni-di-rifornimento/>
- [34] A. Carpignano, «Risk Analysis, dispensa didattica, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, 2025».
- [35] J. X. Wen *et al.*, «Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, fasc. 38, pp. 17082–17096, mag. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.170.
- [36] B. Park, Y. Kim, S. Paik, e C. Kang, «Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 155, pp. 145–154, nov. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.09.016.
- [37] X. Zhang, G. Qiu, S. Wang, J. Wu, e Y. Peng, «Hydrogen Leakage Simulation and Risk Analysis of Hydrogen Fueling Station in China», *Sustainability*, vol. 14, fasc. 19, p. 12420, set. 2022, doi: 10.3390/su141912420.
- [38] B. Jeon, S. Kim, Y. S. Yoon, e S. Jung, «Quantitative Risk Assessment of Hydrogen Refueling Station in Cheonan City of South Korea», *Energies*, vol. 16, fasc. 20, p. 7138, ott. 2023, doi: 10.3390/en16207138.

- [39] K. Tsunemi, T. Kihara, E. Kato, A. Kawamoto, e T. Saburi, «Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, fasc. 41, pp. 23522–23531, ago. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.027.
- [40] S. Kikukawa, F. Yamaga, e H. Mitsuhashi, «Risk assessment of Hydrogen fueling stations for 70MPa FCVs», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, fasc. 23, pp. 7129–7136, dic. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.08.063.
- [41] E. Kim, J. Park, J. H. Cho, e I. Moon, «Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, fasc. 3, pp. 1737–1743, feb. 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.079.
- [42] United Nations, *Guidance on Land-Use Planning, the Siting of Hazardous Activities and Related Safety Aspects*. UN, 2018. doi: 10.18356/df07526b-en.
- [43] J. LaChance, «Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, fasc. 14, pp. 5838–5845, lug. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.070.
- [44] B. D. Ehrhart, E. S. Hecht, e B. B. Schroeder, «Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.1 Technical Reference Manual».
- [45] D. Brooks, B. Ehrhart, e A. LaFleur, «Development of Liquid Hydrogen Leak Frequencies Using a Bayesian Update Process.», in *Proposed for presentation at the International Conference on Hydrogen Safety 2021 held September 21-24, 2021 in , US DOE*, set. 2021. doi: 10.2172/1889604.