



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Novembre 2025

Analisi di Rischio Quantitativa per un impianto di cattura, purificazione e liquefazione di CO₂: analisi critica di uno studio QRA e peculiarità nella valutazione delle conseguenze

Tesi di Laurea Magistrale

Relatori:

Prof. Andrea Carpignano

Prof.ssa Raffaella Gerboni

Ing. Anna Chiara Uggenti

Ing. Luca Portè

Candidata:

Katia Maria Della Ratta

*A tutte le donne che hanno sognato questo traguardo,
la cui vita è stata interrotta prima di poterlo raggiungere.*

*A tutte le persone che vedono buio tutto intorno,
non abbiate paura di ritrovarvi nella luce.*

*Al mio papà,
ho sognato il tuo supporto ogni giorno di questo percorso,
sentendo ancora l'amore che mi davi da bambina.*

*A Giulia,
nel tempo in cui le nostre vite si sono incrociate
sei stata il motore della mia.*

Sommario

Nel presente lavoro di tesi si propone lo studio di un'analisi di rischio quantitativa su un impianto reale di tipo BECCS (Bio-Energy Carbon Capture and Storage), soluzione strategica innovativa per la rimozione dell'anidride carbonica dall'atmosfera. Questo tipo di impianto introduce anche nuovi rischi legati alla manipolazione, al trasporto e allo stoccaggio di grandi volumi di CO₂.

In particolare, questa tesi prevede un focus sulle difficoltà nella realizzazione di una QRA (Quantitative Risk Analysis) dovute alla mancanza di standard robusti dedicati esclusivamente alla CO₂, analizzando la documentazione tecnica attualmente disponibile e i modi in cui questa viene adattata alle valutazioni di rischio per l'anidride carbonica.

In fase preliminare è stata eseguita una ricerca per ottenere un punto sullo stato dell'arte della tecnologia CCS (Carbon Capture and Storage).

L'analisi di rischio ha previsto la divisione dell'impianto in sezioni isolabili e l'identificazione dei relativi punti di rilascio. Le frequenze di dispersione sono state stimate tramite la tecnica del parts count e i dati del database IOGP (International Organization of Oil and Gas Producers), differenziando gli scenari con intervento e con guasto del sistema di emergenza. La modellazione della dispersione delle nubi tossiche è stata eseguita utilizzando il software DNV PHAST. Infine, il rischio è stato quantificato in termini di IRPA (Individual Risk Per Annum) e rischio

sociale, confrontando i risultati con i criteri di tollerabilità ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

I risultati della QRA indicano che i rilasci outdoor di CO₂ liquida generano conseguenze peggiori rispetto a quelli di CO₂ gassosa, mentre per i rilasci indoor la criticità tossicologica emerge soltanto nel caso di mancato intervento del sistema di emergenza e ventilazione forzata assente.

I valori di IRPA, calcolati sia per le aree outdoor che per quelle indoor, e la curva F-N totale per il rischio sociale rientrano all'interno della zona ALARP.

In fase finale è stata eseguita un'analisi di sensitività sul software DNV PHAST, con il fine di indagare l'impatto dei parametri che caratterizzano il rilascio, in particolare l'inventario di sostanza rilasciato, la sua pressione e temperatura, sull'estensione delle aree di danno fornite dalle simulazioni di questo software. I risultati principali di quest'analisi dimostrano che per i rilasci outdoor l'inventario risulta avere un impatto nullo o trascurabile, mentre i rilasci gassosi sono maggiormente influenzati dalla pressione e quelli liquidi dalla temperatura.

Per gli scenari indoor l'impatto di pressione, temperatura e inventario dipende dal singolo caso.

Il lavoro svolto ha offerto una valutazione critica delle fasi dell'analisi di rischio, evidenziando criticità e punti aperti sull'applicazione di una metodologia classica di QRA ad un impianto che tratta CO₂.

Abstract

This thesis presents a quantitative risk analysis (QRA) study conducted on a real-world BECCS (Bio-Energy Carbon Capture and Storage) plant, an innovative strategic solution for removing carbon dioxide from the atmosphere. This type of plant also introduces new risks related to the handling, transport, and storage of large volumes of CO₂.

In particular, this thesis focuses on the challenges of performing a QRA resulting from the lack of robust standards dedicated exclusively to CO₂, analyzing the currently available technical documentation and the methods by which it is adapted for carbon dioxide risk assessments. A preliminary phase involved research to establish the state-of-the-art of CCS (Carbon Capture and Storage) technology.

The risk analysis involved dividing the plant into isolatable sections and identifying the relative release points. Release frequencies were estimated using the “parts count” technique and data from the IOGP (International Association of Oil & Gas Producers) database, differentiating between scenarios with and without emergency system intervention. The dispersion modeling of toxic clouds was performed using the DNV PHAST software. Finally, the risk was quantified in terms of IRPA (Individual Risk Per Annum) and social risk, comparing the results with the ALARP (As Low As Reasonably Practicable) tolerability criteria.

The QRA results indicate that outdoor liquid CO₂ releases generate worse consequences than those of gaseous CO₂, while for indoor releases, toxic criticality emerges only in the event of a combined failure

of the emergency system and the forced ventilation. The IRPA values, calculated for both outdoor and indoor areas, and the total F-N curve for social risk fall within the ALARP zone.

Finally, a sensitivity analysis was performed using the DNV PHAST software to investigate the impact of the parameters characterising the release – specifically the released substance inventory, its pressure and temperature – on the extension of the damage areas provided by the software's simulations. The main results of this analysis demonstrate that for outdoor releases, the inventory has a negligible impact, while gaseous releases are influenced more by pressure and liquid releases more by temperature. For indoor scenarios, the impact of pressure, temperature and inventory on concentration depends on the single case.

This work offered a critical assessment of the risk analysis phases, highlighting critical issues and open points on the application of a classic QRA methodology to a facility that handles CO₂.

Indice

Sommario.....	1
Abstract	3
Indice delle figure.....	10
Indice delle tabelle.....	12
Indice degli acronimi.....	19
1. Introduzione.....	23
1.1 Obiettivi della tesi.....	30
1.2 Contesto del progetto.....	32
1.3 Struttura della tesi	33
2. Contesto	35
2.1 Proprietà chimico-fisiche della CO ₂	35
2.1.1 Effetto delle impurità sulle caratteristiche della CO ₂	38
2.2 Cattura della CO ₂	40
2.2.1 Cattura post-combustione.....	41
2.2.2 Cattura pre-combustione.....	43
2.2.3 Ossicombustione	45
2.2.4 Cattura diretta dall'aria.....	47
2.3 Trasporto della CO ₂	50
2.3.1 Trasporto via condotta	51
2.3.2 Trasporto via nave	53
2.3.3 Trasporto via terra.....	54
2.4 Stoccaggio della CO ₂	56
2.4.1 Giacimenti di idrocarburi esauriti.....	56
2.4.2 Acquiiferi salini.....	57
2.4.3 Giacimenti di carbone non sfruttabili	58
2.4.4 Carbonatazione minerale	59
2.4.5 BECCS.....	60
2.5 Pericoli connessi alla CO ₂	62

2.5.1 Criteri di vulnerabilità per le persone – CO ₂ gassosa	63
2.5.2 Criteri di vulnerabilità per le persone – CO ₂ liquida.....	68
2.5.3 Criteri di vulnerabilità per gli asset geologici	72
2.5.4 Criteri di vulnerabilità per gli asset ingegneristici.....	73
2.5.5 Criteri di vulnerabilità per gli asset di trasporto	74
2.6 CO ₂ vs GNL.....	78
3. Caso studio.....	83
3.1 Progetto BECCS.....	86
3.2 Descrizione del processo.....	87
3.2.1 Compressione dei fumi.....	93
3.2.2 Cattura della CO ₂	93
3.2.3 Liquefazione della CO ₂	97
3.2.4 Stoccaggio e caricamento della CO ₂	102
4. Metodologia.....	105
4.1 Identificazione e selezione delle fonti di rilascio	109
4.2 Sezioni isolabili e inventari.....	111
4.3 Valutazione delle frequenze.....	115
4.3.1 Adattamento IOGP e standard in evoluzione.....	118
4.4 Analisi ad albero dei guasti.....	121
4.5 Analisi ad albero degli eventi.....	124
4.6 Modellazione delle conseguenze	125
4.6.1 Software DNV PHAST	125
4.6.2 Modellazione del rilascio	129
4.6.3 Modellazione della dispersione	131
4.6.4 Modellazione dei rilasci outdoor.....	134
4.6.5 Modellazione dei rilasci indoor	136
4.7 Valutazione del rischio	139
4.7.1 Standard in evoluzione.....	144
4.7.2 Rischio sociale.....	146

5. Analisi QRA e discussione dei risultati	149
5.1 Sezioni isolabili e punti di rilascio.....	150
5.2 Valutazione delle frequenze di rilascio.....	160
5.3 Modellazione delle conseguenze per scenari outdoor	165
5.3.1 Scenari con guasto del sistema ESD.....	165
5.3.2 Scenari con intervento del sistema ESD	169
5.4 Modellazione delle conseguenze per scenari indoor	172
5.5 Valutazione del rischio per scenari outdoor.....	176
5.6 Valutazione del rischio per scenari indoor.....	179
5.7 Valutazione del rischio sociale.....	181
6. Risultati dell'analisi di sensitività	188
6.1 Definizione del set di parametri in input	190
6.2 Lunghezza della nube.....	193
6.3 Volume della nube	202
6.4 Tempo di residenza della nube.....	206
6.5 Temperatura di centreline	209
6.6 Risultati generali per gli scenari outdoor.....	214
6.7 Scenari indoor	216
7. Conclusioni e studi futuri.....	221
Bibliografia.....	228
Allegati.....	237
Allegato 1 – Sezioni Isolabili	237
Allegato 2 – Punti di rilascio.....	240
Allegato 3 – Frequenze.....	247
Allegato 4 – Lunghezza delle nubi.....	252
Allegato 5 – Concentrazioni tossiche	259
5.1 Sala di compressione	259
5.2 Sala di cattura	259
5.3 Sala di liquefazione	260

Allegato 6 – Sezione 4_G_outdoor	262
Allegato 7 – Sezione 5_G_outdoor.....	263
Allegato 8 – Sezione 3_G_UL.....	268
Allegato 9 – Sezione 3_L_UL.....	273
Allegato 10 – Sezione 3_G	278
Allegato 11 – Sezione 4_G_indoor.....	280
Allegato 12 – Sezione 5_G_indoor.....	282
Allegato 13 – Sezione 1G_D_UL.....	284
Allegato 14 – SDS CO ₂	286
Ringraziamenti	294

Indice delle figure

Figura 1. Massa totale di CO ₂ emessa dal 1900 al 2024	23
Figura 2. Global Carbon Cycle	26
Figura 3. Diagramma di stato della CO ₂	36
Figura 4. Diagramma di stato della regione supercritica della CO ₂	37
Figura 5. Densità della CO ₂ pura e di flussi di CO ₂ con impurità.....	39
Figura 6. Separazione con solventi chimici	41
Figura 7. Ossicombustione con ITM	46
Figura 8. S-DAC.....	48
Figura 9. L-DAC	48
Figura 10. Impianto con emissioni nette di anidride carbonica pari a zero e impianto che genera emissioni negative	83
Figura 11. Schema a blocchi del processo.....	88
Figura 12. Layout generale dell'impianto.....	89
Figura 13. PFD compressione fumi e cattura CO ₂ , L1-02.....	95
Figura 14. PFD compressione fumi e cattura CO ₂ , L1-03.....	95
Figura 15. PFD compressione fumi e cattura CO ₂ , L1-04	96
Figura 16. PFD compressione fumi e cattura CO ₂ , L1-05	96
Figura 17. PFD compressione fumi e cattura CO ₂ , L1-06.....	97
Figura 18. PFD unità di liquefazione, L2-01.....	99
Figura 19. PFD unità di liquefazione, L2-02.....	99
Figura 20. PFD unità di liquefazione, L2-03.....	100
Figura 21. PFD unità di liquefazione, L2-04.....	100
Figura 22. PFD unità di liquefazione, L2-05.....	101
Figura 23. PFD unità di liquefazione, L2-06.....	101
Figura 24. PFD stoccaggio e caricamento della CO ₂ , L1-07	102
Figura 25. Esempio di costruzione di un Fault Tree.....	123
Figura 26. Albero degli eventi per un rilascio di CO ₂	124
Figura 27. Modellazione della dispersione di CO ₂ (UDM).....	132
Figura 28. Sezione isolabile 1_L	152
Figura 29. Sezioni isolabili 2_G, 3_G	152
Figura 30. Sezioni isolabili 2_G, 3_G, 4_G	153
Figura 31. Sezione isolabile 5_G.....	153
Figura 32. Sezioni isolabili da 6_L a 12_L8	154
Figura 33. Sezioni isolabili 1G_A_UL, 1G_B_UL, 1G_D_UL, 2_L_UL, 6_G_UL, 7_G_UL.....	154

Figura 34. Sezioni isolabili 1G_C_UL, 6_G_UL	155
Figura 35. Sezioni isolabili 1G_D_UL, 2_G_UL, 2_L_UL.....	155
Figura 36. Sezioni isolabili 1G_D_UL, 2_G/2_L_UL, 3_G/3_L_UL, 4_L_UL, 6_G_UL.....	156
Figura 37. Sezioni isolabili 1G_D_UL, 4_L_UL.....	156
Figura 38. Area considerata per i rilasci outdoor	165
Figura 39. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 4_G.	166
Figura 40. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 5_G..	167
Figura 41. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 3_G_UL	167
Figura 42. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 3_L_UL	167
Figura 43. Max Footprint con intervento ESD, sezione isolabile 5_G.....	170
Figura 44. Max Footprint con intervento ESD, sezione isolabile 3_G_UL	170
Figura 45. Area considerata per i rilasci indoor.....	172
Figura 46. Mappa IRPA outdoor	177
Figura 47. Mappa IRPA indoor	179
Figura 48. Aree impattate dagli scenari incidentali	181
Figura 49. Curva F-N totale	183
Figura 50. Legenda frequenze cumulate.....	184
Figura 51. Frequenze cumulate senza intervento ESD.....	185
Figura 52. Frequenze cumulate con intervento ESD	185
Figura 53. Lunghezza della nube in funzione della pressione, sezione isolabile 4_G.....	193
Figura 54. Lunghezza della nube in funzione della temperatura, sezione isolabile 4_G.....	194
Figura 55. Visione laterale per rilascio senza intervento ESD, sezione isolabile 5_G.....	202
Figura 56. Visione laterale per rilascio senza intervento ESD, sezione isolabile 3_G_UL.....	203
Figura 57. Visione laterale per rilascio senza intervento ESD, sezione isolabile 3_L_UL.....	203
Figura 58. T di centreline per la sezione 5_G.....	211
Figura 59. T di centreline per la sezione 3_G_UL.....	211
Figura 60. T di centreline per la sezione 3_L_UL.....	212
Figura 61. Punti di rilascio	246

Indice delle tabelle

Tabella 1. Proprietà fisiche della CO ₂ pura	35
Tabella 2. Valori limite di esposizione alla CO ₂	65
Tabella 3. Effetti dell'ipossia sulla salute umana	65
Tabella 4. Effetti combinati di ipercapnia e ipossia.....	68
Tabella 5. Confronto proprietà CO ₂ e GNL	79
Tabella 6. Descrizione dei componenti dell'impianto.....	92
Tabella 7. Caratteristiche QRA per diverse fasi del progetto	106
Tabella 8. Composizione molare dei fluidi	113
Tabella 9. Diametri rappresentativi IOGP report 434-1.....	115
Tabella 10. Condizioni ambientali per la modellazione dei rilasci	135
Tabella 11. Condizioni meteorologiche che stabiliscono le classi di stabilità atmosferiche di Pasquill	136
Tabella 12. ACPH per scenari indoor.....	137
Tabella 13. Valori soglia per i rischi legati al rilascio di CO ₂	141
Tabella 14. Valori soglia per i rischi legati al rilascio di CO ₂ raccomandati dall' IOGP 434-14	142
Tabella 15. Concentrazioni SLOT e SLOD per diversi tempi di esposizione	142
Tabella 16. Confronto delle soglie di esposizione e applicabilità alla QRA	146
Tabella 17. Descrizione delle sezioni isolabili	151
Tabella 18. Descrizione dei punti di rilascio	159
Tabella 19. Numero totale dei componenti per le sezioni isolabili dell'impianto.....	160
Tabella 20. Numero dei componenti presenti nelle sezioni isolabili analizzate.....	161
Tabella 21. Lunghezza delle tubazioni di processo delle sezioni isolabili analizzate.....	161
Tabella 22. Frequenze di perdita delle sezioni isolabili analizzate	162
Tabella 23. Frequenze di dispersione con intervento di ESD per le sezioni isolabili analizzate.....	164
Tabella 24. Frequenze di dispersione con guasto ESD per le sezioni isolabili analizzate.....	164
Tabella 25. Lunghezza della nube per rilascio senza intervento ESD, 105000 ppm.....	168

Tabella 26. Lunghezza della nube per rilascio con intervento ESD, 105000 ppm	171
Tabella 27. Concentrazioni tossiche prodotte da rilasci con intervento dell'ESD per le sale di cattura e liquefazione	174
Tabella 28. IRPA medio per scenari outdoor	178
Tabella 29. IRPA per scenari indoor	179
Tabella 30. Persone presenti nelle aree impattate dagli scenari incidentali.....	182
Tabella 31. Variazione dei parametri p e T per le sezioni isolabili outdoor	191
Tabella 32. Variazione dei parametri p, T e inventario per le sezioni isolabili indoor	192
Tabella 33. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione isolabile 4_G.....	195
Tabella 34. Confronto delle variazioni dei parametri, sezione isolabile 4_G.....	195
Tabella 35. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione 3_G_UL.....	196
Tabella 36. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione 3_G_UL.....	197
Tabella 37. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione 3_L_UL.....	197
Tabella 38. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione 3_L_UL.....	198
Tabella 39. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G.....	198
Tabella 40. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G.....	199
Tabella 41. Impatto dei diversi parametri sulla lunghezza della nube.....	200
Tabella 42. Impatto dei diversi parametri sul volume della nube.....	204
Tabella 43. Impatto dei diversi parametri sul tempo di residenza della nube	206
Tabella 44. Impatto dei diversi parametri sulla temperatura di centreline della nube a 0 metri.....	209
Tabella 45. Impatto dei diversi parametri sulla temperatura di centreline della nube a metà della sua lunghezza.....	210

Tabella 46. Impatto dei diversi parametri sulla concentrazione massima	217
Tabella 47. Descrizione delle sezioni isolabili	239
Tabella 48. Descrizione dei punti di rilascio	245
Tabella 49. Frequenze di perdita	248
Tabella 50. Frequenze di dispersione con intervento ESD	250
Tabella 51. Frequenze di dispersione con guasto ESD	251
Tabella 52. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 105000 ppm	252
Tabella 53. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 120000 ppm	253
Tabella 54. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 150000 ppm	254
Tabella 55. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 280000 ppm	255
Tabella 56. Lunghezza delle nubi per rilasci con intervento ESD, 105000 ppm	256
Tabella 57. Lunghezza delle nubi per rilasci con intervento ESD, 120000 ppm	257
Tabella 58. Lunghezza delle nubi per rilasci con intervento ESD, 150000 ppm	258
Tabella 59. Concentrazioni tossiche sala di compressione, caso 1.....	259
Tabella 60. Concentrazioni tossiche sala di compressione, caso 2	259
Tabella 61. Concentrazioni tossiche sala di compressione, caso 3.....	259
Tabella 62. Concentrazioni tossiche sala di cattura, caso 1	259
Tabella 63. Concentrazioni tossiche sala di cattura, caso 2	259
Tabella 64. Concentrazioni tossiche sala di cattura, caso 3	260
Tabella 65. Concentrazioni tossiche sala di liquefazione, caso 1.....	260
Tabella 66. Concentrazioni tossiche sala di liquefazione, caso 2.....	260
Tabella 67. Concentrazioni tossiche sala di liquefazione, caso 3	261
Tabella 68. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione 4_G.....	262
Tabella 69. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione 4_G	262
Tabella 70. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione 4_G.....	262

Tabella 73. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G.....	263
Tabella 74. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione isolabile 5_G.....	263
Tabella 75. Volume della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G.....	264
Tabella 76. Volume della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G.....	264
Tabella 77. Volume della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G.....	264
Tabella 78. Tempo di residenza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G.....	265
Tabella 79. Tempo di residenza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G.....	265
Tabella 80. Tempo di residenza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G.....	265
Tabella 81. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G	266
Tabella 82. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G	266
Tabella 83. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G.....	266
Tabella 84. Temperatura di centreline della nube a 3 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G	267
Tabella 85. Temperatura di centreline della nube a 3 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G	267
Tabella 86. Temperatura di centreline della nube a 3 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G.....	267
Tabella 87. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione 3_G_UL.....	268
Tabella 88. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione 3_G_UL.....	268
Tabella 89. Volume della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL.....	269
Tabella 90. Volume della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL.....	269

Tabella 91. Volume della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL.....	269
Tabella 92. Tempo di residenza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL.....	270
Tabella 93. Tempo di residenza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL	270
Tabella 94. Tempo di residenza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL.....	270
Tabella 95. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL.....	271
Tabella 96. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL	271
Tabella 97. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL.....	271
Tabella 98. Temperatura di centreline della nube a 15 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL.....	272
Tabella 99. Temperatura di centreline della nube a 15 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL	272
Tabella 100. Temperatura di centreline della nube a 15 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL	272
Tabella 103. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione 3_L_UL.....	273
Tabella 104. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione 3_L_UL.....	273
Tabella 105. Volume della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL.....	274
Tabella 106. Volume della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL.....	274
Tabella 107. Volume della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL.....	274
Tabella 108. Tempo di residenza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL	275
Tabella 109. Tempo di residenza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL.....	275
Tabella 110. Tempo di residenza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL.....	275

Tabella 111. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL	276
Tabella 112. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL.....	276
Tabella 113. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL.....	276
Tabella 114. Temperatura di centreline della nube a 87 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL	277
Tabella 115. Temperatura di centreline della nube a 87 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL.....	277
Tabella 116. Temperatura di centreline della nube a 87 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL.....	277
Tabella 117. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di pressione	278
Tabella 118. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di temperatura.....	278
Tabella 119. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di inventario.....	278
Tabella 120. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di pressione, temperatura e inventario	279
Tabella 121. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di pressione	280
Tabella 122. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di temperatura.....	280
Tabella 123. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di inventario	280
Tabella 124. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di pressione, temperatura e inventario	281
Tabella 125. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di pressione	282
Tabella 126. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di temperatura.....	282
Tabella 127. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di inventario	282

Tabella 128. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di pressione, temperatura e inventario	283
Tabella 129. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di pressione	284
Tabella 130. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di temperatura	284
Tabella 131. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di inventario.....	284
Tabella 132. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di pressione, temperatura e inventario.....	285

Indice degli acronimi

ACPH: Air Changes Per Hour

ADGC: Australian Dangerous Goods Code

API: American Petroleum Institute

ASME: American Society of Mechanical Engineers

AWD: Along Wind Diffusion

BECCS: Bio-Energy with Carbon Capture and Storage

BPVC: Boiler and Pressure Vessel Code

CCS: Carbon Capture and Storage

CCUS: Carbon Capture Utilisation and Storage

CDR: Carbon Dioxide Removal

CFD: Computational Fluid Dynamics

CLP: Classification, Labelling and Packaging

CCOHS: Canadian Centre of Occupational Health and Safety

DAC: Direct Air Capture

DBTT: Ductile-to-Brittle Transition Temperature

DIPPR: Design Institute for Physical Properties

DNV: Det Norske Veritas

DPI: Dispositivi di Protezione Individuale

DTL: Dangerous Toxic Loads

EOR: Enhanced Oil Recovery

ESD: Emergency Shut Down

ETA: Event Tree Analysis

ETS: Emission Trading System

EU: European Union

FTA: Fault Tree Analysis

GHG: GreenHouse Gases

GNL: Gas Naturale Liquefatto

HAZID: HAZard IDentification

HAZOP: HAZard and OPerability analysis

HPC: Hot Potassium Carbonate

HSE: Health and Safety Executive
IEA: International Energy Agency
IGC: International Gas Carrier code
IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health
IOPG: International association of Oil & Gas Producers
IRPA: Individual Risk Per Annum
ISO: International Organization for Standardization
ITM: Integrated Transport Model
JIPs: Joint Industry Projects
LOC: Loss Of Containment
LOPC: Loss of Primary Containment
LS/R: Location Specific Individual Risk
MAE: Major Accidental Events
MOF: Metal–Organic Framework
NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health
NPRM: Notice of Proposed RuleMaking
OFAT: One Factor At a Time
OSHA: Occupational Safety and Health Administration
P&ID: Piping and Instrumentation Diagram
PFD: Process Flow Diagram
PHAST: Process Hazard Analysis Software Tool
PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration
PSV: Pressure Safety Valve
QRA: Quantitative Risk Analysis
REACH: Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals
SDS: Scheda di Dati di Sicurezza
SDV: Shut Down Valve
SLOD: Significant Likelihood of Death
SLOT: Specified Level of Toxicity
STEL: Short-Time Exposure Limit

TLV: Threshold Limit Value

TRL: Technology Readiness Level

TWA: Time-Weighted Average

UDM: Unified Dispersion Model

1. Introduzione

L'attuale era geologica vede come protagonista l'uomo a causa della sua decisiva influenza sui sistemi terrestri e, per questo, viene definita "Antropocene". [1]

A partire dalla Prima Rivoluzione Industriale (fine XVIII – inizio XIX secolo) l'uomo ha iniziato a sfruttare massicciamente i combustibili fossili, quali carbone e petrolio, come fonte energetica primaria, causando un innalzamento del contenuto atmosferico di anidride carbonica.

Tra i gas a effetto serra, la CO₂ è il principale responsabile del riscaldamento globale: le emissioni totali di anidride carbonica legate all'energia (combustione di combustibili fossili, trasporti, industria) sono aumentate dello 0,8% nel 2024 portando a concentrazioni record di CO₂ atmosferica di 422,5 ppm, circa 3 ppm in più rispetto al 2023 e il 50% in più rispetto ai livelli preindustriali. [2]

In Figura 1 è possibile osservare l'andamento della massa totale di CO₂ emessa dal 1900 al 2024.

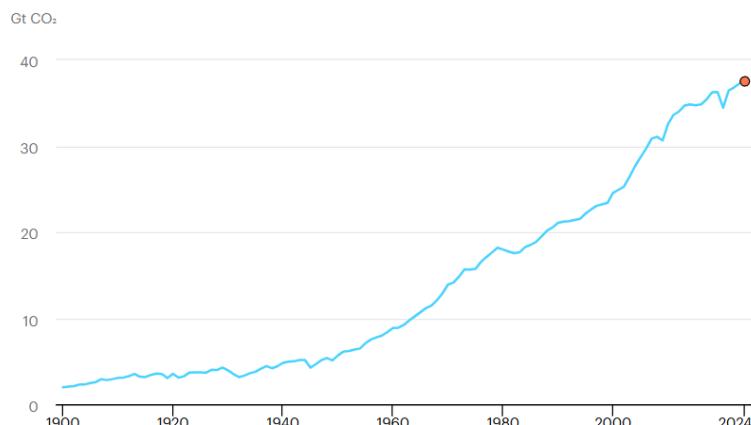


Figura 1. Massa totale di CO₂ emessa dal 1900 al 2024 [3]

Secondo dati aggregati forniti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) la responsabilità delle emissioni di gas serra è distribuita tra i diversi settori delle attività umane [5] :

- Settore dell'approvvigionamento energetico (34%): nel 2023 c'è stato un aumento di 410 milioni di tonnellate rispetto all'anno precedente [4] ;
- Industria (24%);
- Agricoltura e uso del suolo (22%);
- Trasporti (15%);
- Edilizia (6%). [5]

L'anidride carbonica (CO_2), gas incolore e inodore a temperatura e pressione ambiente, svolge un ruolo importante per la vita sulla Terra: la sua presenza a basse concentrazioni è fondamentale per la regolazione della temperatura del pianeta attraverso il naturale effetto serra, in particolare per mantenere la Terra ad una temperatura adatta alla vita.

Circa il 20% della radiazione che la Terra riceve dal sole viene assorbita dall'atmosfera e parte di questa viene riflessa dalla superficie terrestre sotto forma di calore; più o meno l'80% di questo calore viene assorbito dai gas serra presenti in atmosfera e viene riemesso in tutte le direzioni.[6] Se la concentrazione di CO_2 diminuisce o aumenta in maniera eccessiva, questo naturale equilibrio si altera e si traduce rispettivamente in un raffreddamento del pianeta Terra o in un riscaldamento eccessivo dello stesso.

Tuttavia, l'eccesso di GHG (GreenHouse Gases, gas serra) di origine antropica comporta un trattenimento sempre maggiore di radiazioni infrarosse e un conseguente riscaldamento anomalo del sistema climatico globale.

Gli effetti del riscaldamento globale si manifestano concretamente attraverso:

- Aumento delle temperature medie: rispetto ai livelli preindustriali la temperatura media globale è aumentata di circa 1,1°C [7];
- Innalzamento del livello del mare e scioglimento dei ghiacciai;
- Intensificazione degli eventi meteorologici estremi;
- Acidificazione degli oceani;
- Perdita di biodiversità.

La Terra possiede meccanismi naturali per assorbire la CO₂: parte della vegetazione, attraverso la fotosintesi clorofilliana, sfrutta l'anidride carbonica per il proprio sostentamento, mentre gli oceani assorbono circa un quarto delle emissioni antropogeniche. [8]

In Figura 2 è possibile osservare il ciclo globale della CO₂.

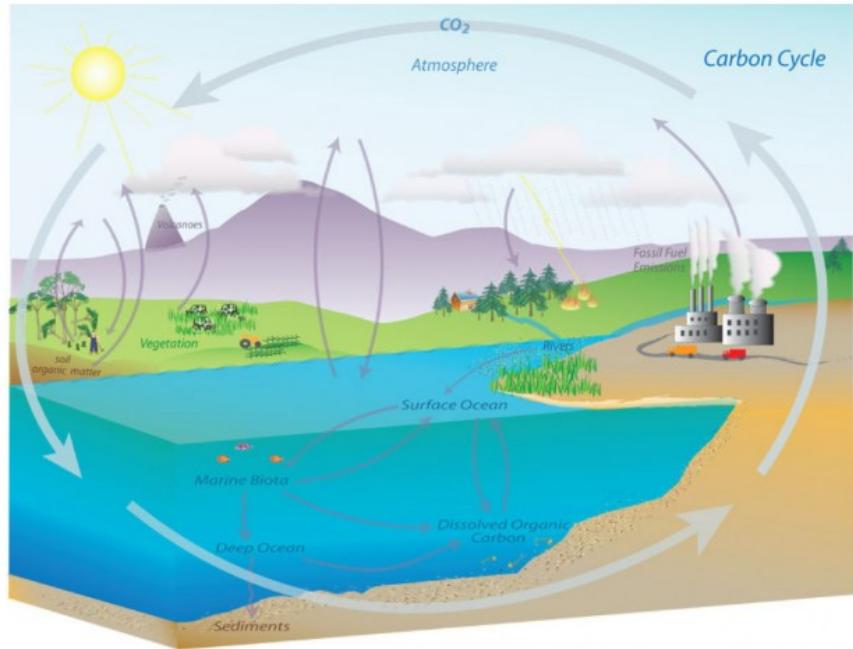


Figura 2. Global Carbon Cycle [3]

La capacità di assorbimento del suolo e del mare, tuttavia, non è più sufficiente ai fini di mantenere concentrazioni normali di CO₂ in atmosfera, vista la velocità con cui le attività umane la rilasciano; perciò, risulta necessaria la ricerca di soluzioni tecnologiche per gestire le emissioni.

Nel 1987, già di fronte all'evidenza della crisi climatica, la Commissione Mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo pubblicò il rapporto "Our Common Future", conosciuto come "Rapporto Brundtland", nel quale si definisce lo sviluppo sostenibile come "quello sviluppo che soddisfa le esigenze del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie". Questa ampia definizione racchiude tre aspetti fondamentali: sostenibilità ambientale, sostenibilità economica, sostenibilità sociale.

Il rapporto Brundtland si è trasformato in azioni concrete attraverso il Protocollo di Kyoto del 1997 e l'Accordo di Parigi del 2015.

Il Protocollo di Kyoto è stato il primo accordo a stabilire obiettivi vincolanti e quantificati di limitazione e riduzione dei gas a effetto serra per i paesi aderenti, secondo cui questi si impegnavano a ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 5% nel periodo 2008-2012 rispetto al 1990. [8]

L'Accordo di Parigi è un trattato internazionale sui cambiamenti climatici, adottato nel 2015 da 196 Paesi, con l'obiettivo principale di limitare l'aumento della temperatura media globale al di sotto di 1,5°C. Secondo questo accordo, i Paesi si impegnano a favore dell'azione per il clima presentando e comunicando, ogni cinque anni, piani d'azione al fine di ridurre le proprie emissioni. [9]

In questo contesto, l'Unione Europea ha espresso i suoi target con il Green Deal Europeo definendo degli obiettivi per il 2030 e per il 2050; i primi fissano una riduzione di emissioni di gas serra di almeno il 55%, mentre i secondi mirano a raggiungere la neutralità climatica, per cui l'UE non potrà emettere più gas serra di quanti ne possa assorbire attraverso pozzi naturali o tecnologie di rimozione del carbonio. [11]

Una tecnologia necessaria per il raggiungimento di questi obiettivi è la CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage), consistente nel sequestro dell'anidride carbonica e nel conseguente stoccaggio permanente o nel suo utilizzo come materia prima per produrre nuovi materiali o prodotti. Nel campo della cattura di CO₂, una frontiera promettente è rappresentata dai materiali metallo-organici, composti cristallini

altamente porosi che possono catturare e immagazzinare selettivamente le molecole di anidride carbonica. L'importanza di questa tecnologia è stata recentemente riconosciuta con l'assegnazione del premio Nobel per la chimica a Susumu Kitagawa, Richard Robson e Omar M. Yaghi per il loro lavoro sui MOF (Metal-Organic Frameworks). Questi studi e i loro risultati aprono a nuove prospettive per lo sviluppo di sistemi di cattura più efficaci e a basso costo, dando un contributo significativo al raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica. [12]

Le applicazioni industriali che richiedono anidride carbonica spaziano in diversi ambiti: viene utilizzata, ad esempio, nell'industria chimica per la produzione di urea, nell'industria farmaceutica per il trasporto dei prodotti a bassa temperatura e nell'industria alimentare come agente batteriostatico e fungistatico nel confezionamento dei prodotti. Le applicazioni appena citate richiedono piccole quantità di CO₂. Invece, l'Enhanced Oil Recovery (EOR) richiede grandi volumi di anidride carbonica, la quale viene iniettata ad alta pressione in giacimenti petroliferi maturi per aumentarne la pressione interna ed estrarre una quota di greggio altrimenti irrecuperabile. Questa tecnologia, però, costituisce un meccanismo per migliorare l'efficienza di un processo emissivo piuttosto che una strategia di riduzione netta delle emissioni. Mentre il meccanismo EOR viene prediletto in America, l'Europa si concentra maggiormente sullo sviluppo di filiere dedicate alla cattura e allo stoccaggio geologico permanente (Carbon Capture and Storage, CCS), con l'obiettivo di creare infrastrutture per lo stoccaggio sicuro,

con un potenziale riutilizzo di CO₂ in applicazioni innovative come la produzione di carburanti sintetici, materiali da costruzione o l'impiego nel settore agricolo.

1.1 Obiettivi della tesi

Nell'ottica di una transizione energetica che richiede lo sviluppo e l'utilizzo di nuove tecnologie è di fondamentale importanza considerare gli eventuali incidenti legati a queste stesse tecnologie e condurre delle analisi di rischio per valutare e mitigare i pericoli associati.

La CCS è una soluzione valida per la decarbonizzazione dei settori industriali, ma introduce dei rischi legati al trasporto e allo stoccaggio di grandi volumi di CO₂.

Un esempio di rilievo in questo campo è l'incidente di Satartia, nel Mississippi: nel mese di febbraio 2020 si è verificata la rottura di un gasdotto per il trasporto di CO₂, causando l'evacuazione dell'intera popolazione del villaggio per evitare gli effetti asfissianti dell'anidride carbonica. [13]

A questo incidente è seguito un continuo evolversi di standard e documentazioni tecniche per il trasporto e lo stoccaggio di CO₂ e per la definizione di linee guida per lo svolgimento di analisi di rischio relative a questi settori.

Questo lavoro di tesi si focalizza sull'analisi quantitativa del rischio per un impianto BECCS, con il fine di determinare la probabilità di accadimento di un evento pericoloso e quantificare le conseguenze dei danni alle persone, identificando le aree che verrebbero impattate da tale evento. Oltre al punto sullo stato dell'arte dei settori della CCS, durante lo svolgimento del lavoro si sono anche definite le difficoltà pertinenti allo svolgimento di una QRA (Quantitative Risk Analysis)

classica per impianti che trattano CO₂ e le normative presenti o in evoluzione, fornendo un punto di partenza per le analisi future. È stata svolta, infine, un'analisi di sensitività per comprendere meglio le peculiarità dell'anidride carbonica e per dimostrare la robustezza dell'analisi QRA svolta.

1.2 Contesto del progetto

Questo lavoro di tesi è stato preparato nell'ambito di un tirocinio presso la società di ingegneria RAMS&E ed è relativo ad un progetto BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) reale, finanziato dall'Innovation Fund, i cui dati sensibili non sono riportati con esattezza per ragioni di riservatezza.

La tecnologia BECCS nasce in seguito agli Accordi di Parigi del 2015 per triplicare l'utilizzo delle bioenergie e per raggiungere l'obiettivo "Net Zero Emission 2050".

BECCS combina la produzione di energia da biomassa con la cattura e lo stoccaggio dell'anidride carbonica, con il fine di creare un impatto "carbon negative", ovvero di rimuovere anidride carbonica dall'atmosfera.

Oltre al compito prezioso di rimozione di CO₂, la BECCS potrebbe essere sfruttata anche per contribuire alla stabilità della rete, generando energia producibile su richiesta. [14] [12]

1.3 Struttura della tesi

In questa sezione è riportata la struttura della tesi per evidenziare i contenuti principali dei diversi capitoli:

- Nel secondo capitolo si analizzano le proprietà chimico-fisiche della CO₂ e i rischi intrinseci di questo gas per passare, poi, ad una panoramica sullo stato dell'arte delle tecnologie di cattura, trasporto e stoccaggio. Sono presenti, infine, un focus sui criteri di vulnerabilità per le persone e per gli asset e un confronto della CO₂ con il GNL (Gas Naturale Liquefatto).
- Nel terzo capitolo viene presentato il caso studio, con una spiegazione sul quadro dei finanziamenti europei e una successiva descrizione del processo analizzato.
- Il quarto capitolo ha l'obiettivo di illustrare la metodologia adottata per lo svolgimento dell'analisi di rischio quantitativa, fornendo una spiegazione per ogni step dell'analisi e definendo un panorama sulle normative e le documentazioni tecniche attualmente esistenti.
- Il quinto e il sesto capitolo presentano, rispettivamente, i risultati dell'analisi di rischio e dell'analisi di sensitività svolta sul software DNV PHAST utilizzato per la QRA.
- Il settimo capitolo è dedicato alle conclusioni, in cui viene ripercorso il lavoro svolto con un focus sui risultati principali e gli spunti per ricerche e studi futuri.

2. Contesto

2.1 Proprietà chimico-fisiche della CO₂

L'anidride carbonica è una sostanza formata dall'ossidazione del carbonio e la sua molecola è composta da due atomi di ossigeno legati covalentemente ad un atomo di carbonio; infatti, è chiamata anche diossido di carbonio o biossido di carbonio. A temperatura e pressione ambiente si trova allo stato gassoso, è incolore e inodore, solubile in acqua ed è inerte e non infiammabile.

In Tabella 1 sono riportate le proprietà principali dell'anidride carbonica pura.

Proprietà	Valore
Peso molecolare	44,01 g/mol
Pressione critica	73,8 bar
Temperatura critica	31,1 °C
Pressione punto triplo	5,18 bar
Temperatura punto triplo	-56,6 °C
Densità standard	1,98 kg/m ³
Densità punto critico	467,6 kg/m ³

Tabella 1. Proprietà fisiche della CO₂ pura [15]

Lo stato fisico dell'anidride carbonica varia con temperatura e pressione, come riscontrato nel diagramma di stato (Figura 3).

A basse temperature la CO₂ è solida; riscaldandosi e rimanendo a pressioni inferiori di 5,1 bar si trova, invece, allo stato di vapore. A temperature comprese tra -56,6°C e 31,1°C può passare dallo stato di vapore a quello liquido comprimendola fino alla corrispondente pressione di liquefazione.

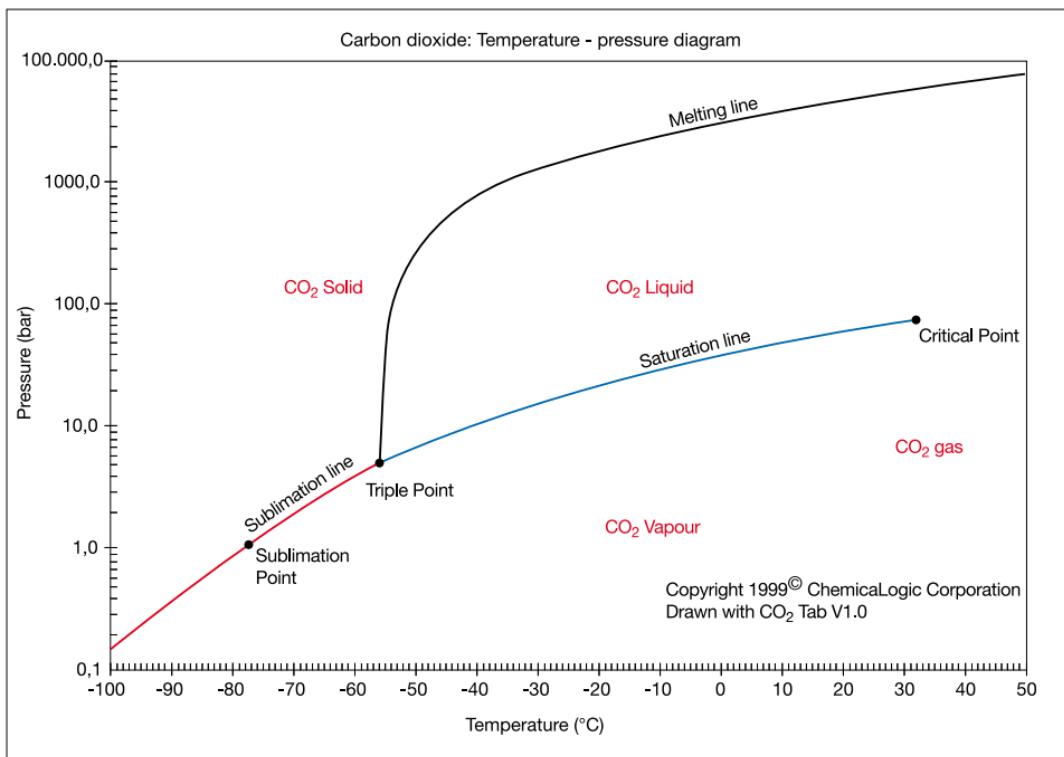


Figura 3. Diagramma di stato della CO₂ [15]

A temperature e pressioni maggiori di quelle critiche, la CO₂ si trova in uno stato supercritico, dove le sue proprietà sono ibride tra quelle di un liquido e quelle di un gas: la diffusività e la capacità di espandersi fino a riempire il suo contenitore sono simili a quelle di un gas, ma la densità rimane simile a quella di un liquido.

La regione supercritica non è uniforme ed è, infatti, divisa in due parti dalla regione pseudocritica, come è possibile notare in Figura 4:

- Stato supercritico “liquid-like”: per temperature minori di quella pseudocritica, la CO₂ è caratterizzata da una densità elevata.
- Stato supercritico “vapour-like”: per temperature maggiori di quella pseudocritica, la CO₂ è caratterizzata da basse densità e viscosità e alta diffusività.

In prossimità della curva pseudocritica (estensione della curva di saturazione nella regione supercritica) le proprietà termofisiche dell'anidride carbonica cambiano drasticamente: la densità e la viscosità diminuiscono rapidamente, mentre il calore specifico a pressione costante mostra un picco pronunciato.

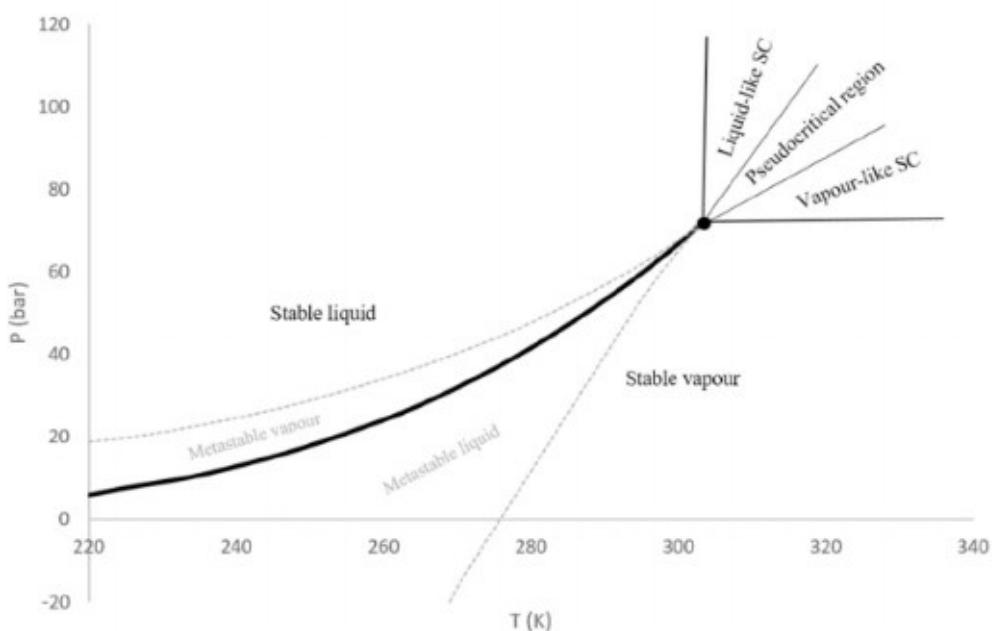


Figura 4. Diagramma di stato della regione supercritica della CO₂ [16]

È interessante concentrarsi sulla densità e la viscosità della CO₂ supercritica: la densità rimane simile a quella dello stato liquido anche a basse pressioni, mentre la viscosità rimane simile a quella dello stato gassoso e circa costante all'aumentare della pressione.

La combinazione di queste due proprietà è estremamente vantaggiosa per il trasporto e lo stoccaggio dell'anidride carbonica, in quanto sviluppa meno resistenze fluidodinamiche e può essere stoccati in grandi quantità in volumi minori.

2.1.1 Effetto delle impurità sulle caratteristiche della CO₂

La presenza di impurità nei flussi di anidride carbonica provenienti da processi di cattura modificano in modo significativo le sue proprietà chimico-fisiche, in particolar modo densità e viscosità, fondamentali per il trasporto e lo stoccaggio. La presenza di gas non condensabili, come azoto e idrogeno, causa un cambiamento del punto critico con un abbassamento della temperatura critica e un aumento della pressione critica, richiedendo una pressione maggiore per mantenere la CO₂ in fase supercritica.

Inoltre, la presenza di questi gas, a causa dell'abbassamento della temperatura, aumenta anche il rischio della presenza di un flusso bifase nelle attrezzature di trasporto, che ne verrebbero danneggiate.

Come precedentemente detto, la densità è un parametro chiave per lo stoccaggio, ma le impurità più leggere della CO₂ fanno diminuire il suo

valore a parità di pressione. Anche la viscosità diminuisce con la presenza di impurità.

In Figura 5 è possibile osservare l'andamento della densità di un fluido contenente CO₂ in funzione delle diverse impurità presenti in esso.

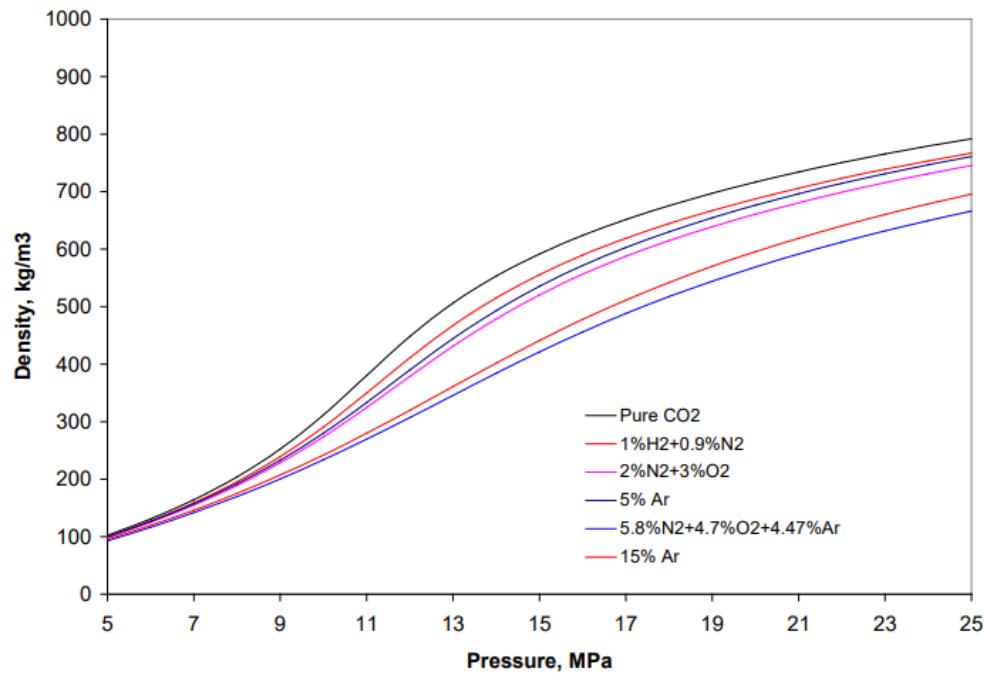


Figura 5. Densità della CO₂ pura e di flussi di CO₂ con impurità [17]

2.2 Cattura della CO₂

La catena del processo di CCS è composta da tre fasi:

- Cattura da grandi fonti puntuali, come centrali termoelettriche e impianti industriali, o direttamente dall'aria ambiente;
- Trasporto: la CO₂ viene purificata e compressa per poi passare allo stato supercritico o liquido, per essere trasportata attraverso gasdotti, navi, treni o autocisterne;
- Stoccaggio in formazioni geologiche profonde e sicure come giacimenti di petrolio e gas esauriti o falde acquifere marine, dove l'anidride carbonica viene intrappolata in modo permanente.

Esistono tre metodologie principali di cattura: pre-combustione, post-combustione e ossicombustione, a cui si aggiungono le varianti che prevedono la cattura diretta dall'aria (Direct Air Capture, DAC) e l'uso di biomassa (Bio-Energy with Carbon Capture, BECC). Queste si distinguono tra di loro per principio operativo, maturità, costi e applicabilità e vengono impiegate a seconda del tipo di impianto, della concentrazione di CO₂ nei gas di scarico e del bilancio energetico complessivo.

Ad esempio, la cattura post-combustione è facile da applicare per impianti esistenti, ma richiede costi operativi elevati; la pre-combustione prevede una riprogettazione dell'impianto, ma offre vantaggi in termini di efficienza energetica. Esiste, perciò, un compromesso tra penalità energetica e complessità del processo, che

sta cercando di essere superato dalle tecnologie emergenti caratterizzate da minor consumo energetico e minore complessità.

2.2.1 Cattura post-combustione

Dopo la combustione del combustibile in aria, la tecnologia di cattura post-combustione interviene per separare la CO₂ dai fumi esausti che contengono una percentuale di anidride carbonica compresa tra il 3% e il 15% diluita in azoto. Possono essere utilizzati diversi metodi di separazione, che richiedono l'utilizzo di assorbenti/solventi chimici, membrane o una distillazione criogenica. Tra queste, la tecnica più consolidata è quella che impiega i solventi chimici, in particolare soluzioni acquose di ammine, per cui i fumi attraversano una colonna di assorbimento che lavora tra i 40°C e i 60°C. A queste temperature la CO₂ si lega chimicamente con il solvente, formando una soluzione ricca di anidride carbonica che viene riscaldata in un rigeneratore, per poi liberare la CO₂ pura e rigenerare il solvente, che può essere riciclato.

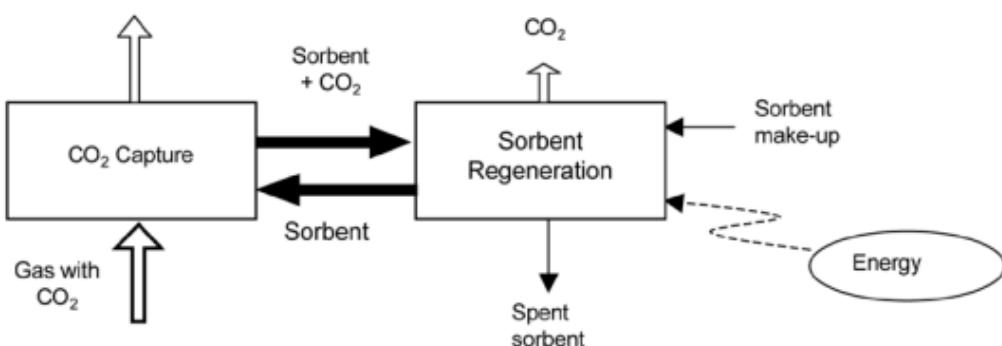


Figura 6. Separazione con solventi chimici [18]

I solventi chimici offrono alta efficienza e selettività con bassi consumi energetici, risultando economicamente convenienti rispetto alle altre tecnologie di post-combustione. Però, questo processo è energeticamente intensivo in quanto riduce l'efficienza netta dell'impianto, causando un aumento dei costi energetici.

La cattura post-combustione presenta un TRL (Technology Readiness Level) pari a 9 (livello più alto possibile), grazie alla sua maturità dovuta all'utilizzo di essa in altri processi industriali di separazione dei gas. Questa tecnologia rappresenta, infatti, anche un riferimento per i metodi di cattura emergenti. [60] La maturità di questa tecnologia è riscontrabile nell'esistenza di diversi standard specifici che la riguardano:

- ISO 27919-1:2018, "Performance evaluation methods for post-combustion capture integrated with power plant". Questo standard offre un metodo per la definizione di confini, parametri e metodologie per la valutazione degli impianti di cattura.
- ISO 27919-2:2021, "Evaluation procedure to assure and maintain stable performance of post-combustion capture plant integrated with a power plant". Questo standard offre delle procedure per il mantenimento delle prestazioni di progetto dell'impianto di cattura nel tempo.
- DNV-RP-J201, "Qualification procedures for carbon dioxide capture technology". Questa pratica raccomandata offre un approccio basato sul rischio per la qualifica delle nuove tecnologie di cattura.

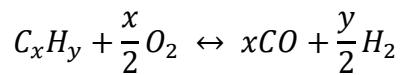
Un esempio di progetto operativo che utilizza la tecnologia di post-combustione con ammine è l'impianto Petra Nova negli USA, che presenta una capacità di cattura di 1,4 Mt/anno di CO₂ dai fumi di una centrale a carbone.

[61]

2.2.2 Cattura pre-combustione

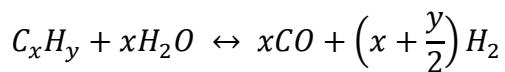
In questo caso, il combustibile primario viene processato prima della combustione, per trasformarlo in un gas di sintesi (una miscela di idrogeno e monossido di carbonio) con processi come gassificazione o reforming a vapore.

La reazione di gassificazione è esotermica e l'idrocarburo reagisce con l'ossigeno:

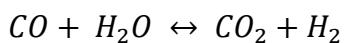


In particolare, se l'idrocarburo di partenza è in forma gassosa o liquida, si parla di ossidazione parziale; se l'idrocarburo di partenza è in forma solida si parla di gassificazione.

La reazione di reforming è una reazione endotermica in cui l'idrocarburo iniziale reagisce con il vapore acqueo:



In una seconda fase, con una reazione detta “water-gas shift”, si convertono il monossido di carbonio e il vapore acqueo in anidride carbonica e idrogeno:



Infine, la CO₂ viene separata dal flusso di idrogeno, che risulta quasi puro e può essere utilizzato come combustibile pulito.

Il vantaggio di questo processo consiste nella sua semplicità, in quanto la separazione dell'anidride carbonica avviene ad alta pressione e alta concentrazione, rendendolo anche meno dispendioso dal punto di vista energetico, a differenza della cattura post-combustione.

Anche la cattura pre-combustione presenta un TRL pari a 9 [60], ma gli standard esistenti non sono esplicitamente dedicati a questa singola tecnologia, bensì derivano da altri settori e sono atti a regolare i componenti chiave:

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) per i reattori ad alta pressione e i recipienti di separazione.
- ISO 13623 per le apparecchiature che trattano i gas.

Comunque, le attività complessive della catena CCS rientrano nello standard ISO/TC265 (di cui fanno parte gli standard ISO elencati precedentemente per la tecnologia di post-combustione), in cui verrà sicuramente aggiunto in futuro uno standard dedicato alla sola cattura pre-combustione.

Quasi tutti gli impianti di cattura della CO₂ con tecnologia pre-combustione sono stati realizzati per applicazioni di tipo EOR, come ad esempio l'impianto di gassificazione di Coffeyville negli USA.

2.2.3 Ossicombustione

L'ossicombustione consiste nel bruciare l'idrocarburo in un ambiente con ossigeno puro anziché in aria, in modo da eliminare l'azoto dai fumi di scarico che risultano composti, quindi, quasi esclusivamente da anidride carbonica e vapore acqueo. I fumi vengono raffreddati per condensare il vapore ed ottenere, alla fine, un flusso di CO₂ ad alta purezza.

Un aspetto tecnologico da tenere in considerazione è la temperatura della fiamma, in quanto quella raggiunta con l'ossigeno puro sarebbe troppo alta per i materiali in commercio nel settore; perciò, si adottano soluzioni come il ricircolo dei fumi e l'iniezione di vapore per mantenere la temperatura al di sotto dei 2000°C.

Il processo di ossicombustione richiede l'installazione di un separatore per dividere l'ossigeno dall'aria; le tecnologie di separazione sono diverse, ma quella che al momento è più promettente è il reattore con membrana permeabile agli ioni di ossigeno (ITM, Integrated Transport Model). In ingresso al reattore, che lavora a temperature di circa 1000°C, viene immessa aria compressa, dalla quale viene separato l'ossigeno tramite la membrana, che isola fisicamente le due camere. L'ossigeno va in camera di combustione, dove avviene l'ossicombustione con

l'idrocarburo, mentre i fumi combusti scambiano calore con la seconda camera, preriscaldando l'aria compressa priva di ossigeno. Questa aria calda segue un ciclo turbogas a recupero, mentre i prodotti di combustione del ciclo primario vengono espansi in turbina e poi vengono separati dall'acqua per condensazione in modo da purificare il flusso di CO₂.

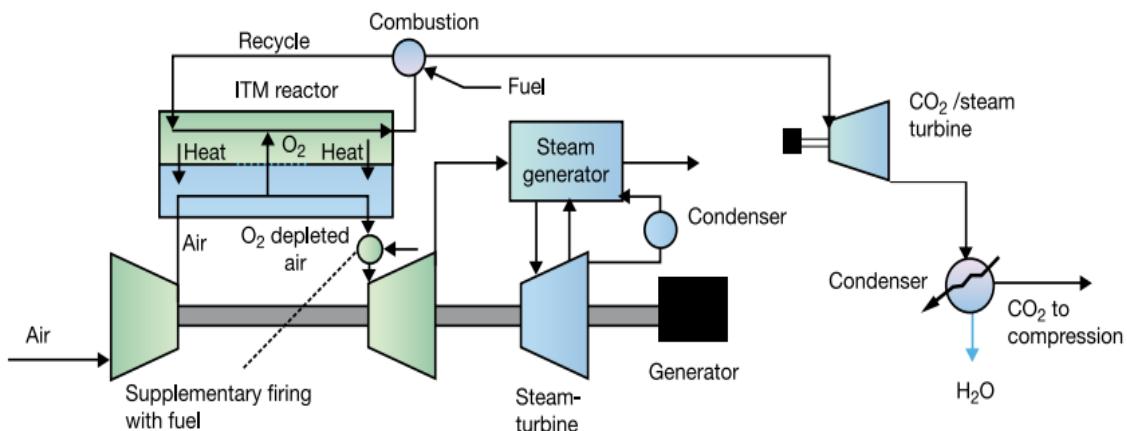


Figura 7. Ossicombustione con ITM [18]

Con questa tecnologia si raggiunge un'efficienza di cattura di quasi il 100% e si riduce drasticamente la formazione di NO_x (ossidi di azoto). Però, il costo e il consumo energetico dell'unità di separazione dell'aria per produrre l'ossigeno puro sono molto elevati, il che può causare un grande aumento dei costi energetici.

Il TRL dell'ossicombustione è pari a 7 [60], valore che indica una maturità inferiore rispetto alle tecnologie di pre e post-combustione analizzate precedentemente; infatti, non esistono standard specifici per questo tipo di cattura e i progetti esistenti sono più che altro

dimostrativi. Un esempio è il ciclo Allam-Fetvdet di NET Power negli USA, che è riuscito a sincronizzarsi con la rete elettrica dimostrando la fattibilità della tecnologia basata su un ciclo di potenza a CO₂ supercritica. Con questo sistema si riesce a generare elettricità utilizzando CO₂ supercritica come fluido di lavoro con un valore di cattura maggiore del 99%.

[62]

Un TRL di 7 per questa tecnologia è dovuto anche al costo e al consumo dell'unità di separazione dell'aria e alla necessità di validazione dei componenti che sfruttano un fluido ricco di anidride carbonica di lavorare in cicli di potenza a ossicombustione su larga scala.

2.2.4 Cattura diretta dall'aria

La DAC (Direct Air Capture) rimuove l'anidride carbonica già presente nell'atmosfera (circa 400ppm) estraendola dall'aria ambiente. Rispetto alla cattura da fonti puntuali, questo processo risulta più difficile ed energeticamente costoso.

La DAC può essere:

- Solid DAC (S-DAC): l'aria passa attraverso un filtro adsorbente (solido) che cattura la CO₂ legandola chimicamente a temperatura ambiente, per poi rilasciarla quando i filtri vengono sottoposti a temperature tra gli 80°C e i 120°C e basse pressioni.

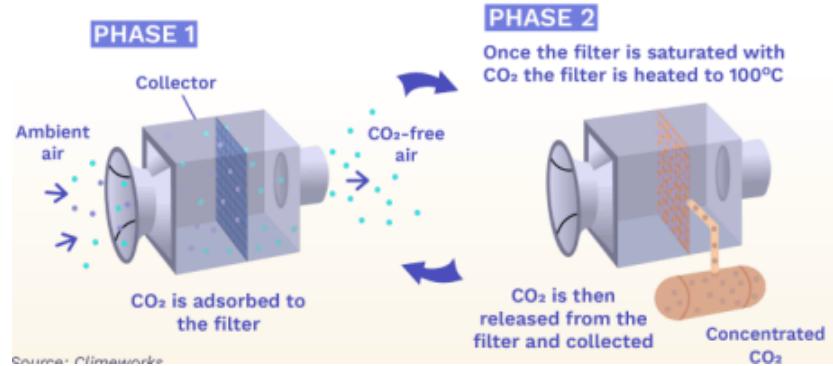


Figura 8. S-DAC [19]

- Liquid DAC (L-DAC): l'aria passa attraverso una soluzione chimica che assorbe la CO₂ a temperature ambiente, per poi rigenerarsi e rilasciare anidride carbonica a temperature comprese tra 300°C e 900°C. [20]

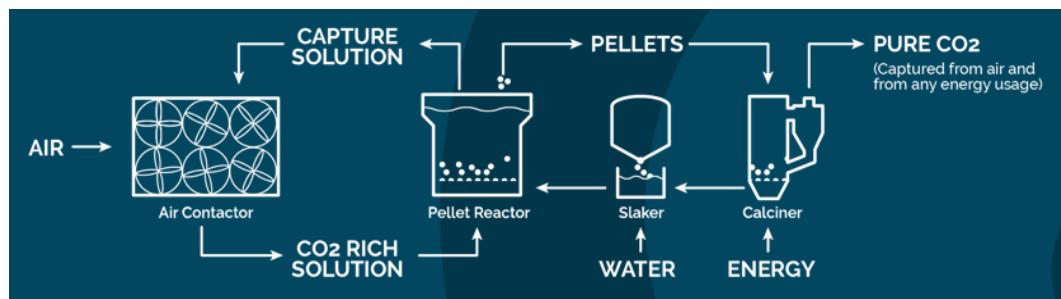


Figura 9. L-DAC [21]

La DAC è caratterizzata da un TRL di 7 e gli standard a disposizione riguardano, più in generale, la CDR (Carbon Dioxide Removal):

- Isometric Standard: è un protocollo che offre un metodo per la quantificazione delle rimozioni nette considerando le emissioni del ciclo vita.
- ISO 14064: è un insieme di standard utilizzati per la quantificazione e la rendicontazione di emissioni e rimozioni di gas serra.

Nonostante la mancanza di standard dedicati e un TRL non elevato, esistono impianti DAC operativi, come quello del progetto Mammoth in Islanda, che utilizza la tecnologia S-DAC e ha una capacità nominale di cattura di 36000 tonnellate di anidride carbonica all'anno, stoccati in rocce basaltiche. [63]

2.3 Trasporto della CO₂

Il trasporto dell'anidride carbonica dalla fonte al sito di stoccaggio può avvenire attraverso due modalità principali: via condotta o via nave. Queste due modalità si differenziano per caratteristiche tecniche, maturità tecnologica, costi e flessibilità operativa, mentre la scelta tra le due dipende dai volumi da trasportare, la distanza, la geografia del territorio e la configurazione della rete, delle fonti e dei siti di stoccaggio.

A sostenere lo sviluppo del settore del trasporto ci sono:

- Standard internazionale ISO 27913, che fornisce i requisiti formalizzati di integrità del sistema, di qualità del flusso di CO₂, di sicurezza, di salute e ambiente e di riconversione.
- Standard ASME B31.8, che deriva dal progetto americano per la costruzione dell'infrastruttura Canyon Reef Carriers Pipeline per l'GOR.
- Rapporti come lo Special Report sulla CCS dell'IPCC.
- Documenti di riferimento per le pratiche di ingegneria dettagliate, come la Recommended Practice DNV-RP-J202 che contiene valutazioni di sicurezza, indicazioni sulla composizione del flusso di CO₂, sulla progettazione e sul tracciato della condotta.

In particolare, l'Italia ha redatto un decreto interministeriale basato sulla ISO 27913 e sulla EN 1594, che contiene una "Regola tecnica per la progettazione, la costruzione, il collaudo, l'esercizio e la sorveglianza delle reti di trasporto della CO₂". [68]

2.3.1 Trasporto via condotta

Il trasporto attraverso le pipelines è la tecnologia più matura dal punto di vista tecnico per lo spostamento di grandi quantità di CO₂. Nonostante ciò, l'opinione pubblica è ancora dubbia a riguardo, a causa della sicurezza e dei diritti di proprietà; per questo motivo i progetti esistenti non sono molti. Un esempio di infrastruttura per il trasporto di CO₂ è la lunga rete di condotte negli USA che coinvolge il Bacino Permiano e la Costa del Golfo. In Europa, invece, il progetto Porthos si sta sviluppando per trasportare l'anidride carbonica al porto di Rotterdam in modo da poterla poi stoccare in giacimenti di gas esauriti offshore, mentre il progetto Northern Lights prevede anche una condotta offshore per trasportare l'anidride carbonica da punti di ricezione a terra (in tutta Europa) ad un sito di stoccaggio sottomarino in Norvegia. Per il progetto Northern Lights è stata completata la fase di Commissioning ed è iniziata quella di iniezione di CO₂. L'infrastruttura del progetto Porthos, invece, è in fase di costruzione.

Come visto nel paragrafo 2.1, l'anidride carbonica allo stato supercritico è caratterizzata da una densità simile a quella di un liquido ma riempie il volume in cui si trova come un gas, il che la rende perfetta per il trasporto via condotta. Inoltre, lo spostamento in fase supercritica (o liquida) riduce drasticamente le perdite di carico per attrito lungo la condotta rispetto al trasporto in fase gassosa, consentendo di movimentarne quantità maggiori.

Questa metodologia di trasporto, però, richiede alte pressioni, causando implicazioni sulla progettazione, sui materiali e sui costi della

pipeline: sono necessarie tubazioni con spessore e resistenza adeguati e un sistema di stazioni di compressione o pompaggio lungo il percorso per mantenere la pressione al di sopra del livello critico.

La realizzazione delle pipelines segue 4 passi:

- Progettazione meccanica dell'infrastruttura sulla base degli standard tecnici;
- Analisi di stabilità della struttura secondo gli standard tecnici;
- Protezione contro la corrosione secondo i dati di progetto;
- Scavo e sotterramento dei tubi a seconda del progetto, che può essere onshore o offshore.

Inoltre, ci sono anche delle specifiche chimiche da rispettare, che riguardano la purezza del flusso e la presenza di acqua in esso, che verranno approfondite nel paragrafo 2.5.5.

Un focus importante sulle criticità del trasporto della CO₂ e sulle differenze di questo con il trasporto del gas naturale è presentato nel lavoro di tesi "Trattamento e trasporto dell'anidride carbonica catturata per lo stoccaggio geologico in giacimenti offshore in dismissione" di Riccardo Barbieri [58], mentre un caso particolare di trasporto di CO₂ in fase gas tramite pipeline è presentato nel lavoro di tesi "Riconversione di una piattaforma petrolifera in dismissione e del relativo reservoir per l'installazione di un impianto di stoccaggio di anidride carbonica. Progettazione preliminare" di Francesco Pertuso. [59]

2.3.2 Trasporto via nave

Il trasporto navale su larga scala è una tecnologia meno matura rispetto alle condotte, che sta emergendo come alternativa strategica e flessibile soprattutto per coprire lunghe distanze o per collegare fonti e siti di stoccaggio separati dal mare.

Per questo tipo di trasporto, la CO₂ viene liquefatta all'interno di serbatoi criogenici a bordo di navi chiamate "LCO₂ Carrier" (Liquefied CO₂ Carrier), la cui progettazione fa capo al codice IGC (International Gas Carrier Code) dell'Organizzazione Marittima Internazionale, che classifica i serbatoi in tre categorie:

- Serbatoi in pressione: mantengono il gas allo stato liquido a temperatura ambiente e a pressione elevata, il che li rende ideali per il trasporto di piccole quantità di CO₂.
- Serbatoi refrigerati a bassa temperatura: sfruttano le temperature criogeniche per mantenere il gas allo stato liquido a pressioni atmosferiche rendendosi adatti per il trasporto di grandi quantità di prodotto.
- Serbatoi semi-refrigerati: sono un compromesso tra le due tipologie precedenti, mantenendo il gas a temperature basse e pressioni moderate e costituiscono la soluzione più vantaggiosa per il trasporto di CO₂ risultando efficienti ed economici.

Il trasporto marittimo di anidride carbonica deve tener conto della produzione costante da parte delle fonti industriali e dei tempi di spedizione, per cui si rende indispensabile uno stoccaggio temporaneo della CO₂ liquefatta nelle aree di partenza prima di essere caricata sulle

navi. Inoltre, se la destinazione è sulla terraferma, ci può essere bisogno di un secondo sito di stoccaggio temporaneo nel sito di arrivo prima che la CO₂ venga trasportata al sito di stoccaggio definitivo. Se, invece, la destinazione è offshore, le piattaforme di interesse devono essere equipaggiate per consentire l'attracco sicuro della nave e il trasferimento diretto della CO₂.

Il trasporto marittimo di anidride carbonica è fondamentale per la realizzazione di un mercato CCS transfrontaliero e, per questo, esistono già delle infrastrutture dedicate, come quella del progetto Northern Lights, ma anche quella del Ravenna CCS Hub in Italia. Questo progetto è stato ideato per la ricezione via nave di CO₂ da diversi siti industriali di tutto il Mediterraneo.

2.3.3 Trasporto via terra

È possibile parlare anche di trasporto via terra, come camion e ferrovia, utilizzato per il trasporto di piccole quantità di CO₂ per brevi percorsi, ad esempio per collegare una fonte di cattura a un punto di raccolta vicino. Questa metodologia, però, ha dei costi operativi elevati ed è caratterizzata da complessità logica, il che non le permette di svolgere un ruolo significativo nel lungo termine per la movimentazione di grandi volumi di CO₂. Infatti, a differenza delle pipelines, per realizzare un flusso continuo di anidride carbonica via terra, c'è bisogno di un gran numero di veicoli dedicati e di un preciso coordinamento tra di essi. Inoltre, ci

sarebbe bisogno di stocaggi intermedi (con costi aggiuntivi) e tutto dipenderebbe anche dalle infrastrutture di trasporto pubblico.

Per questa modalità di trasporto esistono diverse normative nazionali e internazionali a cui fare riferimento, che trattano in generale la movimentazione di sostanze pericolose:

- L'ADGC (Australian Dangerous Goods Code) specifica i requisiti di imballaggio per l'anidride carbonica, classificata come gas non tossico e non infiammabile.
- L'ASME Boiler and Pressure Vessel Code, già visto precedentemente, serve anche come guida per la realizzazione di cisterne criogeniche.

2.4 Stoccaggio della CO₂

Il principio fondamentale dello stoccaggio consiste nell'iniezione della CO₂ in uno stato supercritico a profondità maggiori di 800-1000 metri, dove occupa gli spazi porosi all'interno di una roccia serbatoio, spostando i fluidi preesistenti. [22]

Le formazioni geologiche idonee per lo stoccaggio sono tre: giacimenti di idrocarburi esauriti, acquiferi salini profondi, giacimenti di carbone non sfruttabili. Lo stoccaggio in strutture geologiche sotterranee è ampiamente approfondito nel lavoro di tesi "Riconversione di una piattaforma petrolifera in dismissione e del relativo reservoir per l'installazione di un impianto di stoccaggio di anidride carbonica. Progettazione preliminare" di Francesco Pertuso. [59]

La scelta del sito di stoccaggio si basa su un compromesso strategico (tra sicurezza e permanenza, capacità geologica, costi, vicinanza alle fonti), ma con una selezione e una gestione adeguata del sito, è probabile che oltre il 99% della CO₂ stoccatà rimanga confinata per più di 1000 anni. [23]

2.4.1 Giacimenti di idrocarburi esauriti

L'opzione più studiata per lo stoccaggio di CO₂ comprende i giacimenti di petrolio e gas naturale che sono stati completamente o parzialmente sfruttati, perché la loro capacità di trattenere idrocarburi per milioni di anni è la prova diretta dell'integrità del sistema di confinamento.

Per questo tipo di giacimenti il meccanismo di intrappolamento è di tipo strutturale: l'anidride carbonica iniettata in profondità è meno densa dei fluidi circostanti, per cui risale fino a essere bloccata dalla roccia di copertura, detta "caprock".

La capacità di stoccaggio globale in giacimenti di idrocarburi esauriti arriva fino a 900Gt di CO₂. [24]

2.4.2 Acquiferi salini

Gli acquiferi salini profondi sono formazioni di roccia porosa, sature di acqua ad alta concentrazione salina, inadatta sia per il consumo umano che per l'agricoltura. Queste formazioni sono geograficamente più diffuse dei giacimenti di idrocarburi e hanno un potenziale di stoccaggio più elevato, ma la loro conoscenza geologica è limitata e, quindi, sono necessari grandi investimenti per le campagne di caratterizzazione atte a confermarne l'idoneità.

L'intrappolamento dell'anidride carbonica, in questo caso, sfrutta diversi meccanismi che aumentano la sicurezza nel tempo:

- Intrappolamento strutturale: è il principio comune a tutti i tipi di stoccaggio per cui la CO₂ viene confinata al di sotto di una roccia di copertura impermeabile.
- Intrappolamento residuo: mentre l'anidride carbonica si muove attraverso la roccia serbatoio, una parte di essa rimane intrappolata negli spazi porosi sotto forma di goccioline immobili riducendone la mobilità complessiva.

- Intrappolamento per dissoluzione: con il passare del tempo, la CO₂ si dissolve lentamente nell'acqua salina e, man mano che ciò avviene, la salamoia arricchita di anidride carbonica diventa sempre più densa e, quindi, sprofonda sempre di più fino ad eliminare la spinta al galleggiamento e ad aumentare la stabilità dello stoccaggio.
- Intrappolamento minerale: dopo migliaia di anni, la CO₂ disiolta reagisce chimicamente con i minerali della roccia per formare nuovi minerali solidi e stabili, fissando l'anidride carbonica in forma solida.

La capacità di stoccaggio globale in acquiferi marini è di almeno 1000Gt di CO₂. [15]

I giacimenti esauriti offrono una maggiore certezza geologica e minori costi di caratterizzazione, ma per raggiungere la capacità di stoccaggio richiesta dagli scenari climatici, è indispensabile il passaggio agli acquiferi marini.

2.4.3 Giacimenti di carbone non sfruttabili

Questo tipo di stoccaggio si differenzia dai precedenti per il meccanismo di funzionamento basato sull'adsorbimento: le molecole di CO₂ aderiscono alla superficie del carbone, causando lo spostamento delle molecole di metano che c'erano precedentemente. Quest'ultimo può essere recuperato e riutilizzato come fonte

energetica, offrendo un secondo vantaggio oltre lo stoccaggio di anidride carbonica.

L'ECBM (Enhanced Coal-Bed Methane) non è molto diffuso e applicabile su larga scala per grandi volumi di CO₂ a causa della bassa permeabilità di molti giacimenti di carbone.

2.4.4 Carbonatazione minerale

La carbonatazione minerale è un processo chimico che replica un processo naturale che sottrae CO₂ dall'atmosfera fissandola in modo permanente nelle rocce: l'anidride carbonica reagisce con ossidi metallici, presenti in rocce ricche di silicati, per formare carbonati solidi e geologicamente stabili.

Questa tecnologia di stoccaggio può essere implementata sia in-situ che ex-situ:

- La carbonatazione in-situ consiste nell'iniezione di CO₂ pura direttamente nelle formazioni geologiche idonee, come formazioni ricche di silicati e acquiferi salini alcalini. Una volta iniettata, l'anidride carbonica reagisce con i minerali circostanti e si trasforma in carbonato solido.
- La carbonatazione ex-situ avviene in impianti industriali appositi, dove la CO₂ viene fatta reagire con materiali rocciosi estratti e lavorati.

La carbonatazione implementata ex-situ richiede un notevole dispendio energetico per l'estrazione e il trasporto delle materie prime

e per l'energia richiesta per mantenere le condizioni di pressione e temperatura ottimali. Quella implementata in-situ, invece, è molto promettente grazie all'abbondanza delle materie prime e alla permanenza dello stoccaggio.

2.4.5 BECCS

La tecnologia di Bio-Energy with Carbon Capture and Storage è un processo che unisce la produzione di energia da biomasse con la cattura e lo stoccaggio del carbonio: la biomassa viene bruciata per generare elettricità e/o calore e la CO₂ prodotta da questa combustione viene catturata per essere stoccatata.

Il processo BECCS inizia con l'approvvigionamento della biomassa, le cui fonti possono essere:

- Colture energetiche dedicate;
- Residui agricoli, come la paglia;
- Residui forestali, come i rami e le cortecce;
- Rifiuti organici di varia origine, come i rifiuti solidi urbani o i fanghi di depurazione.

Dopo essere stata raccolta, la biomassa può essere convertita in energia seguendo diversi processi tecnologici:

- Combustione: la biomassa viene bruciata in una caldaia per produrre vapore, che serve ad azionare una turbina per la generazione di elettricità e/o calore; dai fumi di combustione viene catturata l'anidride carbonica.

- Fermentazione: la biomassa, in questo caso ricca di zuccheri o amidi, viene utilizzata per la produzione di biocarburanti; un sottoprodotto di questo processo risulta essere un flusso quasi puro di anidride carbonica, che ne rende la cattura particolarmente efficiente.
- Processi termochimici avanzati: la biomassa viene convertita in prodotti energetici intermedi grazie al riscaldamento in assenza (o in carenza) di ossigeno. In particolare, con un processo di gassificazione si ottiene il syngas, mentre con un processo di pirolisi si ottiene, oltre al syngas e al bio-olio, il biochar. Questo è un composto solido ricco di carbonio che può essere incorporato al suolo per sequestrare carbonio per centinaia o migliaia di anni.

Dall'analisi della catena del valore della BECCS, si può notare che la sua natura è geograficamente e logisticamente frammentata, in quanto una fonte di biomassa sostenibile, un impianto di conversione energetica e un sito di stoccaggio idoneo sono raramente co-localizzati. Infatti, per la realizzazione di un intero processo BECCS, c'è bisogno di reti per il trasporto della biomassa dalla fonte all'impianto e della CO₂ dall'impianto al sito di stoccaggio.

2.5 Pericoli connessi alla CO₂

L'anidride carbonica, con una concentrazione di circa 0,04% in volume, è naturalmente presente nell'aria che respiriamo, ma in concentrazioni maggiori a questa diventa dannosa per la salute umana. I pericoli principali sono asfissia e tossicità; il rischio maggiore consiste nella sua capacità, ad alte concentrazioni, di sostituire l'ossigeno e agire direttamente sul sistema nervoso e respiratorio. In questo caso la vittima perderebbe mobilità e conoscenza molto rapidamente senza accorgersi dei primi sintomi dell'asfissia e, al diminuire della concentrazione di ossigeno, passerebbe dall'avere difficoltà respiratorie e motorie fino alla morte.

Negli Allegati (Allegato 14) è presente una scheda di dati di sicurezza (SDS) per l'anidride carbonica, dalla quale si legge che questo gas è conforme allo status "REACH" (Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals), il che significa che, se è utilizzato in modo appropriato, presenta un rischio minimo e la sua sicurezza è ben documentata. In particolare, per il regolamento CLP (Classification, Labelling and Packaging), l'anidride carbonica non è classificata per pericoli alla salute umana o all'ambiente, ma soltanto per i suoi pericoli di natura fisica. Si vede, infatti, che nella sezione di "Identificazione dei pericoli", la sostanza è classificata come "Gas sotto pressione: Gas liquefatto". Ciò vuol dire che la categoria specifica di pericolo dipende dallo stato fisico in cui si trova la CO₂; ad esempio, se si trova in fase liquida, la frase di pericolo avverte su ustioni e lesioni

criogeniche, mentre il consiglio di prudenza esorta all'utilizzo di guanti termici e schermo facciale o protezione per gli occhi.

Sebbene la classificazione CLP si limiti al solo pericolo fisico legato alla pressione, nelle sezioni "Altri pericoli" e "Misure di primo soccorso" emerge come l'anidride carbonica, in alte concentrazioni, risulti asfissiante. Questa sostanza non è, però, classificata come tossica, in quanto non rientra in nessuna delle classi di pericolo definite dal regolamento CLP: la tossicità della CO₂ non è intrinseca a livello molecolare, ma dipende da un sovraccarico quantitativo che rompe l'equilibrio dei sistemi dell'organismo abituati a gestire piccole concentrazioni di anidride carbonica.

Oltre che ai rischi diretti per la salute umana, è importante considerare anche la vulnerabilità degli asset che, nel campo della CCS, possono essere geologici (serbatoi e rocce di copertura), ingegneristici (pozzi) o di trasporto (pipeline e impianti).

2.5.1 Criteri di vulnerabilità per le persone – CO₂ gassosa

L'impatto della CO₂ sull'organismo umano è determinato dalla sua concentrazione nell'aria, dal tempo di esposizione e dalla contemporanea disponibilità di ossigeno nell'ambiente. La vulnerabilità di una persona dipende alle sue condizioni fisiologiche e patologiche, che determinano la rapidità con cui il suo organismo raggiunge una soglia di sofferenza a causa dell'elevata concentrazione della CO₂ e della carenza di ossigeno. Queste due condizioni, ovvero un'eccessiva

concentrazione di anidride carbonica nel sangue e una carenza di ossigeno, sono dette, rispettivamente, "ipercapnia" e "ipossia".

Enti internazionali come l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) hanno stabilito degli standard per i valori limite di esposizione alla CO₂ negli ambienti di lavoro dove la potenziale esposizione alla CO₂ è più probabile, che sono stati poi recepiti da normative nazionali e comunitarie.

Questi valori limite sono:

- TLV-TWA (Threshold Limit Value – Time-Weighted Average): definisce la concentrazione media nel tempo per una settimana lavorativa di 8h al giorno e 40h settimanali alla quale si può essere esposti (compreso il personale addetto) senza riscontrare effetti nocivi.
- TLV-STEL (Threshold Limit Value – Short-Time Exposure Limit): indica la concentrazione media nel tempo alla quale il personale non dovrebbe essere esposto per più di 15 minuti. Tale esposizione non deve essere ripetuta più di 4 volte al giorno con un intervallo di almeno 1h tra le esposizioni successive.
- IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health): definisce la massima concentrazione nell'ambiente che un individuo maschio sano può sopportare per 30 minuti mantenendo la capacità di fuggire, cioè senza morire o subire danni organici irreversibili.

Valore limite	ppm	% vol
TLV-TWA	5000	0,5
TLV-STEL	30000	3
IDLH	40000	4

Tabella 2. Valori limite di esposizione alla CO₂ [25] [26]

L'anidride carbonica, essendo più densa dell'aria, in ambienti non ventilati si accumula in basso e sposta l'aria stessa, riducendo la concentrazione di ossigeno. Un'atmosfera è definita ipossica, ovvero carente di ossigeno, quando la sua percentuale in volume nell'aria è minore del 19,5%.

I danni dovuti alla sola carenza di ossigeno sono riportati in Tabella 3.

Concentrazione O₂ (% vol)	Effetti sulla salute
16-19,5%	Difficoltà respiratorie e perdita di controllo della motricità
12-16%	Affaticamento e perdita delle capacità valutative
8-12%	Perdita di coscienza, nausea e cianosi
6-8%	Al 100% fatale per una permanenza di 8 minuti
4-6%	Coma in pochi secondi, morte

Tabella 3. Effetti dell'ipossia sulla salute umana [27]

A prescindere dalla concentrazione di ossigeno, l'inalazione di anidride carbonica è pericolosa, in quanto aumenta la sua pressione parziale nel sangue con effetti diretti sul sistema nervoso e sulla regolazione del respiro, causandone un'accelerazione. Questo meccanismo porta ai primi sintomi dell'asfissia, come mal di testa e vertigini.

In particolare, questa situazione diventa più grave quando l'ambiente è ricco di CO₂ e carente di O₂: l'iperkapnia stimola la persona a respirare più velocemente dell'aria povera di ossigeno, accelerando, quindi, l'intossicazione e la perdita di coscienza dovute all'ipossia.

In Tabella 4 è possibile leggere gli effetti combinati della presenza di CO₂ e della carenza di O₂ in base al tempo di esposizione.

Concentrazione CO₂ (% vol)	Concentrazione O₂ (% vol)	Tempo di esposizione	Effetti sulla salute
0,5%	21%	8 ore	Nessun effetto nocivo
1-1,5%	21%	Diverse ore	Effetti lievi sul metabolismo
3%	21%	15 minuti	Respiro sensibilmente accelerato, leggero mal di testa e riduzione

Concentrazione CO₂ (% vol)	Concentrazione O₂ (% vol)	Tempo di esposizione	Effetti sulla salute
			della concentrazione
4%	19,8%	>30 minuti	Forte mal di testa, vertigini, aumento della pressione e della frequenza cardiaca
5-7%	19-18%	5-10 minuti	Cefalee, disturbi della respirazione e malessere
8-10%	17-16%	1-5 minuti	Convulsioni, svenimento, arresto respiratorio e morte
>10%	<16%	<1 minuto	Perdita di coscienza quasi istantanea, morte rapida se non si verifica un

Concentrazione CO₂ (% vol)	Concentrazione O₂ (% vol)	Tempo di esposizione	Effetti sulla salute
			intervento repentino

Tabella 4. Effetti combinati di ipercapnia e ipossia [25] [26] [27] [28]

2.5.2 Criteri di vulnerabilità per le persone – CO₂ liquida

Quando l'anidride carbonica è allo stato liquido, oltre ai pericoli di asfissia e tossicità dovuti al gas che essa sprigiona, si aggiunge anche il rischio criogenico. Quindi, la vulnerabilità della persona non dipende più soltanto dalle sue condizioni fisiologiche, ma soprattutto dalla sua vicinanza ad una fonte di CO₂ liquida e dalla mancanza di protezioni adeguate.

L'anidride carbonica si trova allo stato liquido solo sotto pressione, ma a pressione atmosferica in parte si trasforma istantaneamente in gas e in parte espande formando ghiaccio secco, un solido bianco simile a neve, che in queste condizioni di pressione ha una temperatura di -79°C. [28]

Nelle applicazioni CCS la CO₂ viene trasportata in fase supercritica; perciò, un rilascio e la conseguente depressurizzazione del fluido generano un getto bifasico freddo.

Il contatto diretto degli occhi o della pelle con la CO₂ liquida o solida potrebbe provocare gravi ustioni da freddo e congelamento. Il freddo congela l'acqua contenuta nelle cellule dei tessuti causando la

formazione di cristalli di ghiaccio che distruggono la struttura cellulare; conseguentemente, il flusso sanguigno si interrompe portando alla morte del tessuto interessato.

I sintomi dell'ustione da freddo sono simili a quelli dell'ustione da calore: si prova dolore intenso nella fase iniziale, per poi passare a intorpidimento e perdita di sensibilità nell'area colpita. La pelle assume un colore bianco-giallastro e, nei casi più gravi, si possono formare delle vesciche e la zona colpita può diventare nera a causa della necrosi del tessuto. Se queste ustioni ricoprono ampie parti del corpo, il pericolo di morte aumenta.

È importante accennare all'effetto Joule-Thomson, per il quale la rapida riduzione di pressione a cui è sottoposta la CO₂ in caso di rilascio, produce un intenso raffreddamento dell'area circostante. Una volta in atmosfera, il pennacchio generato in conseguenza al rilascio si riscalda assorbendo calore dall'aria circostante e da fonti esterne e, allontanandosi dal punto di rilascio, le temperature dentro e vicino ad esso iniziano ad aumentare. Le particelle solide vengono trasportate fino alla loro sublimazione o fino a quando cadono a terra; in quest'ultimo caso, il ghiaccio secco formatosi può impiegare ore per sublimare completamente, diventando una fonte secondaria e prolungata di pericolo per le persone.

Per la valutazione del rischio criogenico bisogna tener conto non solo degli effetti diretti, ma anche della compromissione delle capacità di reazione. Enti come il CCOHS (Canadian Centre of Occupational Health and Safety) hanno condotto degli studi sulla sicurezza in ambienti

freddi, stabilendo delle correlazioni tra temperatura e performance della persona. Per una temperatura poco inferiore a quella ambiente (15-16°C) la destrezza manuale è già ridotta al punto di non riuscire a compiere azioni semplici; per temperature tra i 6 e gli 8°C si verifica, invece, una perdita significativa della sensibilità tattile. [64]

Per una persona che si trova in un ambiente freddo, a causa di questo stato di menomazione, aumenta il rischio di esposizione prolungata che può portare ad altre conseguenze più gravi.

A temperature molto basse, come quelle vicino al punto di rilascio della CO₂, i rischi principali per la salute umana sono l'ipotermia e il congelamento. Le linee guida dell'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) spiegano che l'ipotermia si verifica quando la temperatura corporea interna scende al di sotto dei 35°C e la persona interessata è esposta in modo prolungato alle basse temperature. [29]

L'ipotermia segue diversi stadi al diminuire della temperatura corporea:

- Sintomi lievi: brividi e confusione.
- Sintomi moderati: perdita di coordinazione e capacità di afferrare gli oggetti, confusione e disorientamento.
- Sintomi gravi: perdita della capacità di camminare o stare in piedi, dilatazione delle pupille, rallentamento della respirazione. Inoltre, possono verificarsi perdita di coscienza e morte se la persona non riceve aiuto immediato. [29]

Il congelamento dei tessuti corporei (frostbite) si verifica generalmente nelle estremità del corpo, come le dita e le orecchie. Enti come l'OSHA e il NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)

avvertono che il rischio di congelamento diventa significativo quando la temperatura dell'aria scende al di sotto dei -16°C e che il vento gioca un ruolo importante accelerando la perdita di calore e aumentando il rischio. I sintomi del frostbite sono:

- Intorpidimento nella parte del corpo colpita;
- Formicolio o sensazione di puntura;
- Pelle bluastra o pallida;
- Formazione di vesciche nella zona interessata.

La vulnerabilità alle ustioni da freddo e al rischio criogenico è uguale per tutte le persone, ma quelle più a rischio sono gli operatori che lavorano con la CO₂ liquida; inoltre, anche il ghiaccio che si può formare sui tubi o sulle valvole delle attrezzature può produrre un rischio per le persone.

Il NIOSH suggerisce l'utilizzo di DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) come tute, giubbotti, stivali e guanti isolanti non troppo aderenti per evitare la sudorazione durante i lavori pesanti perché, una volta finito il lavoro, il sudore evapora e contribuisce al raffreddamento del corpo.

[65]

Tuttavia, nel contesto di un rilascio di CO₂, i rischi criogenici devono essere analizzati simultaneamente al rischio tossicologico. È importante ricordare che l'anidride carbonica liquida è caratterizzata da un elevato rapporto di espansione: quando fuoriesce da un contenitore si espande rapidamente generando circa 550 litri di gas a temperatura e pressione ambiente per un litro di liquido. Se ci si trova

in un ambiente chiuso, anche una piccola perdita può saturare l'ambiente. [28]

Nelle immediate vicinanze del rilascio sia le basse temperature che le alte concentrazioni di CO₂ sono letali; allontanandosi dal punto di origine l'aria si riscalda ma la concentrazione di anidride carbonica è ancora tossica.

Perciò, quando si studia un evento come un rilascio incidentale di anidride carbonica, la definizione delle aree di danno impattate da questo incidente, è basata sul pericolo dominante della tossicità della CO₂.

2.5.3 Criteri di vulnerabilità per gli asset geologici

La vulnerabilità dello stoccaggio viene valutata considerando l'integrità geomeccanica, quella geochimica e la capacità di tenuta. Quando la CO₂ viene immessa nel serbatoio, la sua pressione di iniezione fa aumentare quella dei fluidi nei pori della roccia, esercitando una spinta verso la roccia di copertura; se questa pressione supera la resistenza meccanica della roccia, si può creare una frattura aprendo una via di fuga diretta. Inoltre, l'aumento di pressione può anche ridurre l'attrito lungo i piani di faglia causando sismicità a livello locale. [30]

Una volta che l'anidride carbonica viene iniettata nel serbatoio, si dissolve, in parte, nell'acqua salina presente in esso, formando acido carbonico: si crea un ambiente leggermente acido che può reagire con i minerali che formano la roccia di copertura. Se questi minerali sono

attivi, nel corso del tempo (decenni o secoli) il processo di dissoluzione può alterare la microstruttura della roccia, rendendola non più adatta al contenimento.

La capacità di tenuta riguarda l'altezza di una colonna di CO₂ che può essere trattenuta dalla roccia di copertura e dipende dalla pressione di galleggiamento che caratterizza l'anidride carbonica supercritica. Questa, infatti, è meno densa dell'acqua salina che si trova sul fondo dei giacimenti e perciò tende a risalire per galleggiamento; questa spinta genera una pressione alla base della copertura che è contrastata dalla pressione capillare nei pori della roccia. [31]

2.5.4 Criteri di vulnerabilità per gli asset ingegneristici

L'integrità dei pozzi (sia quelli di iniezione che quelli preesistenti) è una sfida chiave per la sicurezza dello stoccaggio, soprattutto per quanto riguarda i legacy wells, ovvero pozzi perforati in passato per altri scopi, per cui è importante indagare la loro adeguatezza per il contenimento della CO₂.

La vulnerabilità dei pozzi risiede nel potenziale degrado dei loro materiali costruttivi, quali l'acciaio del casing e il cemento tra il rivestimento stesso e la roccia. La CO₂ umida può generare un ambiente acido che attacca chimicamente sia l'acciaio che il cemento: il primo è soggetto a corrosione, per cui si assottiglia lo spessore e la resistenza strutturale risulta compromessa; il cemento, invece, è soggetto alla carbonatazione, che causa l'alterazione della struttura

arrivando fino alla formazione di microfratture e percorsi di perdita lungo l'interfaccia cemento-roccia. [32]

2.5.5 Criteri di vulnerabilità per gli asset di trasporto

Il trasporto della CO₂ dal punto di cattura al sito di stoccaggio avviene maggiormente attraverso pipelines in acciaio, soggette a rischi come l'infragilimento criogenico, la corrosione interna e l'erosione.

In caso di perdita o di rottura accidentale, l'anidride carbonica trasportata allo stato supercritico, subisce una depressurizzazione rapida e, per l'effetto Joule-Thomson, un crollo di temperatura fino a -79°C. Queste temperature molto basse sono critiche per gli acciai al carbonio, che perdono la propria duttilità e diventano fragili. La DBTT (Ductile-to-Brittle Transition Temperature) è la temperatura critica in corrispondenza della quale si ha la transizione duttile-fragile del materiale: se la temperatura della parete della pipeline scende al di sotto della DBTT dell'acciaio utilizzato, la sua capacità di resistere alla propagazione di una cricca crolla. Perciò, una cricca si può propagare in modo incontrollato per chilometri, causando un rilascio catastrofico.

[33]

Il criterio di vulnerabilità in questo ambito è costituito dalla tenacità a bassa temperatura del materiale, per cui alcune normative tecniche come la DNV_RP_F104 per il design e il funzionamento delle pipelines, impongono l'uso di acciai specifici, caratterizzati da una resilienza certificata a temperature criogeniche.

L'anidride carbonica trasportata nei processi di CCS può contenere delle impurità, la cui concentrazione dipende dalla fonte di emissione e dalla tecnologia di cattura utilizzata. Le impurità più comuni e critiche per l'integrità delle pipelines sono l'acqua, gli ossidi di zolfo e di azoto, l'acido solfidrico e l'ossigeno: se presenti, anche in poche parti per milione, oltre ad alterare le proprietà chimico-fisiche della CO₂, ne modificano anche l'aggressività nei confronti dell'acciaio al carbonio, materiale maggiormente utilizzato in questo campo. L'acqua, in particolare, è il componente più pericoloso, in quanto la sua presenza in fase libera genera una corrosione che porta al degrado elettrochimico della parete interna del tubo, che può essere accelerato dalle impurità acide. [34] Perciò, la prima misura di mitigazione che si attua consiste nel disidratare il flusso trasportato per mantenere il contenuto di acqua al di sotto del suo limite di solubilità, che assume valori minori al diminuire di pressione e temperatura.

La presenza simultanea di ossigeno (O₂), acido solfidrico (H₂S), anidride solforosa (SO₂) e diossido di azoto (NO₂) abbassa notevolmente la quantità di acqua necessaria per innescare la corrosione e aumenta la velocità di questo processo. [35]

Normative tecniche come la DNV-RP-J202 suggeriscono di mantenere il contenuto di acqua al di sotto del 50% del limite di solubilità calcolato per le condizioni più severe e di utilizzare leghe resistenti alla corrosione (soluzioni più costose) nel caso in cui con l'acciaio al carbonio (soluzione economicamente prevalente) non si riesca a mantenere un flusso rigorosamente secco. [36]

L'erosione, infine, è la rimozione meccanica di materiale causata dall'impatto di particelle solide quali sabbia, prodotti di corrosione o ghiaccio secco. Questo fenomeno è molto più pericoloso se avviene simultaneamente alla corrosione: l'impatto meccanico delle particelle solide rimuove costantemente i film di prodotti di corrosione esponendo costantemente metallo fresco e attivo all'ambiente corrosivo, accelerando la perdita di materiale. L'erosione-corrosione è influenzata soprattutto dalla velocità del flusso, di cui esiste un valore critico al di sopra del quale gli inibitori di corrosione sono inefficaci e si passa a un regime di degrado. Anche la geometria della pipeline è importante: nei punti di discontinuità il flusso accelera e cambia direzione causando un impatto diretto delle particelle sulla parete del tubo. [37]

I rischi di fragilimento criogenico, corrosione interna ed erosione sono interconnessi: ad esempio, un difetto di corrosione può agire come innesco per una frattura oppure un evento di depressurizzazione, oltre a causare fragilimento, può anche portare alla condensazione dell'acqua, innescando un attacco corrosivo.

Il documento più completo in questo contesto è sicuramente la normativa tecnica DNV-RP-J202 "Design and Operation of CO₂ Pipelines", che costituisce un supplemento alle normative DNV-OS-FI01 per i casi offshore e ASME B31.4 per i casi onshore. Le raccomandazioni chiave consistono in:

- Controllo della corrosione interna tramite disidratazione del flusso, utilizzo di un fattore di sicurezza sulla presenza dell'acqua e utilizzo di analizzatori di umidità.
- Gestione dell'integrità operativa tramite un sistema di gestione dell'integrità (IMS, Integrated Management System) e un'ispezione di base con pig intelligente (ILI, In-Line Inspection) prima della messa in servizio.

2.6 CO₂ vs GNL

Sia la CO₂ che il GNL (Gas Naturale Liquefatto) occupano un ruolo importante per la transizione energetica attuale: l'anidride carbonica è fondamentale nella filiera CCS per i settori difficili da decarbonizzare, mentre il gas naturale occupa un ruolo di "ponte" verso un futuro a basse emissioni di gas serra, rappresentando un'opzione più pulita per la produzione di energia. Sebbene questi due gas abbiano dei ruoli diversi nella lotta al cambiamento climatico, sono in realtà "collegati" da parallelismi tecnologici, soprattutto per quanto riguarda la gestione dei fluidi in condizioni termodinamiche non convenzionali. Inoltre, la lunga esperienza con il GNL è fondamentale per l'accelerazione dello sviluppo della tecnologia CCS.

Per comprendere questi concetti, è importante osservare le proprietà di entrambi i gas, riportate nella tabella sottostante, per cui le informazioni sul gas naturale sono state estratte dalle fonti [66] e [67].

Proprietà	CO ₂	GNL
Stato di trasporto e stoccaggio	Fluido supercritico	Liquido criogenico
Temperatura	-50°C via nave 12-43°C via gasdotto	-162°C
Pressione	7 bar via nave 80-150 bar via gasdotto	Pressione atmosferica

Proprietà	CO₂	GNL
Densità rispetto all'aria	Circa 1,5 volte più pesante dell'aria	Più leggero dell'aria
Punto critico	31,1 °C 73,8 bar	-82,6 °C 46 bar
Punto triplo	-56,6°C 5,18 bar	Non rilevante operativamente
Infiammabilità	Non infiammabile	Estremamente infiammabile
Tossicità	Non tossico	Non tossico
Potenziale corrosivo	Elevato in presenza di acqua	Nullo
Implicazione tecnologica	Alta pressione, controllo della corrosione e prevenzione alla solidificazione	Isolamento criogenico e materiali speciali

Tabella 5. Confronto proprietà CO₂ e GNL

Il gas naturale è solitamente trasportato allo stato gassoso via gasdotti e la sua liquefazione è un'alternativa per coprire distanze eccessivamente lunghe per trasporti via nave e via terra. L'anidride carbonica, invece, viene trasportata allo stato supercritico nelle pipeline e come liquido refrigerato via nave e via terra.

Quindi, mentre per il GNL le sfide consistono nell'isolamento termico e nella sicurezza del rifornimento, per la CO₂ si hanno sfide diverse a

seconda del trasporto: per un trasporto tramite pipelines si devono prevenire la corrosione e la propagazione della frattura, per un trasporto tramite nave e via terra si deve prevenire la solidificazione.

La filiera del GNL è caratterizzata da uno stato maturo, il cui sviluppo è ormai guidato dalla sola ottimizzazione dei costi, mentre la filiera della CO₂ è in via di sviluppo e la sua evoluzione è guidata dalla gestione del rischio, per evitare che ci siano perdite. In caso di rottura di una pipeline, infatti, la velocità di depressurizzazione dell'anidride carbonica è maggiore rispetto a quella del gas naturale: nel primo caso si può avere una propagazione della frattura a lunghe distanze, mentre nel secondo caso la frattura può anche non propagarsi. Inoltre, in caso di depressurizzazione la CO₂ si raffredda a temperature molto basse causando diversi problemi (paragrafo 2.5.5).

Il pericolo predominante del gas naturale, invece, è la sua infiammabilità: questo, se rilasciato, evapora velocemente e forma una miscela con l'aria che porta alla creazione di una nube infiammabile ed esplosiva.

Per quanto riguarda i rischi tecnologici, per entrambi i gas è importante il rischio di fragilimento dei materiali a causa delle temperature criogeniche, ma per l'anidride carbonica sono significativi anche i rischi di corrosione e solidificazione.

Infine, si può dire che la filiera del trasporto della CO₂ e quella del trasporto del GNL sono caratterizzate da similitudini ma, soprattutto, da differenze:

- Entrambe richiedono una gestione di gas liquefatti, per cui c'è bisogno di infrastrutture specifiche, tra cui anche navi e serbatoi.
- I rischi che le caratterizzano sono opposti: da un lato c'è il rischio di incendio o esplosione, mentre dall'altro c'è il rischio di un rilascio massivo di gas asfissiante.

Tuttavia, l'esperienza nel trasporto di GNL risulta importante per le competenze acquisite nel campo della progettazione e della gestione di impianti complessi per un gas che si trova in condizioni termodinamiche criogeniche. Il campo della CCS, però, richiede delle competenze specifiche sia per la corrosione dei materiali che per i rischi su scale temporali più lunghe.

3. Caso studio

Il progetto costituente il caso studio di questo lavoro di tesi è un impianto a tecnologia BECCS, la quale si basa sull'interazione tra il ciclo naturale del carbonio e l'intervento tecnologico.

La biomassa, che può essere utilizzata come combustibile o materia prima in impianti industriali per la generazione di energia o la produzione di biocarburanti, assorbe CO₂ dall'atmosfera durante il suo ciclo di vita. Un tale processo industriale può essere definito "a emissioni nette di anidride carbonica nulle".

La particolarità della tecnologia BECCS consiste nel catturare la CO₂ emessa da impianti che utilizzano biomassa, prima che questa venga rilasciata in atmosfera, per stoccarla in modo permanente in formazioni geologiche sotterranee. Se questo processo viene gestito correttamente si riescono a generare emissioni negative, rimuovendo in modo netto la CO₂ dall'atmosfera.

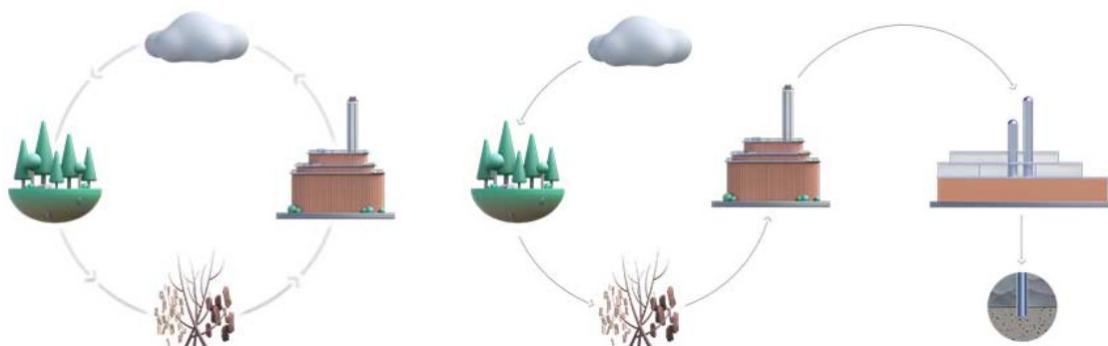


Figura 10. Impianto con emissioni nette di anidride carbonica pari a zero (sx) e impianto che genera emissioni negative (dx) [38]

La BECCS, quindi, presenta un duplice effetto utile: fornisce energia rinnovabile e riduce la concentrazione di anidride carbonica già presente in atmosfera.

Negli scenari che mirano a limitare il riscaldamento globale, la BECCS rappresenta una delle soluzioni principali, che dovrebbe portare alla rimozione di una quantità compresa tra 30 e 780 Gt di CO₂ nel periodo 2020–2100.

Sia l'IEA (International Energy Agency) che l'IPCC, però, evidenziano che lo sviluppo della BECCS risulta essere in ritardo rispetto alle traiettorie richieste, con una capacità di rimozione totale minore di 2 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno. [39] Questa discrepanza tra traiettorie e realtà è un esempio di criticità nelle strategie climatiche globali, che sottolinea il bisogno di investimenti e politiche di supporto per il raggiungimento degli obiettivi climatici.

Per tale motivo, l'Unione Europea ha sviluppato un quadro normativo per gestire la diffusione delle tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio e, per superare l'elevato costo iniziale e il rischio tecnologico di questi progetti, ha diffuso due strumenti di finanziamento:

- Innovation Fund: è un programma di finanziamento per le tecnologie innovative a basse emissioni di carbonio, alimentato dal sistema EU ETS (European Union Emission Trading System), che condivide il rischio di investimento con i promotori di progetti su scala commerciale e primi nel loro genere.
- Horizon Europe: è un programma che finanzia le fasi precedenti allo sviluppo tecnologico, come la ricerca di base e di

dimostrazione, e che, attraverso bandi specifici, studia gli impatti ambientali e socioeconomici delle tecnologie considerate.

3.1 Progetto BECCS

L'impianto per cui è stata eseguita la QRA per questo lavoro di tesi è uno dei progetti finanziati dall'Innovation Fund e costituisce una delle iniziative di rimozione dell'anidride carbonica più avanzate e significative in Europa.

Il progetto consiste nel trasformare una centrale di cogenerazione a biomassa esistente, situata in Svezia, in un impianto BECCS su larga scala, che ne costituirebbe uno dei primi al mondo nel suo genere.

La fonte di biomassa utilizzata dalla centrale è costituita da residui forestali di provenienza locale, mentre la tecnologia scelta per la cattura è la post-combustione, che utilizza il metodo del carbonato di potassio a caldo (HPC, Hot Potassium Carbonate).

Oltre alla cattura di anidride carbonica, un altro aspetto innovativo di questo progetto consiste nel recupero del calore generato durante la fase stessa di cattura per poi essere immesso nella rete di teleriscaldamento della città. In questo modo, l'intero processo diventa molto più efficiente dal punto di vista energetico rispetto ad un impianto di cattura convenzionale.

Dopo la sua cattura, l'anidride carbonica viene compressa e liquefatta per essere stoccati in serbatoi di accumulo e per essere poi trasportata, tramite navi apposite, ad un sito di stoccaggio permanente, situato nel mare del Nord a più di 800 metri sotto il fondale marino, dove si mineralizzerà nel tempo, diventando parte della roccia.

3.2 Descrizione del processo

Lo sviluppo dell'impianto BECCS ha l'obiettivo di catturare più di 800000 tonnellate all'anno di CO₂ emessa dalla centrale di cogenerazione a biomassa esistente.

I fumi della centrale di cogenerazione vengono convogliati nell'impianto di cattura dell'anidride carbonica, dove vengono compressi a circa 5 bar; il gas compresso viene immesso in un assorbitore che utilizza il carbonato di potassio caldo, il quale assorbe la maggior parte della CO₂ dal flusso dei fumi. Il gas immesso nella torre viene, inoltre, raffreddato tramite scambiatori di calore in controcorrente con i fumi trattati; questi ultimi vengono espansi e reimmessi nella ciminiera.

La CO₂ catturata viene separata dal solvente nello stripper per poi essere inviata nelle sale di compressione e liquefazione, prima di essere immagazzinata come liquido nei serbatoi di stoccaggio e poi su una nave apposita per il trasporto al sito permanente.

In Figura 11 è raffigurato uno schema che riassume questa descrizione, riportando le portate e le condizioni operative delle fasi principali del processo.

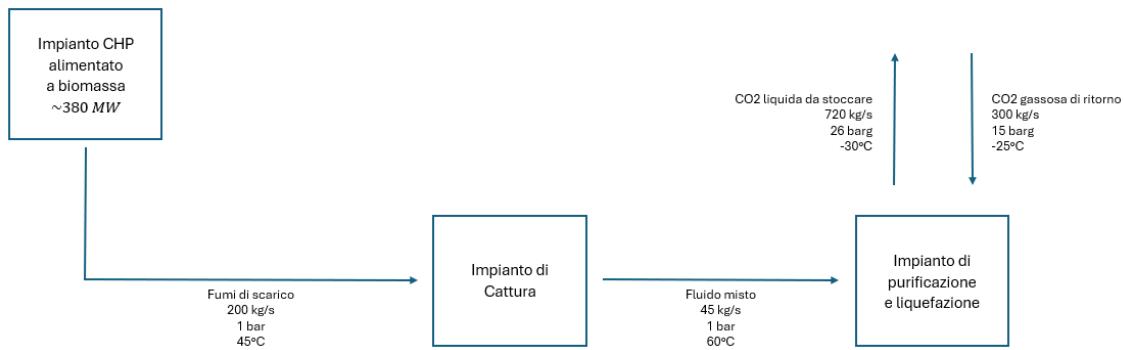


Figura 11. Schema a blocchi del processo

In Figura 12 è possibile osservare il layout generale dell'impianto (i cui componenti e le dimensioni di quelli più significativi per l'analisi sono elencati in Tabella 6), che verrà analizzato nel dettaglio nei prossimi paragrafi. Il progetto prevede una parte interna, formata dalle sale di cattura, compressione e liquefazione dell'anidride carbonica, e una parte esterna, dove si trovano i serbatoi di stoccaggio della CO₂ purificata e liquefatta e i bracci di carico. L'unità di liquefazione comprende una parte interna e una parte esterna.

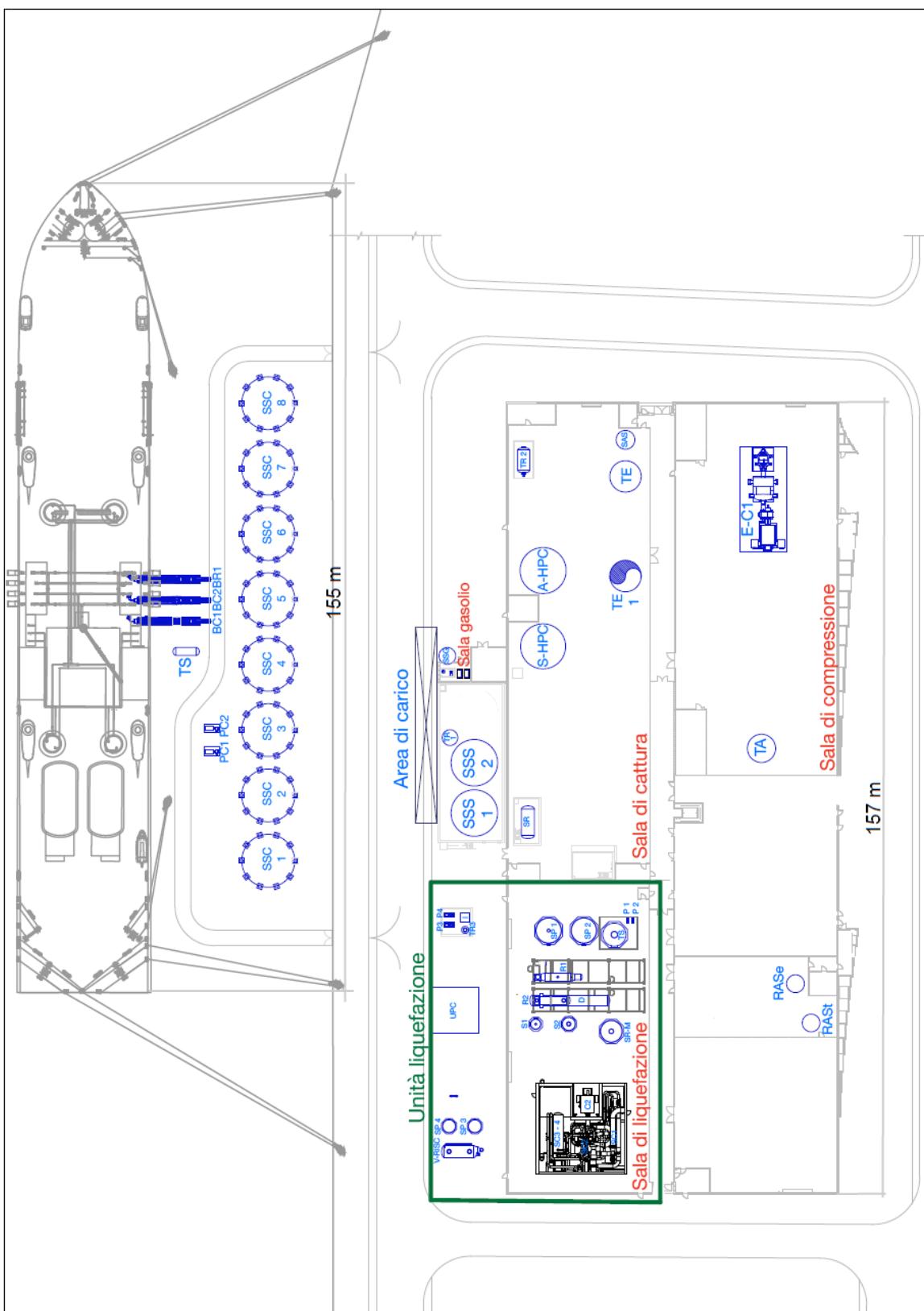


Figura 12. Layout generale dell'impianto

Sigla componente	Descrizione componente
A-HPC	Assorbitore HPC, 5000 m ³
BC-1	Braccio di Carico
BC-2	Braccio di Carico
BR-1	Braccio di Ritorno
C-1	Compressore gas di combustione
C-2	Compressore CO ₂
D	Densificatore CO ₂
E	Espansore gas di combustione
I	Idrolizzatore NO ₂
P-1	Pompa per il condensato di processo
P-2	Pompa per il condensato di processo
P-3	Pompa per il condensato di processo dell'idrolizzatore
P-4	Pompa per il condensato di processo dell'idrolizzatore
PC-1	Pompa di Carico
PC-2	Pompa di Carico
R-1	Refrigeratore per CO ₂ umida
R-2	Refrigeratore di bypass
RASt	Ricevitore Aria Strumentale
RASe	Ricevitore Aria di Servizio
S-1	Separatore della CO ₂ dall'HPC
S-2	Separatore di CO ₂ umida

Sigla componente	Descrizione componente
S-HPC	Stripper HPC, 5000 m ³
SAS	Serbatoio di Acqua di Servizio
SC-1	Scambiatore di Calore interstadio del compressore di CO ₂
SC-2	Scambiatore di Calore interstadio del compressore di CO ₂
SC-3	Scambiatore di Calore interstadio del compressore di CO ₂
SC-4	Scambiatore di Calore interstadio del compressore di CO ₂
SP-1	Serbatoio di Purificazione del gas di alimentazione
SP-2	Serbatoio di Purificazione del gas di alimentazione
SP-3	Serbatoio di Purificazione della CO ₂ liquida, 10 m ³
SP-4	Serbatoio di Purificazione della CO ₂ liquida, 10 m ³
SR	Serbatoio di Raccolta per gli scarichi del sistema CCS
SR-M	Serbatoio per la Rimozione del Mercurio
SSC-1	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSC-2	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³

Sigla componente	Descrizione componente
SSC-3	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSC-4	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSC-5	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSC-6	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSC-7	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSC-8	Serbatoio di Stoccaggio di CO ₂ , 2000 m ³
SSG	Serbatoio di Stoccaggio del Gasolio
SSS-1	Serbatoio di Stoccaggio del Solvente
SSS-2	Serbatoio di Stoccaggio del Solvente
TA	Tamburo di Aspirazione del compressore
TE	Tamburo di Espansione per la soluzione ricca di HPC
TE-1	Tamburo di Espansione per il condensato
TR-1	Tamburo di Raccolta per il solvente di scarto
TR-2	Tamburo di Raccolta per CO ₂ umida e calda
TR-3	Tamburo di Raccolta per il condensato dell'idrolizzatore
TS	Tamburo di Separazione del molo
UPC	Unità di Processo Criogenico
V-RISC	Vaporizzatore e riscaldatore del gas criogenico

Tabella 6. Descrizione dei componenti dell'impianto

Le tubature di processo presenti in questo impianto sono caratterizzate da diversi diametri; in particolare, si possono avere tubi da 150, 305, 460, 610 o 915 millimetri.

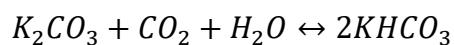
3.2.1 Compressione dei fumi

I fumi provenienti dall'impianto di cogenerazione sono disponibili con una portata di circa 200 kg/s di gas umido a pressione atmosferica e a circa 45°C; questi vengono convogliati al compressore (C-1) per essere compressi a circa 5 barg prima di passare a una sezione di recupero termico per il raffreddamento del gas alla temperatura appropriata per l'assorbimento della CO₂. L'eventuale condensa viene inviata al tamburo di raccolta apposito (TR-4), rappresentato in Figura 17.

Come mostrato in Figura 13, il recupero termico viene effettuato tramite gli scambiatori di calore a recupero (SCR-1/2) e i generatori di vapore (GV, GVRC); i fumi raffreddati vengono immessi nell'assorbitore (A-HPC) dal basso e vengono lavati in controcorrente con l'HPC (Figura 14). I fumi in uscita dall'assorbitore tornano agli scambiatori di calore per essere riscaldati e, successivamente, espansi.

3.2.2 Cattura della CO₂

Il solvente a base di carbonato di potassio caldo rimuove la CO₂ formando bicarbonato di potassio tramite la seguente reazione:



Gli elementi centrali del sistema di cattura della CO₂ sono l'assorbitore, il tamburo di espansione per la soluzione ricca di HPC (Figura 14) e lo stripper (Figura 15).

In particolare, l'assorbitore è diviso in tre sezioni:

- Assorbimento: i fumi, contenuti circa il 15% di CO₂, entrano dal fondo e, mentre risalgono, incontrano in controcorrente il flusso di soluzione povera di carbonato di potassio; così, l'anidride carbonica viene assorbita nella soluzione.
- Lavaggio: i fumi depurati incontrano la condensa di processo nella parte superiore dell'assorbitore per essere raffreddati.
- Circolazione: i fumi trattati escono dalla sommità dell'assorbitore con una concentrazione di CO₂ di circa il 2%.

Lo stripper, invece, è diviso in due sezioni:

- Strippaggio: il solvente ricco di HPC entra dall'alto e, scendendo, reagisce con la CO₂ in controcorrente; questo processo è integrato con vapore aggiuntivo proveniente dai tamburi di espansione ad alta e bassa pressione (AP TE-1, BP TE-1, Figura 15).
- Circolazione: il prodotto gassoso di CO₂ esce dalla sommità dello stripper a circa 60°C e 1 bar, con una purezza di circa il 99%, da dove viene inviato all'unità di liquefazione.

In Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 è possibile osservare i PFD (Process Flow Diagram) relativi ai processi di compressione dei fumi e cattura della CO₂ sopra descritti; in particolare, i fumi provenienti dall'impianto di cogenerazione sono denominati "gas di combustione".

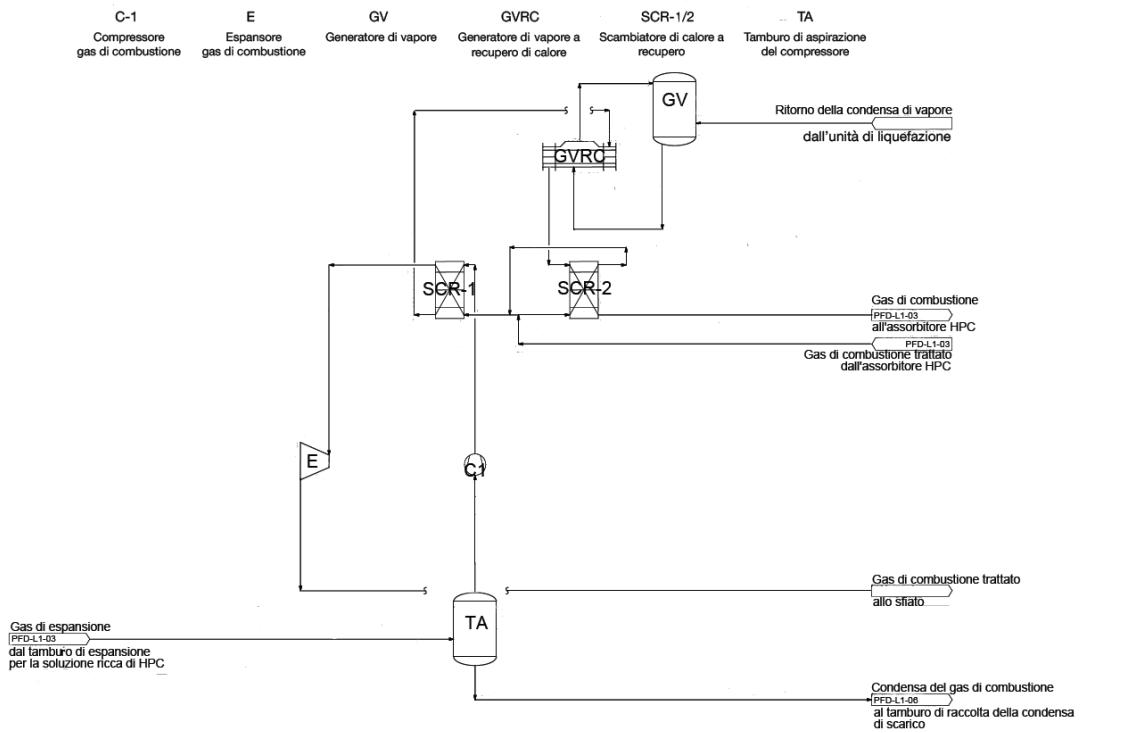


Figura 13. PFD compressione fumi e cattura CO₂, L1-02

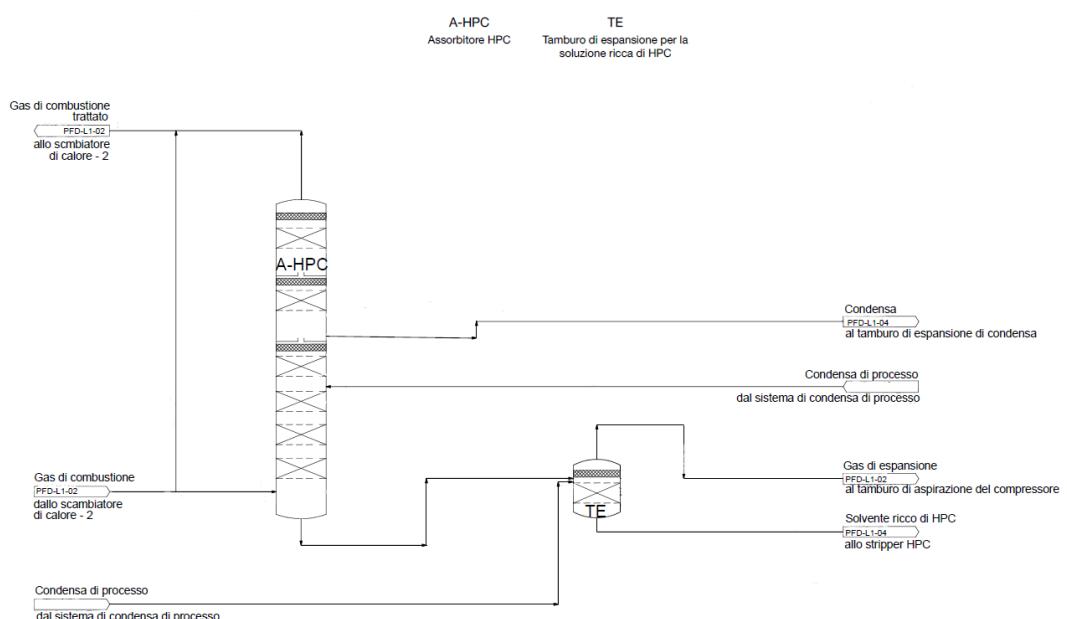
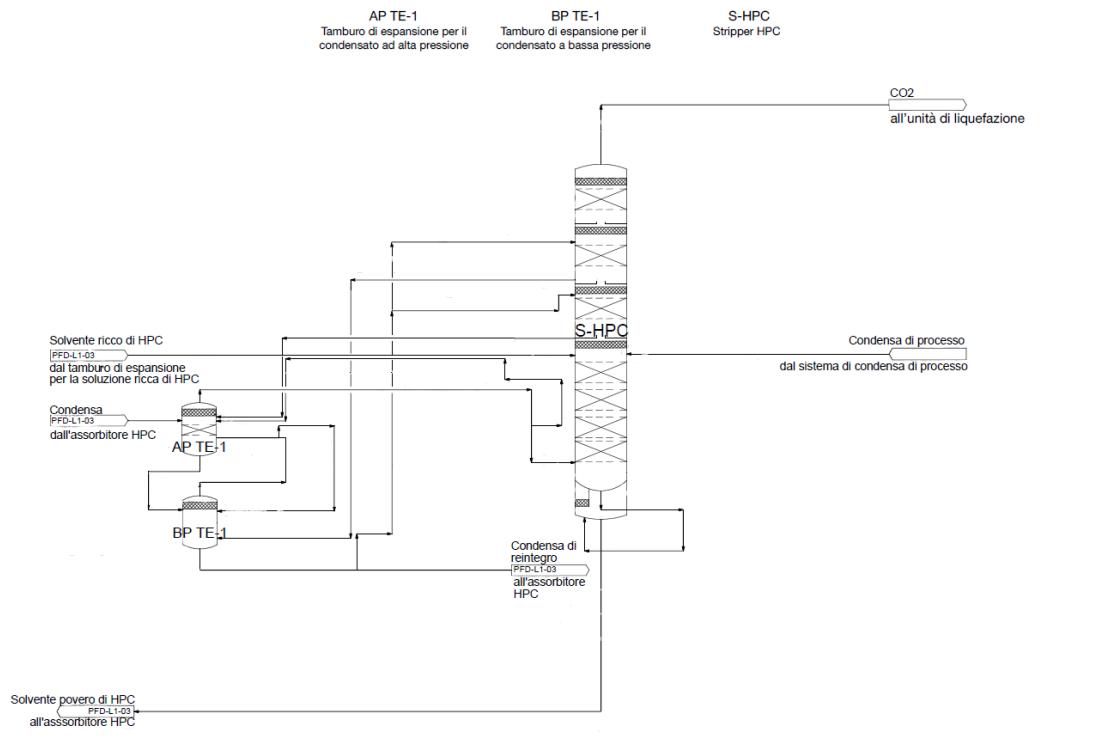
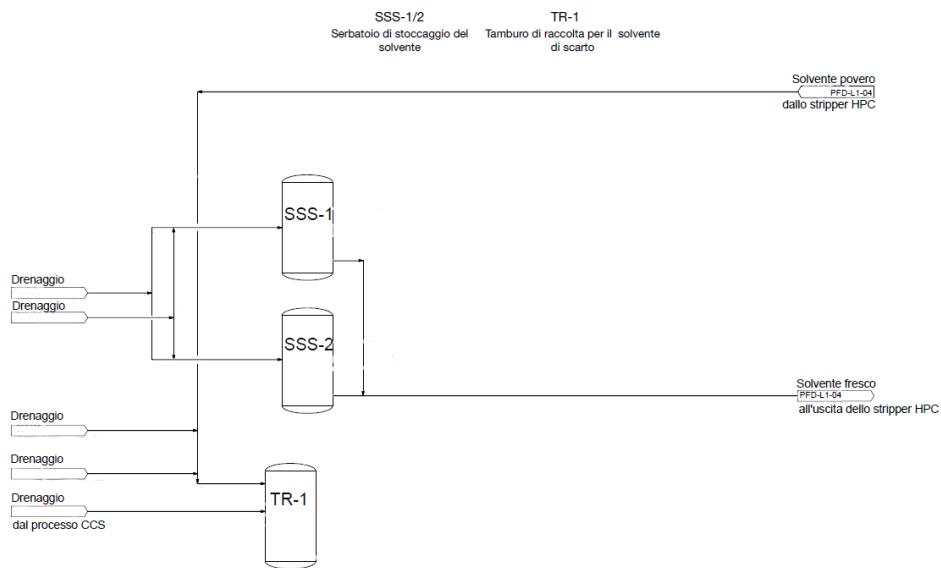


Figura 14. PFD compressione fumi e cattura CO₂, L1-03



PFD-L1-04

Figura 15. PFD compressione fumi e cattura CO₂, L1-04



PFD-L1-05

Figura 16. PFD compressione fumi e cattura CO₂, L1-05

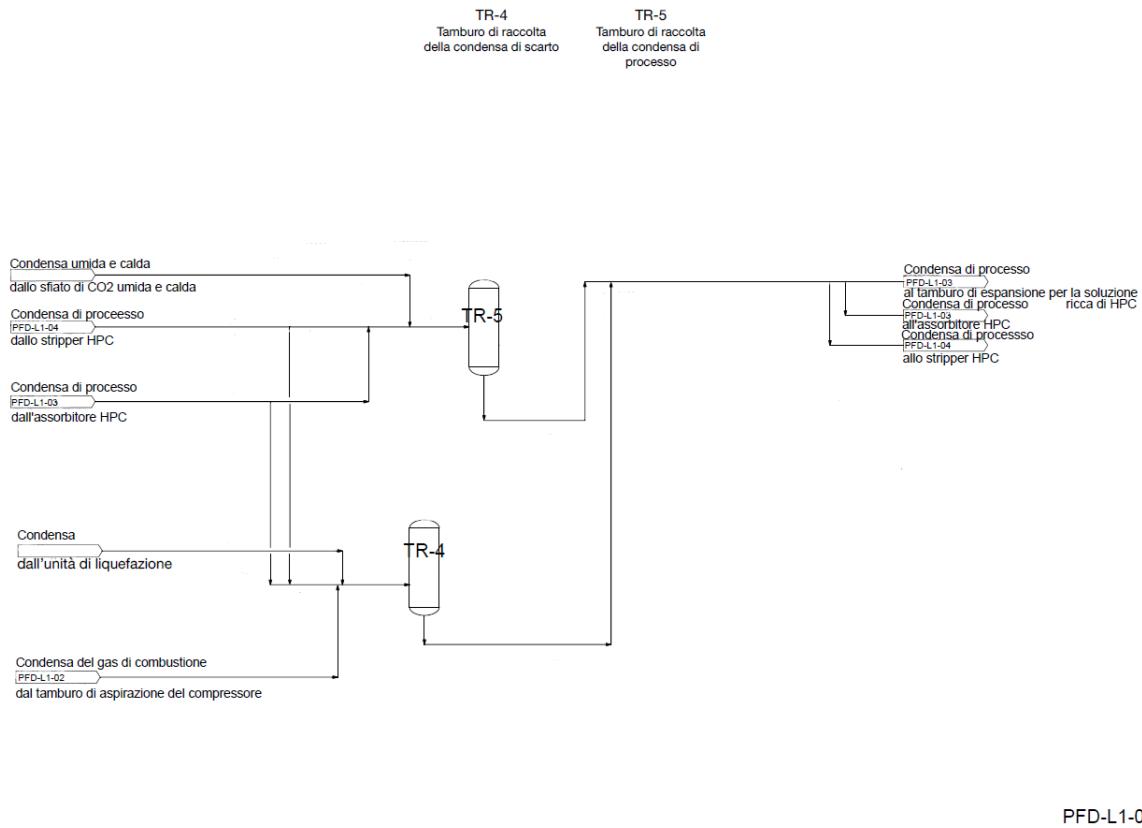


Figura 17. PFD compressione fumi e cattura CO₂, L1-06

3.2.3 Liquefazione della CO₂

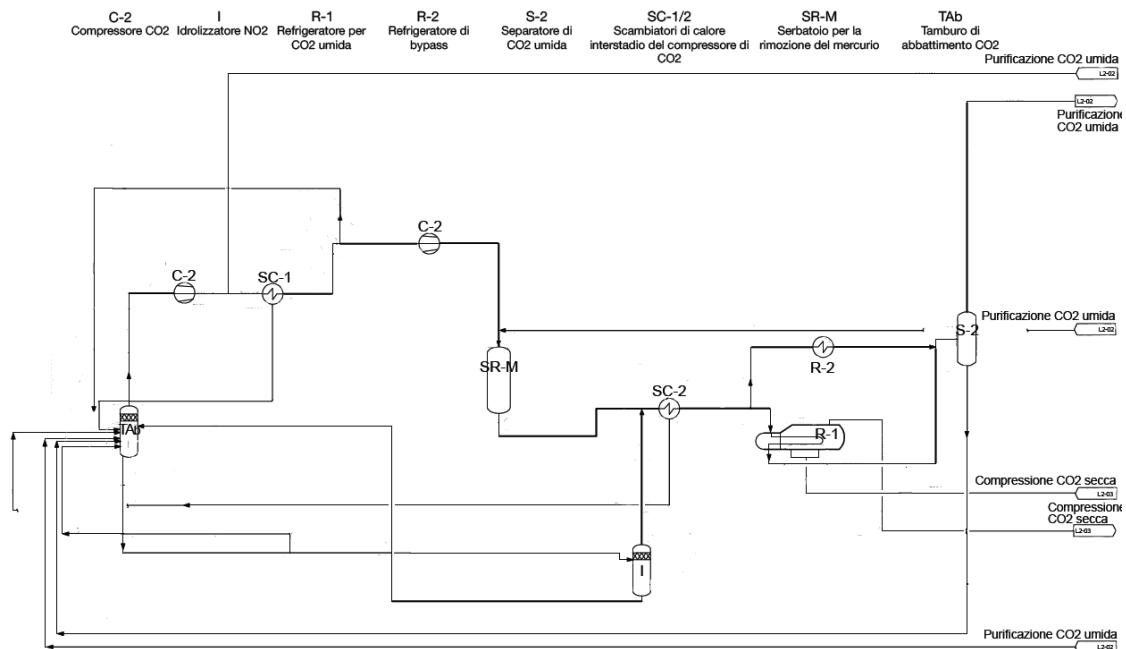
L'unità di liquefazione è divisa in tre sezioni principali:

- Compressione della CO₂ umida, rappresentata in Figura 18: l'anidride carbonica gassosa entra nell'unità di liquefazione a circa 180°C e attraversa il compressore (C-2) per poi essere raffreddata a circa 70°C (R-1) e passare attraverso un separatore (S-2).
- Purificazione della CO₂ umida: dopo aver attraversato il separatore, l'anidride carbonica passa per il serbatoio di

purificazione (SP-2, Figura 19) mantenendo la stessa pressione, di circa 10 barg.

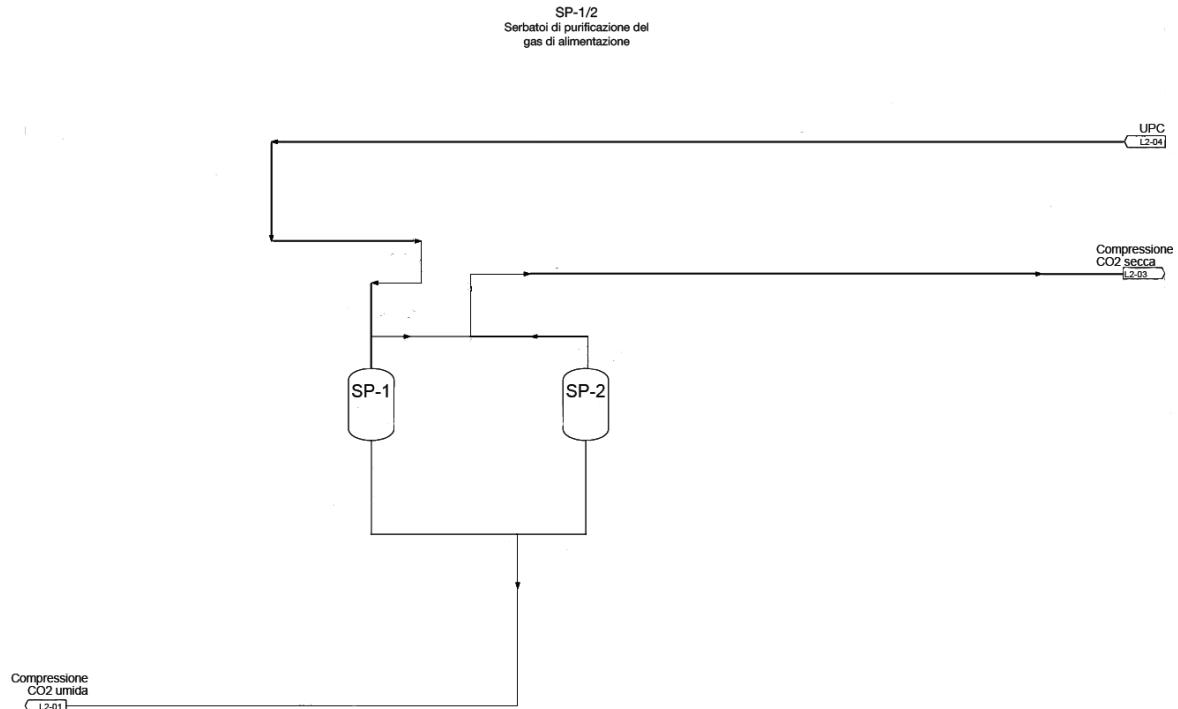
- Compressione della CO₂ secca, raffigurata in Figura 20: dopo aver attraversato il compressore (C-2) la CO₂ raggiunge una pressione di circa 80 barg e attraversa prima il densificatore (D) e poi uno scambiatore di purificazione (SP-3).
- Processo criogenico: nell'unità di processo criogenico (UPC, Figura 21) la CO₂ viene raffreddata fino a circa -50°C ed esce ad una pressione di circa 20 barg.
- Purificazione, rappresentata in Figura 22 e Figura 23: l'anidride carbonica liquida passa attraverso un separatore (S-1), una colonna di rimozione di CH-4 (CR) e un serbatoio di purificazione (SP-4).

In Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23 è possibile osservare i PFD relativi al processo di liquefazione.



PFD-L2-01

Figura 18. PFD unità di liquefazione, L2-01



PFD-L2-02

Figura 19. PFD unità di liquefazione, L2-02

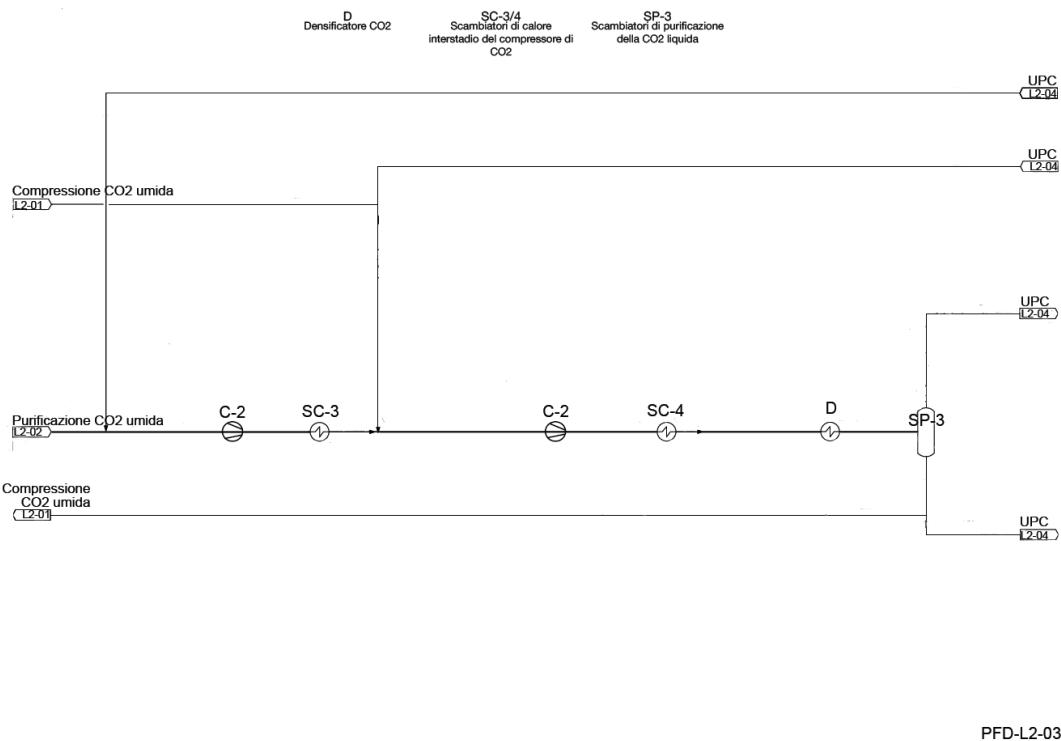


Figura 20. PFD unità di liquefazione, L2-03

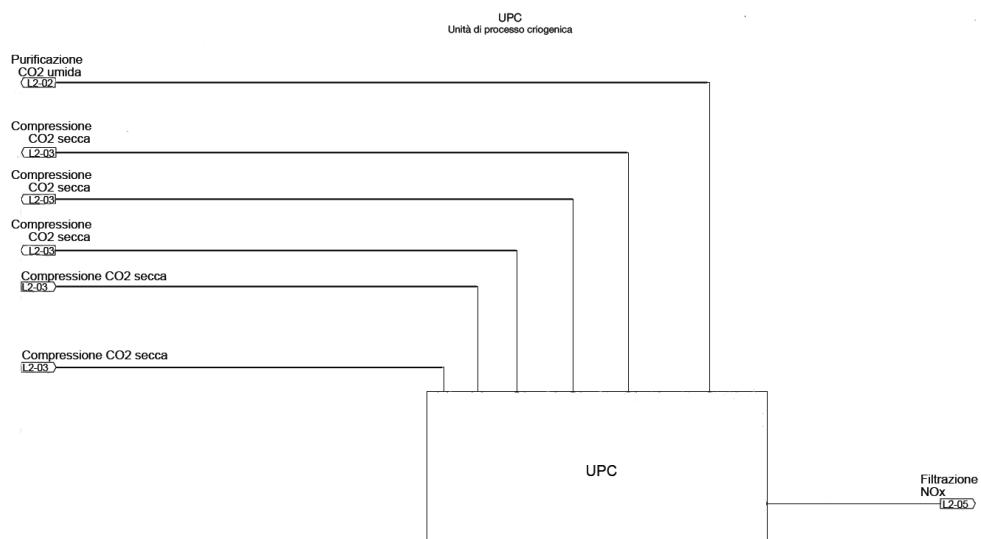
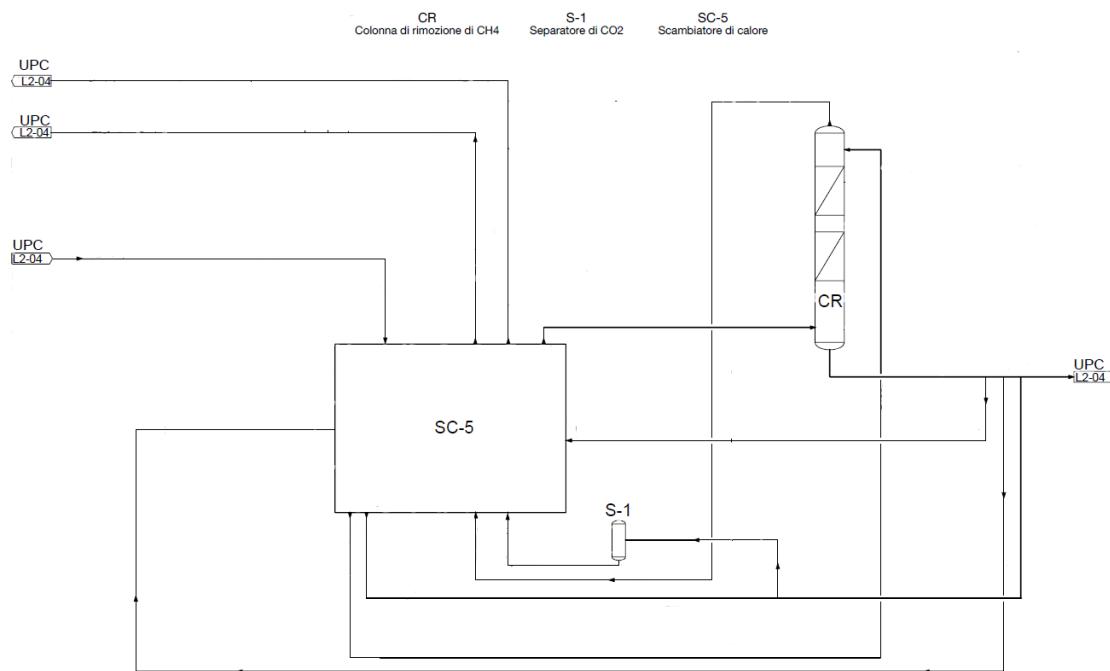
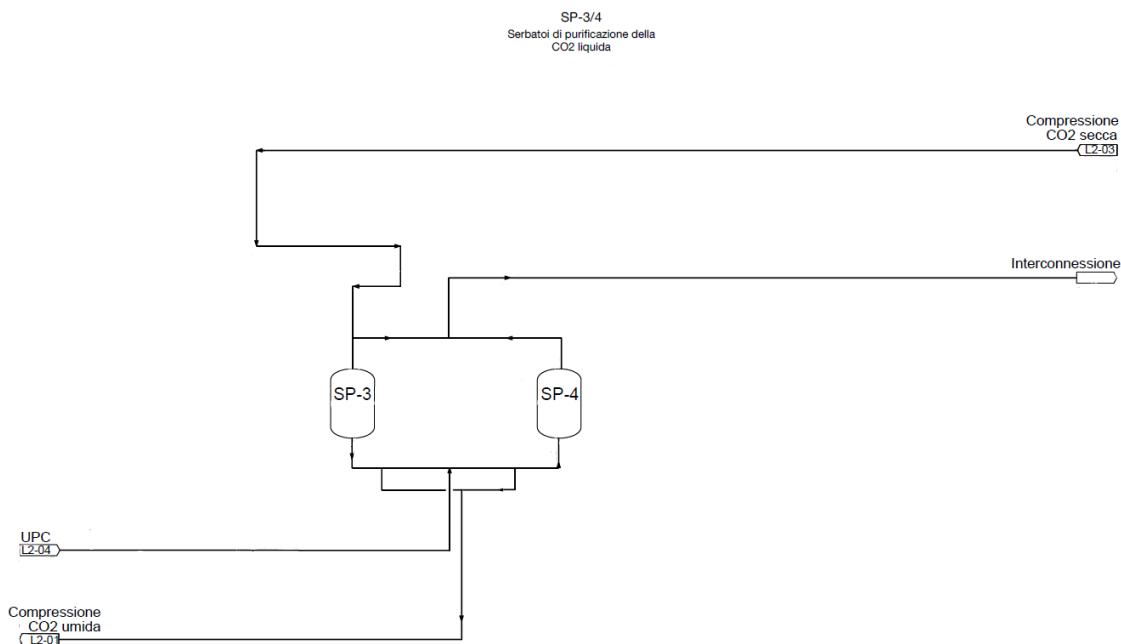


Figura 21. PFD unità di liquefazione, L2-04



PFD-L2-05

Figura 22. PFD unità di liquefazione, L2-05



PFD-L2-06

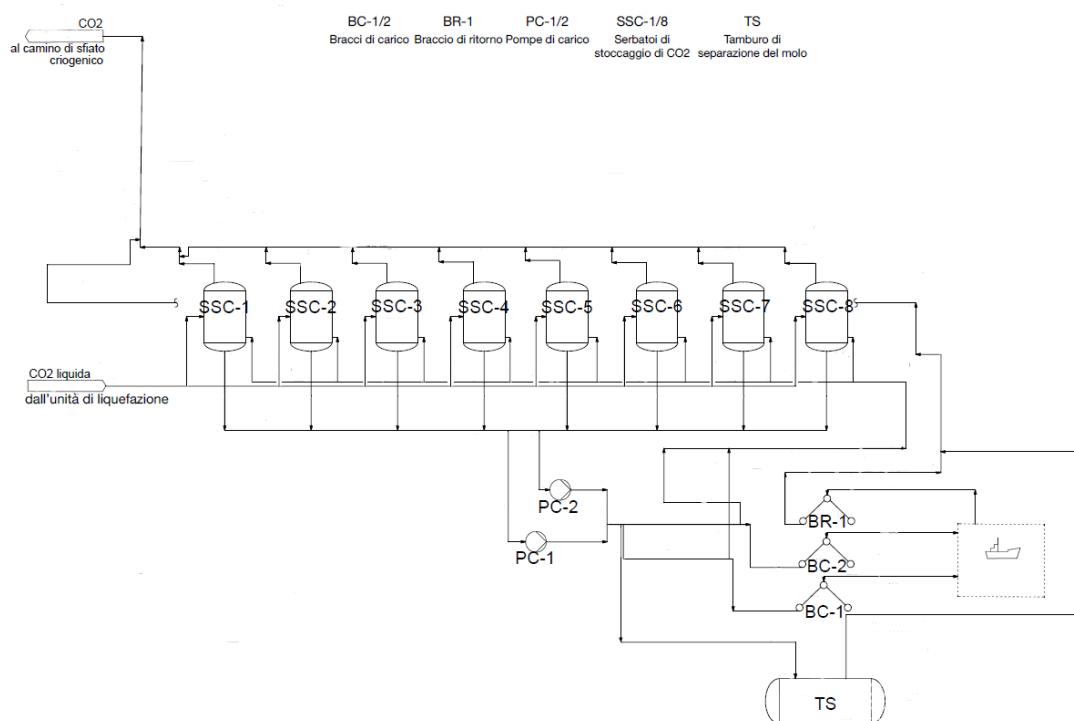
Figura 23. PFD unità di liquefazione, L2-06

3.2.4 Stoccaggio e caricamento della CO₂

Per evitare la formazione di gas di ebollizione, l'anidride carbonica liquefatta proveniente dall'unità di liquefazione entra sottoraffreddata nell'unità di stoccaggio. Il sistema di stoccaggio comprende otto serbatoi (SSC-1/8), dalla capacità di circa 2000 m³ ciascuno e la CO₂ è stoccati, generalmente, a 7 barg con un punto di ebollizione di -50°C.

L'operazione di caricamento della nave avviene tramite due bracci di carico (BC-1/2), preceduti da due pompe (PC-1/2) in parallelo, che hanno un picco di carico di 1200 m³/h. Il vapore di ritorno dalla nave è convogliato nei serbatoi tramite un braccio di ritorno (BR-1).

In Figura 24 è possibile osservare il PFD relativo ai processi di stoccaggio e caricamento della CO₂.



PFD-L1-07

Figura 24. PFD stoccaggio e caricamento della CO₂, L1-07

Le operazioni di caricamento sulla nave sono possibili anche quando un serbatoio di stoccaggio sta ricevendo CO₂ liquida dall'unità di liquefazione e, in particolare, è possibile operare una configurazione per cui metà dei serbatoi riceve CO₂ dall'unità di liquefazione e la restante metà viene utilizzata per caricare la nave.

Invece, quando le operazioni di carico non sono in corso, una delle due pompe sarà comunque in funzione per evitare il riscaldamento del metallo e i conseguenti fenomeni di stress, facendo ricircolare la CO₂ liquida.

4. Metodologia

La valutazione quantitativa del rischio (Quantitative Risk Analysis, QRA) è uno strumento utilizzato per quantificare la probabilità e l'impatto del rischio (per il personale, la popolazione, l'asset, l'ambiente e il business) associato all'uso, alla manipolazione, al trasporto e allo stoccaggio di sostanze pericolose e/o a processi pericolosi per impianti che utilizzano quella sostanza o che impiegano quel processo. La QRA è indispensabile per consentire, a chi di dovere, di svolgere una valutazione del rischio e di prendere decisioni sull'accettabilità di esso per eventuali sviluppi intorno o all'interno dell'impianto.

A differenza di un'analisi qualitativa, che divide i rischi in categorie come basso, medio e alto, e precede quella quantitativa identificando i rischi più significativi, la QRA fornisce delle stime numeriche permettendo di valutare la probabilità di accadimento di potenziali danni e il loro potenziale impatto sugli obiettivi di progetto. Il risultato quantitativo, però, è funzione della validità e dell'accuratezza dei dati di input; perciò, deve essere considerato come una stima con un intervallo di incertezza che dipende dall'accuratezza dei dati.

L'analisi quantitativa richiede strumenti specifici come l'analisi degli alberi degli eventi o degli alberi dei guasti e risulta, infatti, più oggettiva di quella qualitativa ma anche più complessa e costosa, necessitando di esperienza e tempo.

La QRA può essere svolta per diverse fasi del ciclo di vita di un progetto; il livello di dettaglio, le tecniche utilizzate, gli obiettivi e le informazioni

disponibili si evolvono parallelamente all'avanzamento del progetto considerato.

In Tabella 7 è possibile osservare il livello di dettaglio e lo scopo di una QRA per le diverse fasi di un progetto.

Fase	Livello di dettaglio	Scopo
Concettuale	Basso: dati generici e assunzioni semplificate ma conservative	Identificare i principali fattori di rischio e confrontare diverse opzioni
Pianificazione	Da medio a alto: assunzioni realistiche e sostenibili	Fornire una base per l'ottimizzazione della progettazione e indicazioni operative e manutentive; ridurre i livelli di rischio al livello ALARP (As Low As Reasonably Practicable)
Esecuzione	Alto: dati di avanzamento effettivi del progetto	Monitoraggio dell'esposizione al rischio del progetto
Produzione	Analisi consuntiva	Aumentare la consapevolezza dei pericoli; Sviluppo di procedure, manutenzione e ispezione più rigorose

Tabella 7. Caratteristiche QRA per diverse fasi del progetto

Per questo lavoro di tesi è stato eseguito uno studio completo in fase di pianificazione, valutando il livello di rischio per i lavoratori, ambiente, asset e popolazione circostante all'impianto, tenendo conto di tutti i possibili scenari accidentali (esplosioni, incendi, dispersioni tossiche) e considerando l'impatto dell'impianto sull'area esterna.

Il processo di QRA consiste in 6 macro-step:

- Definizione dei potenziali scenari incidentali;
- Valutazione delle conseguenze dell'evento accidentale e stima delle frequenze dei potenziali incidenti;
- Stima degli impatti dell'evento;
- Stima dei rischi;
- Identificazione e valutazione delle priorità delle misure di riduzione dei potenziali rischi.

I passi principali da seguire per compiere i macro-step precedenti sono:

- Identificazione e selezione delle fonti di rilascio.
- Identificazione delle sezioni isolabili negli impianti e loro caratterizzazione in termini di condizioni operative (temperatura e pressione del fluido che le attraversa) e inventari (lunghezza delle tubazioni, volume delle tubazioni e dei componenti, massa totale della sezione).
- Valutazione dei tassi di guasto delle fonti di rilascio e assegnazione delle frequenze di rilascio dalle sezioni isolabili identificate tramite la tecnica del "Parts Count".

- Caratterizzazione conservativa dei punti di rilascio all'interno di ciascuna sezione isolabile identificata e determinazione degli eventi accidentali.
- Identificazione degli scenari e assegnazione della frequenza tramite l'analisi ad albero degli eventi e l'analisi ad albero dei guasti.
- Modellazione delle conseguenze.
- Valutazione quantitativa del rischio.
- Confronto del rischio con i criteri di tollerabilità proposti come best practice internazionale (HSE, DNV).

4.1 Identificazione e selezione delle fonti di rilascio

In questo contesto è fondamentale definire i principali eventi accidentali (Major Accidental Events, MAE), ovvero gli incidenti rilevanti che provocano conseguenze gravi, immediate o differite, sia per la salute umana che per l'ambiente e l'asset. I MAE rappresentano gli scenari peggiori possibili per un impianto e possono essere conseguenze di diverse cause di processo: perdita di contenimento, guasti di apparecchiature o sistemi di controllo, errori operativi, cattiva pianificazione, errata installazione, minacce esterne. Le cause che portano ad un incidente rilevante sono dette "scenari di guasto di processo" e sono identificate da analisi PHA (Process Hazard Analysis) che, attraverso degli studi come l'HAZOP (Hazard and Operability Analysis), analizzano tutte le cause credibili e le salvaguardie applicabili per ogni scenario pericoloso.

I MAE analizzati in questo lavoro di tesi hanno principalmente origine da eventi di perdita di contenimento (Loss of Containment, LOC) che si verificano in seguito a una rottura o a un rilascio inaspettato da tubazioni o da apparecchiature. Queste rotture sono dette, nel loro insieme, "rotture casuali" e possono essere causate da diverse ragioni: difetti meccanici, usura, corrosione, fatica, impatti, altri fattori esterni o problemi non prevedibili.

Per identificare gli scenari di rilascio che derivano da queste rotture casuali ci si basa sulla documentazione di progetto disponibile, che include bilanci di materia e calore, P&ID (Piping and Instrumentation

Diagram), PFD (Process Flow Diagram) e una lista delle apparecchiature. Da questi documenti si identificano le sezioni rappresentative del processo e i possibili punti di rilascio, in modo da analizzare i relativi scenari di perdita di contenimento.

In particolare, per le sezioni lineari si sono considerati rilasci da tubazioni, mentre per le sezioni puntuali si sono considerati rilasci dalle apparecchiature soggette alle condizioni operative più critiche della sezione, come compressori ed espansori.

4.2 Sezioni isolabili e inventari

Le sezioni isolabili sono porzioni di impianto separate da elementi di isolamento come valvole di intercettazione, dette shutdown valves (SDV), o pompe e compressori alternativi che interrompono il flusso in caso di arresto. L'impianto viene suddiviso in queste sezioni perché, per garantire un'analisi completa, si assume che ogni elemento dell'impianto stesso possa essere una potenziale fonte di rilascio e si suppone che, al rilevamento di questo, il processo venga arrestato manualmente o automaticamente e la sezione interessata venga isolata.

Ogni sezione isolabile rappresenta una fonte di pericolo distinta e nel proprio inventario sono indicate la composizione chimica del fluido presente e le sue condizioni operative di pressione e temperatura; se in una sezione coesistono più fasi, queste vengono trattate come due stream distinti.

I fluidi presenti nell'impianto studiato sono:

- Gas di combustione e gas di combustione trattati;
- CO₂ gassosa e liquida;
- Soluzione povera e ricca di HPC;
- Vapore;
- Acqua demineralizzata;
- Gasolio.

Visto che per lo svolgimento della QRA vengono considerati soltanto i rilasci di sostanze pericolose per le persone e per l'ambiente, tra questi fluidi vengono considerati soltanto:

- CO₂ gassosa e liquida, per le sue proprietà tossiche e asfissianti;
- Gasolio, per la sua infiammabilità;
- Gas di combustione, per le loro proprietà asfissianti.

La composizione dei fluidi, riportata in Tabella 8, è definita sulla base dei bilanci di materia e calore; ogni stream è caratterizzato da una temperatura e una pressione operative, indicate nello stesso documento.

È possibile che una sezione isolabile sia attraversata da fluidi diversi: in questo caso, la scelta del fluido da considerare per l'analisi di rischio è basata sulle condizioni operative più critiche, ovvero quelle che rappresentano gli scenari peggiori per la sicurezza dell'impianto. Quando la CO₂ si trova allo stato gassoso, il rischio principale è quello di rottura per sovrapressione, che si può verificare quando la pressione presenta un valore elevato. Quando, invece, l'anidride carbonica si trova allo stato liquido il rischio è quello dell'infragilimento del materiale: una perdita può causare un raffreddamento estremo della tubazione, la quale si può infrangere e conseguentemente rompere in caso di alta pressione. Per la CO₂ liquida, quindi, le condizioni operative critiche sono costituite da temperatura bassa e pressione alta.

	n° fluido	1	2	3	4	5	6	7
Frazione molare del componente in percentuale	H₂O	10	5	10	20	0	0	0
	N₂	70	90	70	0	0	0	0
	O₂	5	3	5	0	0	0	0
	CO₂	15	2	15	80	100	100	100

Tabella 8. Composizione molare dei fluidi

Per calcolare l'inventario totale di una sezione isolabile, si stima il suo volume complessivo (come la somma dei volumi delle tubazioni e delle apparecchiature) e poi si moltiplica per la densità media del fluido di processo. La stima del volume avviene in due modi:

- Per le apparecchiature il volume di liquido si basa sui dati di progetto, ai quali si applicano dei criteri di riempimento standard: i serbatoi di stoccaggio sono riempiti al 90%, i recipienti con controllo di livello sono riempiti al 50% e tutte le altre apparecchiature sono riempite al 25%.
- Per le tubazioni il volume deriva dalla stima delle lunghezze sulla planimetria e dal diametro ricavato dai P&ID. Anche in questo caso si applica un fattore correttivo conservativo, pari a 1,1, che serve per tener conto di curve e raccordi. Per le linee minori non viene stimata la lunghezza, ma se ne considera una nominale di 5 metri come compromesso tra semplificazione e conservatività.

Infine, per quanto riguarda l'inventario di una perdita di contenimento, questo è definito come la somma delle quantità contenute nella sezione isolabile e considera sia l'inventario di isolamento, sia la massa

rilasciata nel tempo precedente al blocco. Quindi, la quantità dell'inventario rilasciato dipende dal tempo di intervento dei sistemi di sicurezza.

4.3 Valutazione delle frequenze di rilascio

Quando l'oggetto di studio è un impianto che tratta sostanze pericolose, sia le apparecchiature che le tubazioni sono considerate possibili fonti di rotture casuali in grado di produrre una perdita di contenimento, la cui frequenza di accadimento è ricavata da dati storici di guasto del database internazionale IOGP (International Association of Oil & Gas Producers).

Sempre facendo riferimento al database IOGP, vengono utilizzate quattro dimensioni rappresentative del foro di rilascio, riportate in Tabella 9.

Definizione	Diametro rappresentativo [mm]	Intervalli dei diametri di rottura OGP [mm]
Piccolo	5	1 – 10
Medio	25	10 – 50
Grande	100	50 – 150
Rottura completa	150	>150

Tabella 9. Diametri rappresentativi IOGP report 434-1

In particolare, la scelta di considerare una rottura completa come un foro dal diametro di 150mm risulta essere conservativa in quanto una tubazione più grande avrebbe una frequenza di guasto inferiore.

Le frequenze ricavate dai database vengono combinate con il conteggio dei componenti in modo da ottenere una frequenza di perdita per ogni sezione isolabile. La tecnica del Parts Count consiste nel sommare i tassi di guasto di base, specifici per tipologia di componente, moltiplicati per il numero totale di quel tipo di componente presente in ciascuna sezione isolabile; il conteggio dei componenti viene effettuato sui P&ID, dove si contano le apparecchiature e i relativi accessori come valvole, flange e connessioni strumentali. Per le tubazioni, invece, si moltiplica il tasso di guasto specifico per unità di lunghezza per la lunghezza totale delle tubazioni nella sezione isolabile, misurata dal layout.

Le frequenze di base sono stimate utilizzando dati storici di guasto per ogni tipo di componente.

La formula generale per la tecnica del parts count è:

$$\sum_{i=1}^n n_i f_{basic,i}$$

dove:

i è il tipo di apparecchiatura;

n_i è il numero delle apparecchiature di tipo i che sono presenti nella sezione isolabile;

$f_{basic,i}$ è la frequenza di guasto base per l'apparecchiatura di tipo i.

Per l'applicazione della tecnica del Parts Count si fanno le seguenti assunzioni:

- I confini di isolamento delle sezioni isolabili sono definiti da:
 - Valvole di blocco (Shut Down Valves, SDV);
 - Valvole di blocco di emergenza (Emergency Shut Down Valves, ESDV);
 - Valvole di sicurezza (Pressure Safety Valve, PSV);
 - Valvole bloccate in posizione chiusa.
- Le tubazioni di processo includono soltanto le saldature.
- I bracci di carico e scarico includono il braccio e l'accoppiatore.
- Le valvole manuali includono tutti i tipi di valvole manuali ed escludono le flange, i controlli e la strumentazione.
- Le valvole attuate includono tutti i tipi di valvole attuate ed escludono le flange, i controlli e la strumentazione.
- La frequenza delle valvole è pari a quella di un giunto flangiato.
- Le connessioni della strumentazione per il rilevamento del flusso, della pressione e della temperatura includono lo strumento, due valvole, quattro flange, un raccordo e la relativa tubazione.
- I serbatoi di processo non includono i serbatoi di stoccaggio e nel conteggio includono soltanto il serbatoio stesso, qualsiasi bocchello o passo d'uomo.
- Le pompe includono sia tipi a singola che a doppia tenuta e nel conteggio includono soltanto la pompa stessa.
- I compressori includono soltanto il compressore stesso.

- Gli scambiatori includono tutti i tipi di scambiatori e nel conteggio includono soltanto lo scambiatore stesso.
- I filtri includono soltanto il filtro stesso, qualsiasi bocchello o passo d'uomo.

4.3.1 Adattamento IOGP e standard in evoluzione

Fare riferimento all'IOGP anche nel campo della CCUS è una prassi corrente e accettata, vista la mancanza di un database completo e robusto dedicato esclusivamente alla CO₂. Grazie alla maturità dell'industria Oil and Gas, infatti, esiste una quantità di dati operativi statisticamente significativa, che copre un'ampia gamma di apparecchiature. Queste ultime, come ad esempio flange e valvole, sono strutturalmente simili, indipendentemente dal fluido che le attraversa; anche alcune cause di guasto, come l'errore umano o le minacce esterne, in prima approssimazione, possono essere considerate indipendenti dal fluido.

Alcuni organismi di regolamentazione, come l'HSE, riconoscono in questa prassi alcuni limiti, soprattutto per quanto riguarda le tubazioni, in quanto i codici di progettazione esistenti non risultano adeguati al trasporto in fase densa o supercritica. [40] I dati di frequenza derivanti dall'IOGP dovrebbero essere adattati alle applicazioni con CO₂ tenendo conto del diverso comportamento dei fluidi, la diversa interazione con i materiali e le diverse conseguenze.

Il gas naturale viene trasportato allo stato gassoso, mentre l'anidride carbonica viene trasportata in fase liquida o supercritica, il che richiede pressioni più elevate e densità maggiori che causano maggiori sollecitazioni sui componenti. Inoltre, il rischio di fragilimento dovuto alle temperature criogeniche tipiche della CO₂ allo stato liquido non è considerato nei sistemi a gas naturale standard; perciò, sarebbe necessaria una revisione delle frequenze di guasto delle tenute e l'introduzione di scenari di frattura fragile.

Un altro aspetto da considerare riguarda le impurità:

- La presenza di acqua libera può portare alla formazione di acido carbonico, che rappresenta una grave minaccia di corrosione interna. La frequenza di guasto per corrosione interna, quindi, risulta essere funzione dell'affidabilità del sistema di disidratazione.
- La probabilità di guasto sotto stress può essere aumentata dalla presenza di altre impurità che causano fragilimento.

L'anidride carbonica in fase densa, inoltre, può causare rigonfiamento o decompressione in alcuni materiali di tenuta comunemente utilizzati in valvole, flange e guarnizioni [41] ; perciò, la probabilità di emissioni o guasti delle tenute è maggiore rispetto al caso del gas naturale.

Il settore di trasporto e stoccaggio dell'anidride carbonica, sebbene in mancanza di nuovi repertori di dati di guasto specifici, sta sviluppando un quadro di standard e pratiche raccomandate. In particolare, API (American Petroleum Institute), DNV (Det Norske Veritas) e ISO

(International Organization for Standardization) stanno pubblicando linee guida basate sulla gestione proattiva dell'integrità dei sistemi.

La metodologia delle future QRA sarà fondata sulla fisica del guasto e i dati saranno derivanti da progetti di ricerca congiunti (JIPs, Joint Industry Projects) e da modelli predittivi.

I nuovi standard e linee guida più importanti sono:

- ISO TC 265: è un insieme di documenti che definiscono i processi di gestione del rischio dell'intera catena CCUS, col fine di stabilire un quadro metodologico globale [42].
- Pratiche raccomandate dalla DNV, basate su ricerca e modellazione avanzata delle conseguenze.
- Nuova pratica raccomandata per il trasporto di CO₂ dell'API che include sezioni specifiche sulla valutazione del rischio e sulla gestione dell'integrità.

Passando da un approccio basato sui dati storici ad uno basato sulla prevenzione, la stima delle frequenze di guasto diventerà strettamente legata alle nuove pratiche raccomandate e alle specifiche operative.

4.4 Analisi ad albero dei guasti

Come detto precedentemente nel paragrafo 4.1, per lo studio degli incidenti rilevanti si considerano gli scenari di guasto di processo, la cui frequenza viene calcolata tramite l'analisi ad albero dei guasti (Fault Tree Analysis, FTA). Un albero dei guasti si concentra su un particolare incidente o guasto principale del sistema, detto Top Event, e fornisce un metodo per determinare le cause di questo evento. Gli alberi dei guasti per questo studio sono stati creati a partire da top events costituiti da rischi di incidente rilevante (Major Accident Hazard, MAH) identificati attraverso uno studio HAZOP e selezionati considerando una gravità del danno minima, ovvero corrispondente a un decesso.

L'analisi avviene in 8 fasi:

- Fase 1: ricerca dei dati sulle caratteristiche costruttive, funzionali, gestionali e di manutenzione e definizione dei limiti di batteria e delle condizioni ambientali di lavoro. L'impianto studiato in questo lavoro di tesi è diviso in due macro-parti, ovvero la parte di cattura e compressione e l'unità di liquefazione, e deve essere dimensionato per operare a temperature che vanno da -20°C a +20°C e per una velocità media del vento pari a 24 m/s.
- Fase 2: identificazione delle configurazioni operative e scelta di quella oggetto di indagine.
- Fase 3: identificazione delle funzioni e dei criteri di successo del sistema e scelta del criterio da analizzare.

- Fase 4: definizione del Top Event indesiderato come negazione del criterio scelto per l'analisi.
- Fase 5: costruzione dell'albero di guasto.
- Fase 6: esecuzione dell'analisi qualitativa e quantitativa.
- Fase 7: interpretazione dei risultati. L'analisi di un FT fornisce l'inaffidabilità o l'indisponibilità di un sistema, quantificando la probabilità di accadimento del top event, che diventa il dato in input per l'analisi dell'Event Tree.
- Fase 8: definizione delle misure compensative più efficaci in grado di ridurre la probabilità di guasto del sistema.

L'albero dei guasti è un modello grafico che mostra le varie combinazioni di guasti di apparecchiature o dipendenti da errori umani che possono portare al Top Event di interesse. Queste combinazioni seguono le regole della logica booleana, che servono per identificare i minimal cut-sets, ovvero le combinazioni minime di eventi elementari in grado di portare all'evento top, che offrono suggerimenti per migliorare la progettazione, gestione o manutenzione del sistema.

In Figura 25 è possibile osservare un esempio di un generico albero dei guasti; i dettagli sulla costruzione di un FT sono reperibili in letteratura [43].

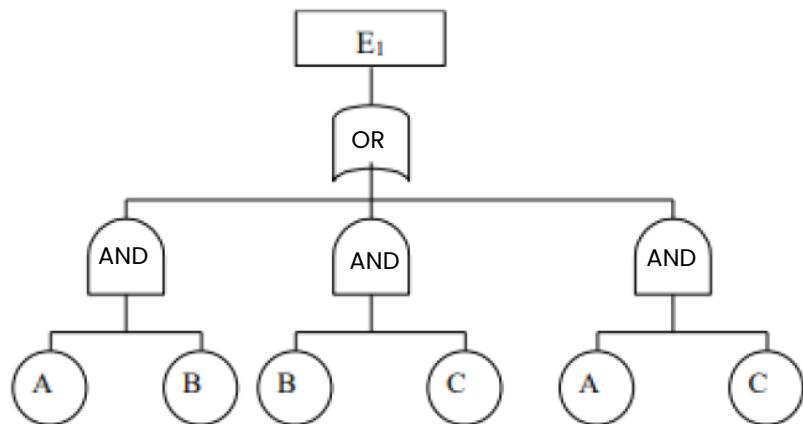


Figura 25. Esempio di costruzione di un Fault Tree [43]

I valori di input necessari per la stima della frequenza tramite l'albero dei guasti sono i tassi di guasto degli eventi primari, che possono essere reperiti in database commerciali tipici del settore dell'industria di processo, come OREDA.

La costruzione e l'analisi dell'albero dei guasti viene eseguita con software appositi come ITEM toolkit Fault Tree Analysis di ITEM Software.

Visto che i MAE analizzati in questo studio consistono in perdite di contenimento causate da rotture inaspettate, gli alberi di guasto costruiti per le deviazioni di processo non verranno analizzati.

4.5 Analisi ad albero degli eventi

Un albero degli eventi è una rappresentazione visiva di tutti gli scenari incidentali che si possono originare da un evento iniziatore in caso di successo o fallimento dei sistemi di sicurezza dell'impianto, quantificando ogni possibile scenario su base probabilistica e considerando tutte le diverse possibilità. I dettagli sulla costruzione di un Event Tree sono disponibili in letteratura. [43]

In questo caso, l'ETA (Event Tree Analysis) è utilizzata per sviluppare un evento LOPC (Loss of Primary Containment) in diversi scenari incidentali grazie ad una rappresentazione schematica di tale sviluppo. L'albero degli eventi per un rilascio di CO₂ viene costruito come mostrato in Figura 26.

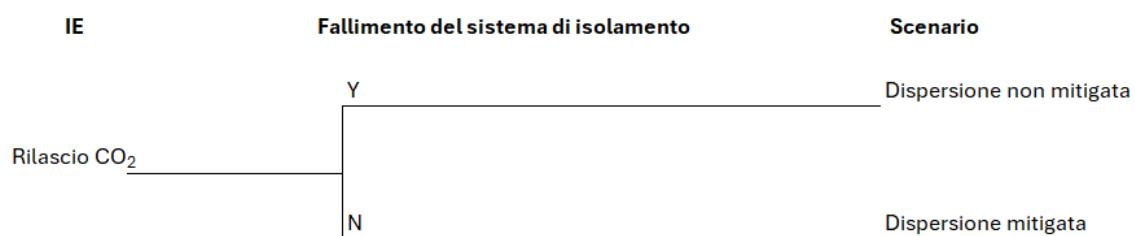


Figura 26. Albero degli eventi per un rilascio di CO₂

IE è l'evento iniziatore (Initiating Event), mentre il fallimento del sistema di isolamento consiste nel fallimento del solo sistema di Emergency Shutdown per i rilasci outdoor e nel fallimento contemporaneo del sistema ESD e della ventilazione forzata di emergenza per i rilasci indoor.

4.6 Modellazione delle conseguenze

La modellazione delle conseguenze serve per calcolare gli effetti fisici degli scenari incidentali e, quindi, l'estensione delle aree di danno, ovvero le aree potenzialmente impattate. Le conseguenze possono essere più o meno severe a seconda dei seguenti fattori:

- Caratteristiche delle sostanze (tossicità, reattività, infiammabilità, ...);
- Condizioni di rilascio: pressione, temperatura e stato fisico;
- Altezza del punto e direzione del rilascio;
- Durata del rilascio;
- Quantità della sostanza rilasciata;
- Condizioni meteorologiche.

Per la realizzazione di questo step della QRA viene utilizzato il software DNV PHAST 9.1, che implementa modelli fisici per simulare fenomeni di rilascio e dispersione. Quando si parla di rilasci di CO₂ liquida, un aspetto critico è sicuramente costituito dagli effetti criogenici affrontati nel paragrafo 2.5.2, che coinvolgono, però, un'area più piccola. Gli effetti criogenici, quindi, risultano già considerati nella modellazione della dispersione tossica.

4.6.1 Software DNV PHAST

Il software DNV PHAST è una soluzione adottata a livello globale per la modellazione delle conseguenze derivanti da scenari di perdita di contenimento di sostanze pericolose. La funzione principale del

software consiste nell'esaminare la progressione di un potenziale incidente, dalla scarica iniziale in seguito ad una perdita di contenimento, fino agli effetti finali di natura infiammabile e tossica. L'intero processo può essere descritto grazie all'implementazione del modello di dispersione unificato (Unified Dispersion Model, UDM), caratterizzato da un insieme di equazioni in grado di evolversi dall'istante iniziale a quello finale e grazie al quale si riesce ad avere una previsione coerente e continua dalla sorgente al campo lontano. La modellazione segue, infatti, le fasi chiave della dispersione:

- Dispersione a getto: fase iniziale in cui il comportamento della nube è dominato dalla quantità di moto e il meccanismo primario di diluizione è il trascinamento dell'aria ambiente (entrainment).
- Dispersione di gas pesante: la nube è più densa dell'aria circostante e, quindi, collassa e si diffonde per gravità. In questa fase la nube collassa verticalmente e si espande orizzontalmente, mentre l'aria ambiente viene inglobata attraverso il fronte di avanzamento della nube o la superficie superiore della stessa.
- Dispersione passiva: in campo lontano il movimento della nube, la cui densità è ormai simile a quella dell'aria circostante, è dominato dalla turbolenza atmosferica.
- Dispersione galleggiante: la nube è più leggera dell'aria e il suo movimento è dominato dal galleggiamento positivo, per cui si solleva.

Inoltre, l'UDM permette anche di:

- Gestire sia rilasci monofase che bifase.
- Includere un modello di non equilibrio per considerare l'evaporazione delle goccioline nel caso di nubi di aerosol.
- Modellare la pozza che si forma dalla perdita di un liquido e la successiva rievaporazione, grazie all'unione dei modelli di pozza e dei modelli di nube di vapore. [44]

PHAST è utilizzato in una vasta gamma di settori industriali, tra cui quelli emergenti nel contesto della transizione energetica che utilizzano l'idrogeno o si basano sullo stoccaggio di CO₂ e può essere utilizzato in tutte le fasi del ciclo di vita di un impianto.

Questo software si basa sulla modellazione integrale, detta anche "free-field", ovvero in campo libero, un ambiente aperto privo di ostacoli significativi e di un terreno complesso. I modelli integrali risolvono equazioni differenziali ordinarie semplificate e unidimensionali per tenere conto della conservazione di massa, dell'energia e del momento. Un approccio integrale è, infatti, computazionalmente efficiente e consente un'analisi rapida di numerosi scenari.

Il software PHAST è caratterizzato sia da punti di forza che da limiti. I punti di forza sono:

- Completezza e robustezza: i modelli validati coprono l'intera gamma di conseguenze di una perdita di contenimento per una libreria che conta più di 2000 sostanze dal database DIPPR (Design Institute for Physical Properties) [45].

- Validazione: durante tutti gli anni di storia del software, la validazione rispetto ai dati sperimentali è stata costante.
- Sviluppo continuo: il software è costantemente aggiornato da DNV, in modo da studiare settori industriali emergenti.
- Usabilità: la struttura degli input e dei report, così come la visualizzazione grafica dei risultati, sono intuitive e si concentrano sul miglioramento dell'esperienza dell'utente. [46]

I limiti di PHAST sono sia tecnici che pratici:

- Modelli integrali: come detto, questi modelli non tengono conto di geometrie e terreni complessi e, quindi, risultano poco adatti per scenari che coinvolgono ostacoli significativi, terreni ondulati o pozze di forma irregolare.
- Imprecisioni: i modelli integrali possono avere difficoltà nella corretta previsione del comportamento vicino alla sorgente, sovrastimando la massa infiammabile se un getto interagisce fortemente con la geometria. [47]
- Costi: essendo uno strumento specialistico, PHAST è caratterizzato da costi significativi, che includono elevate tariffe di licenza, formazione per usarlo efficacemente e un hardware potente per l'esecuzione di eventuali calcoli CFD (Computational Fluid Dynamics). [46]

Per risolvere questi limiti, DNV ha integrato in PHAST dei moduli aggiuntivi di fluidodinamica computazionale in modo da fornire una visualizzazione 3D per:

- Le isosuperfici di concentrazione per uno scenario di dispersione;

- Le forme di fiamma sia per gli scenari di pool fire che di jet fire.

La ricomposizione del rischio per la QRA oggetto di questo lavoro di tesi è stata effettuata con uno strumento interno convalidato da RAMS&E (RAMSE R023 Manuale d'uso e Manutenzione StataMater 201008) attraverso diverse applicazioni in studi simili. Questo strumento consiste in un tool implementato sul software Excel che è in grado di considerare la presenza di ostacoli, tenendo conto anche di eventuali muri tra parti diverse dell'impianto e superando il limite legato ai modelli free-field.

4.6.2 Modellazione del rilascio

Per determinare gli scenari pericolosi che si possono verificare e che sono da considerare nella valutazione delle conseguenze si considerano i seguenti fattori:

- Componente o miscela che viene rilasciata e la sua temperatura e pressione: le miscele considerate sono elencate in Tabella 8; in particolare, l'unità di liquefazione lavora con CO₂ pura, le cui condizioni operative variano a seconda della sezione isolabile.
- Dimensioni del foro, altezza e orientamento del rilascio: i diametri utilizzati sono elencati in Tabella 9. Essendo la CO₂ un gas denso e molto più freddo dell'aria ambiente, la nube tende a disperdersi lateralmente rimanendo vicino al suolo; quindi, per massimizzare questo effetto, si considera un rilascio orizzontale, che favorisce l'accumulo di anidride carbonica vicino al suolo. L'altezza è considerata pari a 1,5 metri dal suolo per valutare l'impatto sul

personale e si suppone che la perdita avvenga da parti situate immediatamente intorno al recipiente, come ad esempio valvole, flange, sensori, richiamando quanto detto nel paragrafo 4.3.1.

- Intervento, eventuale ritardo o guasto del sistema di rilevamento e isolamento.
- Direzione del rilascio e influenza della direzione del vento (nel caso di rilascio a bassa velocità).

Con il fine di identificare i fattori operativi più critici (tra temperatura, pressione e inventario) per le conseguenze è stata svolta un'analisi di sensitività sul software DNV PHAST, che permette di comprendere su quali parametri concentrarsi in fase di progettazione.

In un impianto reale la temperatura e la pressione fluttuano tra margini operativi; perciò, risulta interessante studiare come le dimensioni della nube tossica cambiano in funzione di piccole variazioni di questi parametri.

Sono già state svolte due analisi di sensibilità su PHAST in due lavori di tesi differenti ([48] , [49]), concentrandosi su altri parametri:

- Direzione del rilascio, tempo di mediazione e modello di dispersione. Da questa analisi si è concluso che un rilascio orizzontale con impatto, rallentando la quantità di moto del getto, causa distanze di dispersione maggiori rispetto a un rilascio orizzontale senza impatto. Il tempo di mediazione è stato variato da 18,57 secondi fino a 30 minuti, con la conclusione di mantenere il valore di default di 600 secondi. Per il modello di dispersione,

infine, sono stati confrontati i risultati ottenuti prima e dopo l'applicazione del modello AWD (Along Wind Diffusion). [48]

- Diametro dell'orifizio di rilascio, condizioni termodinamiche e scenari completi. In questa analisi è stata studiata l'influenza del diametro del foro sulla frazione solida di CO₂, la temperatura, l'altezza e la concentrazione della nube lungo la sua linea centrale. Invece, per diversi punti del ciclo studiato, sono stati confrontati vari valori di pressione e temperatura per verificarne l'impatto sulla formazione di fase solida. [49]

4.6.3 Modellazione della dispersione

Le caratteristiche del pennacchio disperso vengono calcolate con PHAST tramite l'UDM, che descrive la dispersione a getto, l'evaporazione delle goccioline con possibile ricaduta liquida, la possibile vaporizzazione da pozza, la dispersione di gas pesanti e la dispersione passiva finale, generando un profilo continuo senza discontinuità e transizioni evidenti tra le diverse fasi del processo modellato.

Il modello UDM è in grado di modellare anche rilasci di CO₂ pura, descrivendo la formazione di solidi all'interno del getto grazie al database DIPPR che definisce una fase fittizia con caratteristiche liquide o gassose a seconda della temperatura. Secondo il DIPPR, quando la pressione del punto triplo del materiale è superiore alla pressione ambiente, la temperatura del punto triplo viene utilizzata come valore limite tra la possibilità di un equilibrio solido-vapore o liquido-vapore:

visto che la CO₂, in condizioni atmosferiche, espande al di sotto del suo punto triplo, si può ottenere soltanto una miscela solido-vapore.

Il modello di dispersione traccia il comportamento della nube dal campo vicino al campo lontano, in base alla presenza di diversi profili verticali di vento e caratteristiche atmosferiche, contenute nello stesso modello, in cui ci sono anche la diffusione lungo la direzione del vento e gli effetti di spargimento per gravità.

Nonostante PHAST riesca a descrivere la formazione di solidi all'interno del getto, non è però in grado di considerare la deposizione al suolo di particelle di ghiaccio secco ("rainout").

In Figura 27 è possibile osservare la modellazione della dispersione di CO₂ in seguito a un rilascio.

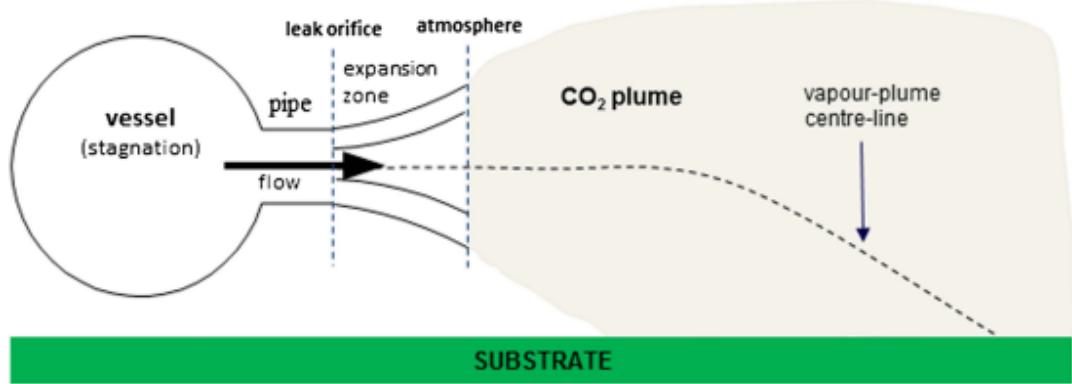


Figura 27. Modellazione della dispersione di CO₂ (UDM) [56]

Dai lavori di tesi "Analysis of the state of the art of vulnerability and impairment thresholds associated to physical effects of a CO₂ release. Application to the Allam cycle case study" di Alma Gallo [48] e "Analysis

of the state of the art of the consequences of CO₂ releases into the atmosphere. Application to the Allam cycle case study" di Cristina Bleve [49] è possibile fare un breve resoconto dei punti deboli dei modelli a disposizione per la modellazione dei rilasci di anidride carbonica.

Non esistono ancora metodi consolidati per la valutazione del rischio legato alla CO₂ in fase densa e una delle principali lacune riguarda la modellazione degli effetti fisici. In particolare, PHAST non è in grado di:

- Calcolare l'onda di sovrapressione generata da una transizione di fase rapida;
- Valutare la riduzione della visibilità causata dalla nebbia di umidità condensata.

I modelli utilizzati per la modellazione dei rilasci si dividono in due categorie principali: integrali e di fluidodinamica computazionale. Entrambi presentano specifiche debolezze:

- Oltre ai limiti già analizzati nel paragrafo 4.6.1, i modelli integrali, basati su modelli gaussiani semplici, non sono adatti per gas densi come la CO₂. Tra questi modelli, PHAST è il più evoluto e riesce, infatti, a descrivere la miscela solido-vapore, ma utilizza un approccio "pseudo-componente" che può causare degli errori nella previsione della temperatura e della composizione della nube. Inoltre, PHAST fornisce i risultati di dispersione prima dell'applicazione del modello AWD, che risultano essere poco affidabili per lunghe distanze.
- I modelli CFD, come FLUENT e FLACS, sono sicuramente più dettagliati e in grado di descrivere geometrie complesse, ma

sono molto più costosi e richiedono tempi di calcoli molto più lunghi rispetto ai modelli integrali. Inoltre, il loro utilizzo richiede competenze specializzate e i risultati sono molto sensibili alle impostazioni scelte dall'utente; richiedono anche dei calcoli separati per la definizione del termine sorgente. I modelli CFD, quindi, non risultano adatti per analisi rapide o per la gestione delle emergenze.

Riguardo la modellazione del rilascio e della dispersione di anidride carbonica, è importante accennare alla proposta di regolamentazione NPRM (Notice of Proposed RuleMaking) della PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration) statunitense. Questa proposta rende obbligatoria dal punto di vista legale l'analisi della dispersione dei vapori per il calcolo di un potenziale rilascio ed estende le regole a tutte le fasi della CO₂, non più soltanto a quella supercritica a cui veniva principalmente applicata. Introduce, inoltre, la necessità della definizione di zone di pianificazione per le emergenze con un'estensione fino a 3,2 km dalle pipelines, per cui i risultati delle QRA si mostrano direttamente collegati alla preparazione della comunità nella risposta all'emergenza.

[53]

4.6.4 Modellazione dei rilasci outdoor

I rilasci outdoor sono modellati senza impatto per ottenere delle distanze di danno più conservative, mentre per la rugosità della

superficie viene utilizzato il valore di 0,183 m predefinito di PHAST. Le condizioni ambientali considerate per la modellazione dei rilasci sono riportate in Tabella 10.

Parametro ambientale	Estate	Inverno
Temperatura dell'aria	18°C	-1°C
Temperatura del suolo	18°C	-1°C
Umidità relativa	68%	84%

Tabella 10. Condizioni ambientali per la modellazione dei rilasci

Tra le condizioni meteorologiche mostrate in Tabella 11, vengono utilizzate quelle più conservative:

- Classe di stabilità 2F durante la notte: il vento è debole e la stabilità è alta, per cui la dispersione verticale della CO₂ è limitata; perciò, la nube rimane vicino al suolo.
- Classe di stabilità 5D durante il giorno: il vento è forte e la stabilità è neutra, per cui il pennacchio potrebbe raggiungere la sua massima altezza, ma viene schiacciato a causa dell'elevata velocità del vento, massimizzando la concentrazione di CO₂ al livello del suolo.

Velocità del vento in superficie [m/s]	Intensità della radiazione solare			Copertura nuvolosa notturna	
	Forte	Moderata	Leggera	>50%	<50%
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tabella 11. Condizioni meteorologiche che stabiliscono le classi di stabilità atmosferiche di Pasquill

4.6.5 Modellazione dei rilasci indoor

Per i rilasci indoor si sono considerati tre scenari:

- Dispersione con intervento dell'ESD con ventilazione forzata (caso 1);
- Dispersione con guasto dell'ESD con ventilazione forzata (caso 2);
- Dispersione con guasto dell'ESD senza ventilazione forzata: in questo caso il numero di ricambi ora è stato posto pari a 0,001, che è il numero minimo supportato da PHAST (caso3).

In Tabella 12 sono riportati i valori di ACPH (Air Change Per Hour) per i diversi scenari di rilasci indoor. Questi valori sono stati definiti in seguito a una serie di simulazioni effettuate su PHAST in fasi precedenti a quella progettuale considerata in questo caso studio. Queste simulazioni hanno previsto la modellazione di rilascio e dispersione per le diverse

sezioni isolabili indoor, per diversi valori di ACPH, fino a trovare quello che portava al minor numero possibile di scenari con il raggiungimento di una concentrazione tossica.

Stanza	Volume [m³]	ACPH caso 1	ACPH caso 2	ACPH caso 3
Sala di cattura	79720	1,8	0,8	0,001
Sala di compressione	52550	1,7	0,9	0,001
Sala di liquefazione	34900	15	1,7	0,001

Tabella 12. ACPH per scenari indoor

La durata del rilascio dipende dal successo del sistema di arresto e, se previsto, dall'intervento umano: il tempo per identificare la perdita e avviare l'isolamento è assunto pari a 2 minuti. Dopo l'isolamento, si suppone che l'intero inventario tra le valvole di isolamento sia stato rilasciato; quindi, la durata della perdita per ogni sezione isolabile dipende dal rateo di rilascio e dal volume dell'inventario. PHAST assume la durata massima di perdita pari a 3600s.

Il sistema ESD funziona correttamente se, una volta ricevuto un segnale di arresto da rilevatori di gas o di incendio, si attiva e chiude

completamente le due SDV che sono in grado di isolare ogni inventario e di avviare il sistema di ventilazione di emergenza.

Per tenere conto della possibilità di mancato isolamento a causa del guasto sia dell'ESD che del sistema di ventilazione di emergenza, la probabilità di fallimento dell'isolamento è determinata come:

$$P_{isolation\ failure} = PFD_{ESD} + P_{HVAC}$$

dove:

PFD_{ESD} è la probabilità di guasto su richiesta dell'ESD; un suo valore comune e realistico è di 10^{-2} .

P_{HVAC} è la probabilità di guasto su richiesta del sistema di ventilazione di emergenza; un suo valore comune e realistico per un sistema volto a proteggere personale e apparecchiature è di 10^{-3} .

La probabilità di fallimento dell'isolamento utilizzata in questo studio è:

$$P_{isolation\ failure} = 10^{-2}$$

4.7 Valutazione del rischio

Lo scopo di una QRA consiste nella stima del rischio sociale per le comunità che vivono intorno all'impianto e del rischio individuale (Individual Risk Per Annum, IRPA) totale per le persone che lavorano al suo interno, calcolato considerando il tempo trascorso nell'impianto durante il quale il personale è soggetto al rischio derivante da ogni tipo di scenario incidentale. Il rischio individuale è definito come la frequenza con la quale ci si può aspettare che un individuo subisca un determinato livello di danno dal verificarsi di pericoli specifici e, di solito, viene considerato come il rischio di decesso.

La formula generale utilizzata per la valutazione del rischio per il personale in termini di IRPA, a seguito degli scenari identificati, è la seguente:

$$IRPA = f_{ev} * A_{im} * \rho * vuln * occ * \frac{1}{manning}$$

dove:

f_{ev} è la frequenza di un evento incidentale in grado di causare danni al personale.

A_{im} è l'area impattata dall'incidente considerato, in grado di causare danni al personale.

ρ è la densità del personale in quell'area.

occ è il fattore che indica la frazione dell'anno in cui il personale è presente nell'impianto ed è esposto all'impatto di un evento accidentale.

manning è il numero di persone presenti nell'impianto.

vuln è il fattore di vulnerabilità per una specifica soglia di danno, è adimensionale ed è compreso tra 0 (nessuna probabilità di morte) e 100 (probabilità di morte del 100%). Questo quantifica la probabilità che un individuo subisca un danno specifico e rappresenta la suscettibilità del personale considerato agli effetti della minaccia dell'incidente studiato. Il fattore di vulnerabilità collega l'effetto fisico (in questo caso l'asfissia) alla probabilità di un determinato danno al personale e dipende dall'intensità dell'incidente nel punto di esposizione: per un rilascio di anidride carbonica dipende dalla concentrazione a cui il personale è esposto.

I metodi più utilizzati per il calcolo del fattore di vulnerabilità sono il metodo probit e il metodo a soglie. Il primo è uno strumento statistico basato su una funzione che calcola la probabilità che una certa dose di sostanza pericolosa porti alla morte. Il secondo metodo, invece, stabilisce delle soglie fisse per determinati scenari di danno. Un esempio di applicazione di questi due metodi per la ricerca di criteri di vulnerabilità legati alla tossicità e agli effetti criogenici della CO₂ è presentato nel lavoro di tesi di Alma Gallo. [48]

Per la valutazione del rischio di questo caso studio viene utilizzato un criterio a soglia: se il pericolo in una determinata posizione supera il livello di soglia, allora qualsiasi persona esposta subirà gli effetti con la probabilità definita dal criterio di vulnerabilità.

Per i rischi legati alla CO₂, in questo studio vengono utilizzate quattro soglie, riportate in Tabella 13.

Concentrazione soglia [ppm]	Effetti	Limite di fatalità
280000	Asfissia al tempo iniziale	100%
150000	Letalità con un'esposizione continua di 5 minuti	100%
120000	Letalità con un'esposizione di 30 minuti	100%
105000	Letalità con un'esposizione di 10 minuti	50%

Tabella 13. Valori soglia per i rischi legati al rilascio di CO₂

Le soglie consigliate dal report IOGP “Risk Assessment Data Directory” [50] da utilizzare in uno studio QRA, a meno di altre regolamentazioni di

autorità o di chi commissiona la QRA (come in questo caso), sono riportate in Tabella 14 e Tabella 15.

Concentrazione soglia [ppm]	Tempo di esposizione	Effetti
100000	30 minuti	Ci si avvicina alla soglia dell'incoscienza
120000	5 minuti	Incoscienza
150000	Massimo 1 minuto	Incoscienza
200000	Meno di 1 minuto	Incoscienza

Tabella 14. Valori soglia per i rischi legati al rilascio di CO₂ raccomandati dall' IOGP 434-14 [50]

Tempo di esposizione [minuti]	Concentrazione CO₂ in aria [ppm]	
	SLOT (fatalità dell'1-5%)	SLOD (fatalità del 50%)
60	63000	84000
30	69000	92000
20	72000	96000
10	79000	105000
5	86000	115000
1	105000	140000

Tabella 15. Concentrazioni SLOT e SLOD per diversi tempi di esposizione [50]

A parte la concentrazione di 105000 ppm, che costituisce il valore di SLOD con un tempo di esposizione di 10 minuti, le altre soglie utilizzate in questo studio, rispetto a quelle suggerite dall'IOGP, tengono in considerazione soltanto la letalità e non l'incoscienza, considerando, quindi, tempi di esposizione maggiori.

Per il confronto con i criteri di tollerabilità, vengono calcolati sia l'LSIR che l'IRPA:

- Il rischio individuale specifico per posizione (Location Specific Individual Risk, LSIR) indica il rischio per un individuo ipotetico che si trova in un punto specifico 24 ore al giorno per 365 giorni all'anno. Visto che nella realtà le persone non rimangono continuamente nello stesso luogo, questa misura del rischio non risulta essere realistica. Tuttavia, l'LSIR viene utilizzato per valutare gli effetti esterni al sito.
- Il rischio specifico per l'individuo (Individual Risk Per Annum, IRPA) è una stima più realistica del rischio, in quanto tiene conto della presenza dell'individuo in luoghi diversi per periodi di tempo differenti. Perciò, l'IRPA è il valore che viene confrontato con i criteri di tollerabilità.

Per il personale si assume un livello di presenza del 10% del tempo operativo dell'impianto, per tutte le postazioni, non avendo informazioni precise a riguardo. Per la popolazione esterna, invece, si considera la densità media per diverse aree.

I valori di IRPA ottenuti vengono confrontati con dei criteri di tollerabilità, che secondo le linee guida dell'HSE (Health and Safety Executive)

presenti nell'R2P2 (Reducing Risks, Protecting People) si dividono in tre livelli:

- Rischio intollerabile: 1E-03/anno.
- Rischio tollerabile se ridotto al livello ALARP (As Low As Reasonably Practicable): compreso tra 1E-03 e 1E-06/anno.
- Rischio ampiamente accettabile: <1E-06/anno. [54]

4.7.1 Standard in evoluzione

In seguito alla versione più recente del report IOGP, ci sono stati degli sviluppi importanti negli studi API, DNV e HSE.

Nel documento “CO₂ Emergency Response Tactical Guidance Document” dell’API (aggiornato a novembre 2023) si stabilisce un “livello di esposizione della comunità per un rientro sicuro”, pari a 5000 ppm di CO₂, concentrazione che coincide con i limiti occupazionali TWA, ma il contesto di applicazione è differente. Infatti, non si tratta di un limite per l’esposizione del personale, bensì di una soglia di sicurezza per la popolazione generale in un contesto post-incidente. Questo valore rappresenta, quindi, un livello conservativo per la definizione di zone di impatto per disagi alla comunità, da utilizzare in QRA che mirano a valutare conseguenze non letali. [51]

Dagli studi di DNV e HSE sono emersi nuovi dati di letalità che dimostrano che la CO₂ risulta letale anche a concentrazioni in cui c’è ancora abbastanza ossigeno per respirare, in quanto il danno è

causato da un'acidosi respiratoria acuta, ovvero un'alterazione del pH del sangue. [52]

Con questi nuovi dati a disposizione, diventa possibile realizzare una QRA a più livelli, tenendo in considerazione diverse zone di pericolo con conseguenze specifiche. In Tabella 16 vengono comparate le diverse soglie di esposizione e la loro applicabilità in un'analisi QRA.

Fonte/ standard	Concentrazione CO₂ [ppm]	Tempo di esposizione	Applicabilità QRA
OSHA	5000	8 ore	TWA per scenari non acuti
NIOSH	5000	10 ore	TWA per scenari non acuti
NIOSH	30000	15 minuti	STEL per esposizioni occupazionali brevi
NIOSH	40000	30 minuti	IDLH conservativo non per fatalità
API	<5000	Continuo	Livello per rientro sicuro della comunità
DNV/HSE	~70000	15-20 minuti	SLOT per la stima di danni gravi e possibili fatalità
DNV/HSE	105000	10 minuti	SLOD per la stima delle fatalità

Fonte/ standard	Concentrazione CO₂ [ppm]	Tempo di esposizione	Applicabilità QRA
DNV/HSE	>150000	1 minuto	Livello di coma e morte per scenari di esposizione a concentrazioni molto elevate vicino alla fonte

Tabella 16. Confronto delle soglie di esposizione e applicabilità alla QRA [26] [29] [51] [52]

4.7.2 Rischio sociale

Il rischio sociale è il rischio per la società (comunità, aree residenziali, dominio pubblico non connesso all'impianto) derivante dalle operazioni svolte nell'impianto ed è definito come la relazione tra la frequenza di un possibile incidente (espressa come numero di eventi all'anno) e le conseguenze che ne derivano (esprese come numero di decessi all'anno). Il rischio sociale viene rappresentato graficamente tramite le curve F-N, che mostrano la frequenza cumulativa (F) di incidenti che causano N o più fatalità. Dalle curve F-N proposte da DNV derivano due livelli per il rischio sociale:

- Frequenza intollerabile: 1 fatalità ogni 10000 anni.
- Frequenza ampiamente accettabile: 1 fatalità ogni 1000000 di anni.

DNV non propone uno standard universale, bensì un approccio basato sull'utilizzo della QRA, sulla suddivisione del rischio in tre regioni

(inaccettabile, tollerabile e ampiamente accettabile) e sulla centralità del principio ALARP, che consiste nel dimostrare che i rischi siano stati ridotti al livello più basso ragionevolmente praticabile. Le curve F-N definiscono proprio i limiti della regione ALARP, ma dipendendo dal contesto specifico di ogni attività, variando a seconda di:

- Normative nazionali e locali.
- Beneficio sociale ed economico: il livello di rischio che una società è disposta ad accettare dipende dal beneficio che l'attività considerata porta alla società stessa.
- Benchmark di settore: per gli impianti che trattano CO₂ non esiste ancora un unico benchmark di settore, ma si può definire un benchmark metodologico. Da alcuni studi dell'HSE del Regno Unito, si può affermare che il livello di rischio dei gasdotti di gas naturale ad alta pressione e quello dei gasdotti di CO₂ in fase densa o supercritica sia simile; perciò, la categorizzazione del pericolo dell'anidride carbonica è uguale a quella usata per il gas naturale. [55]

Quindi, il benchmark per gli impianti che trattano CO₂ consiste in un approccio alla gestione della sicurezza che si basa sull'analogia con i gasdotti di gas naturale ad alta pressione, sull'applicazione di standard quali DNV-RP-J202 e DNV-RP-F104 e sulla conduzione di una QRA dettagliata, che si concentra sulla dispersione e sulla valutazione del danno tramite equazioni probit o DTL (Dangerous Toxic Load).

5. Analisi QRA e discussione dei risultati

Sebbene la tecnologia BECCS sia fondamentale per il conseguimento degli obiettivi climatici, è comunque emergente ed innovativa, per cui richiede un'attenta valutazione del rischio anche per ottenere l'assenso sociale.

In questo capitolo verranno ripercorsi gli step descritti nella metodologia per la realizzazione dell'analisi QRA, analizzandone i risultati ottenuti.

In linea con l'obiettivo dell'analisi critica dell'applicazione di uno studio QRA ad un impianto che tratta CO₂, dopo l'identificazione delle sezioni isolabili ne verranno analizzate nel dettaglio soltanto alcune, in modo da osservare i risultati per tutte le configurazioni possibili:

- Diversa percentuale di CO₂ contenuta nel fluido;
- CO₂ allo stato gassoso e allo stato liquido;
- Rilasci incidentali indoor e outdoor.

5.1 Sezioni isolabili e punti di rilascio

Dall'analisi dei P&ID sono state identificate 41 sezioni isolabili, di cui 23 attraversate da un fluido gassoso e 18 attraversate da un fluido liquido; in particolare, 2 sezioni contengono gasolio, 4 contengono un fluido misto e le restanti 35 contengono CO₂ pura.

Come detto in precedenza, in questo capitolo ne verranno analizzate solo alcune, in modo da comprendere tutte le configurazioni possibili:

- 3_G: sezione isolabile indoor attraversata da un fluido gassoso misto che contiene il 2% di CO₂.
- 4_G: sezione isolabile divisa in una parte indoor e una outdoor, attraversata da un fluido gassoso misto che contiene il 15% di CO₂.
- 5_G: sezione isolabile sia indoor che outdoor, attraversata da un fluido gassoso misto che contiene l'80% di CO₂.
- 3_G_UL: sezione isolabile outdoor attraversata da un fluido gassoso di CO₂ pura.
- 3_L_UL: sezione isolabile outdoor attraversata da un fluido liquido di CO₂ pura.
- 1G_D_UL: sezione isolabile indoor attraversata da un fluido gassoso di CO₂ pura.

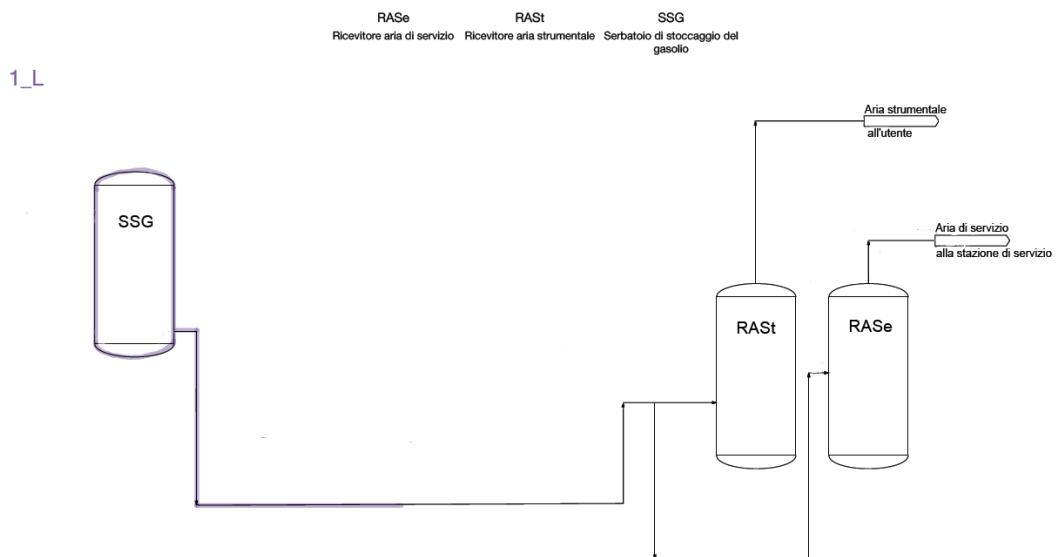
In Tabella 17 è possibile osservare le caratteristiche principali delle sezioni isolabili che verranno analizzate in questo capitolo; in particolare, nel nome della sezione, la "G" indica che il fluido è gassoso, mentre la "L" indica che il fluido è liquido. Il numero dei fluidi fa riferimento alla Tabella 8.

In Allegato 1 è possibile trovare la caratterizzazione delle restanti sezioni isolabili.

Sezione isolabile	Tipologia	Fluido	Componenti
3_G	Puntuale	2	Espansore gas di combustione (E); Scambiatori di calore a recupero (SCR-1/2)
4_G	Puntuale	3	Assorbitore HPC (A-HPC)
5_G	Puntuale	4	Stripper HPC (S-HPC)
3_G_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Unità di processo criogenica (UPC)
3_L_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Unità di processo criogenica (UPC)
1G_D_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Compressore CO ₂ (C-2); Scambiatori di calore interstadio del compressore di CO ₂ (SC-3/4)

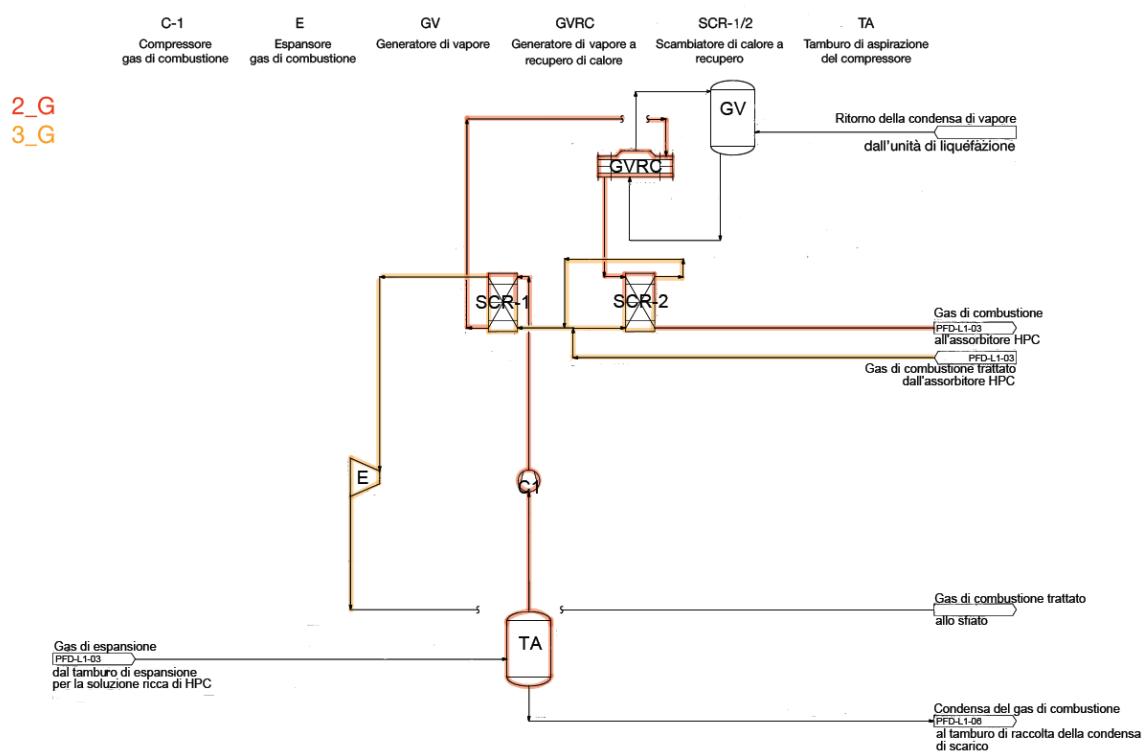
Tabella 17. Descrizione delle sezioni isolabili

Per questioni di riservatezza i P&ID dell'impianto non verranno riportati in questo elaborato, ma per maggiore chiarezza, nelle seguenti figure è possibile osservare la divisione delle sezioni isolabili sui PFD, in cui ogni sezione è identificata con un colore diverso.



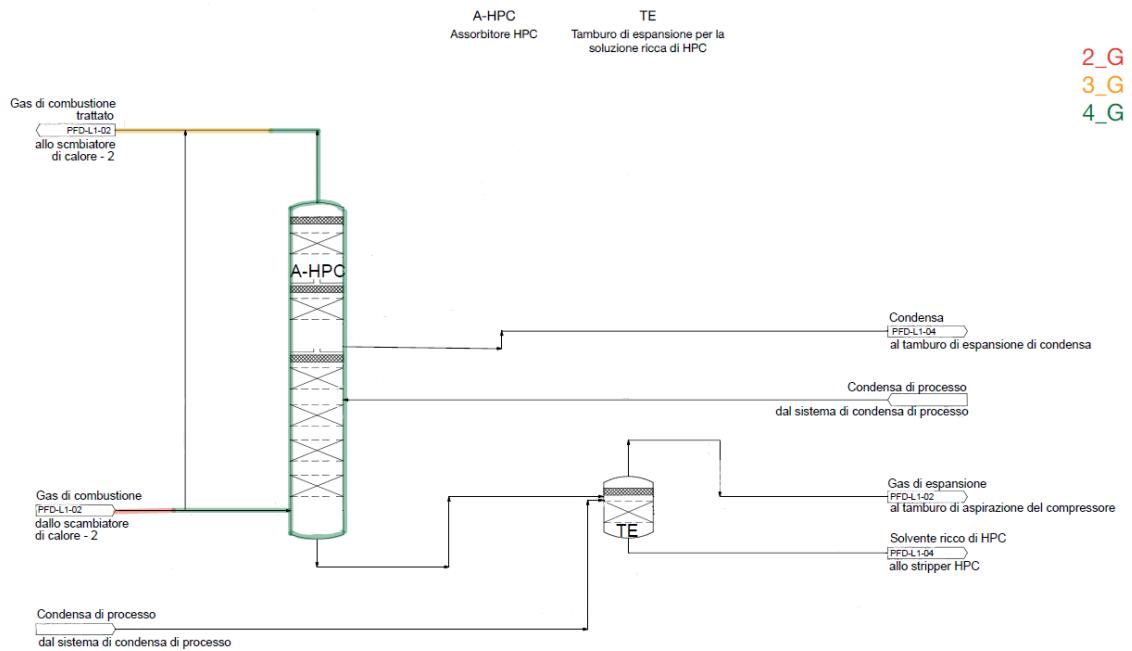
PFD-L1-01

Figura 28. Sezione isolabile 1_L



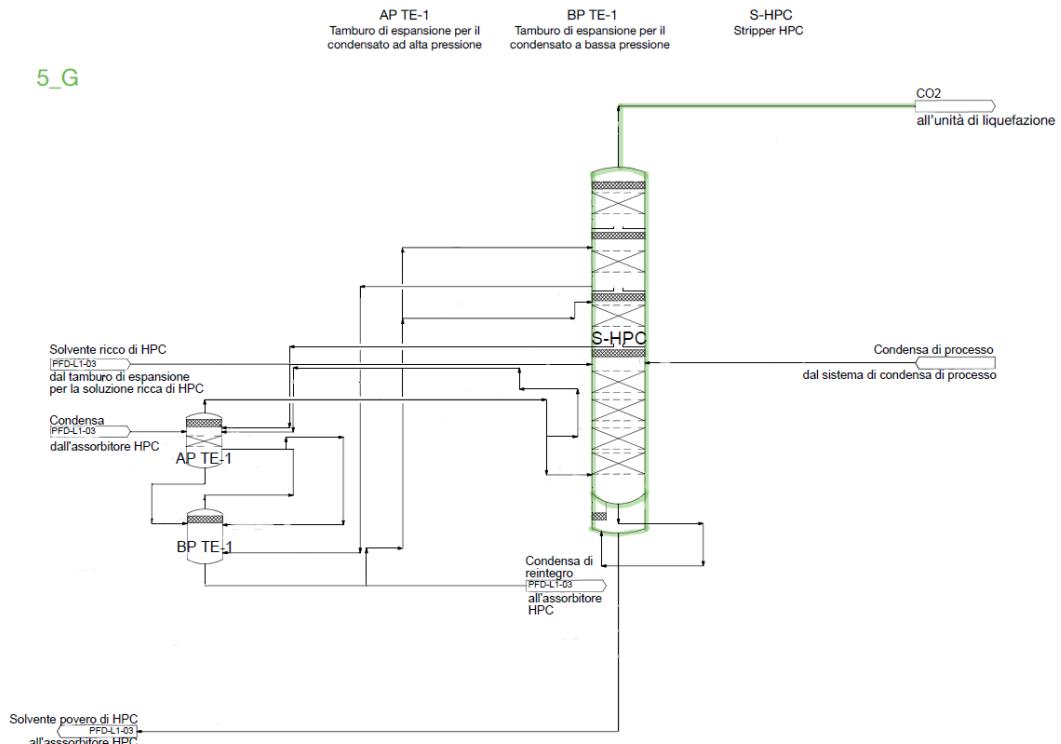
PFD-L1-02

Figura 29. Sezioni isolabili 2_G, 3_G



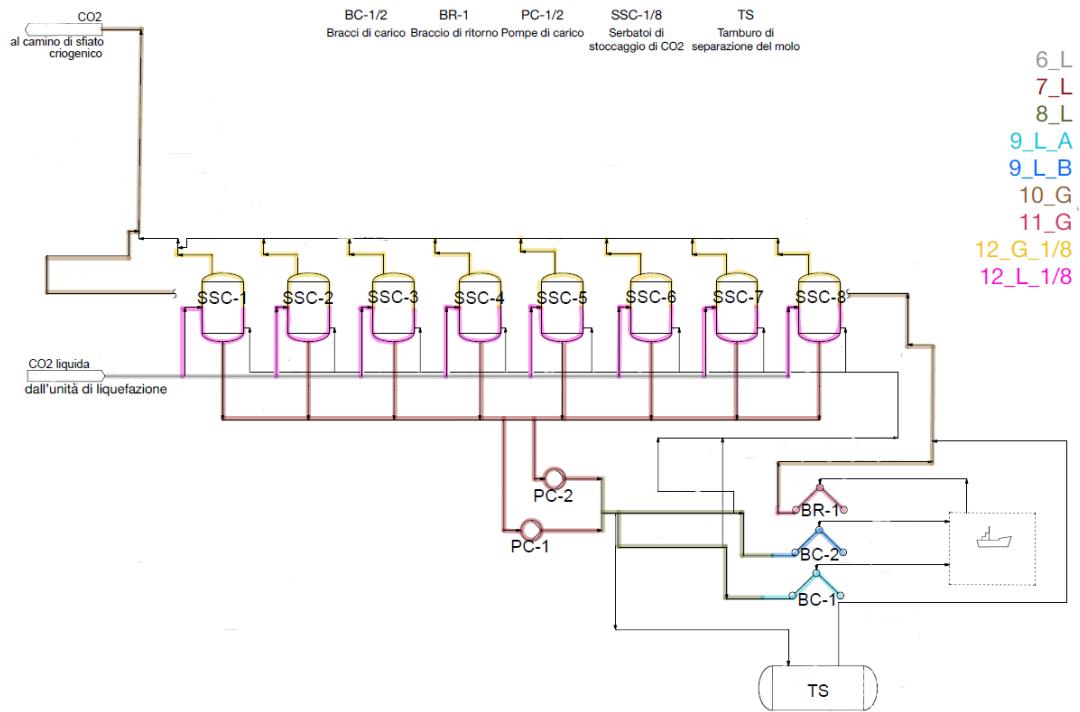
PFD-L1-03

Figura 30. Sezioni isolabili 2_G, 3_G, 4_G



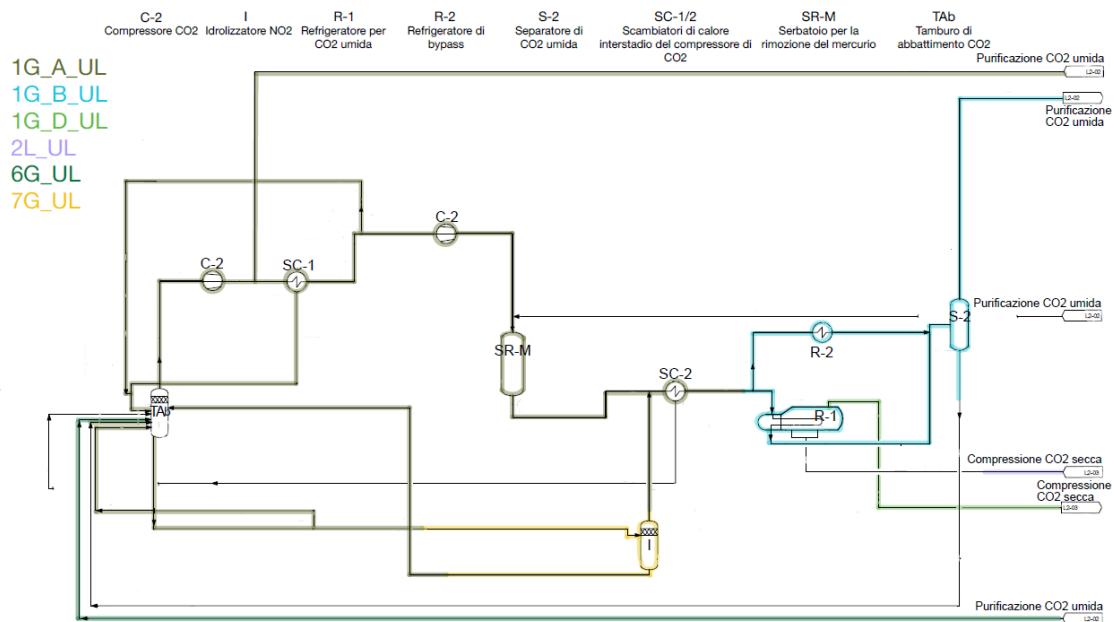
PFD-L1-04

Figura 31. Sezione isolabile 5_G



PFD-L1-07

Figura 32. Sezioni isolabili da 6_L a 12_L8



PFD-L2-01

Figura 33. Sezioni isolabili 1G_A_UL, 1G_B_UL, 1G_D_UL, 2_L_UL, 6_G_UL, 7_G_UL

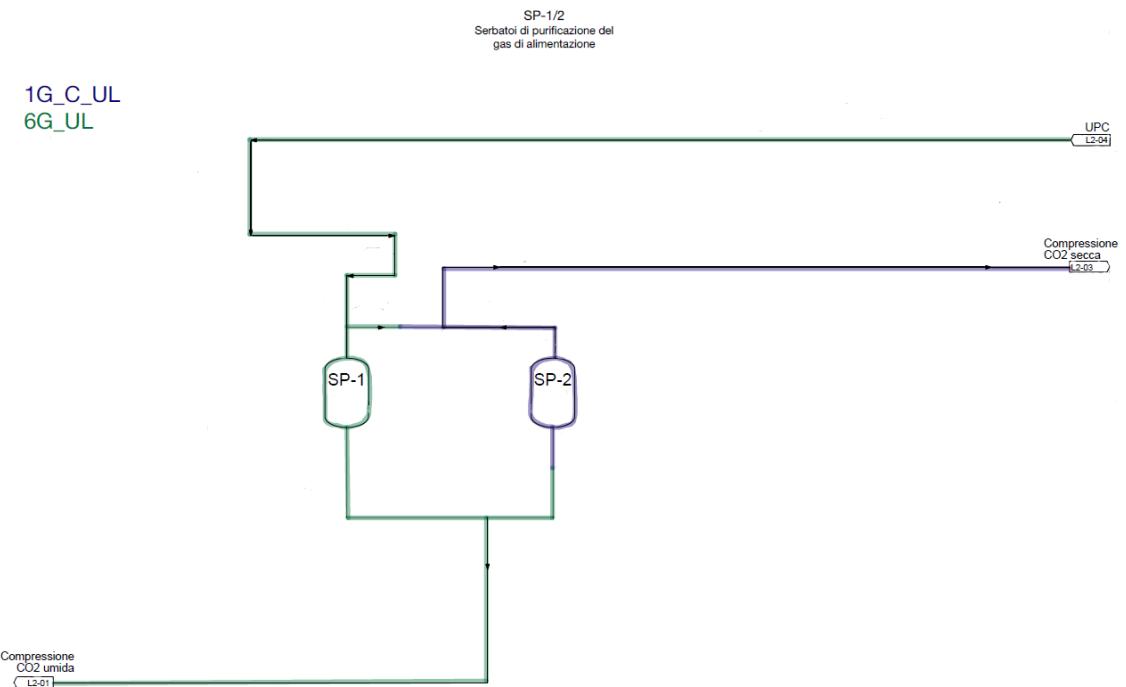


Figura 34. Sezioni isolabili 1G_C_UL, 6_G_UL

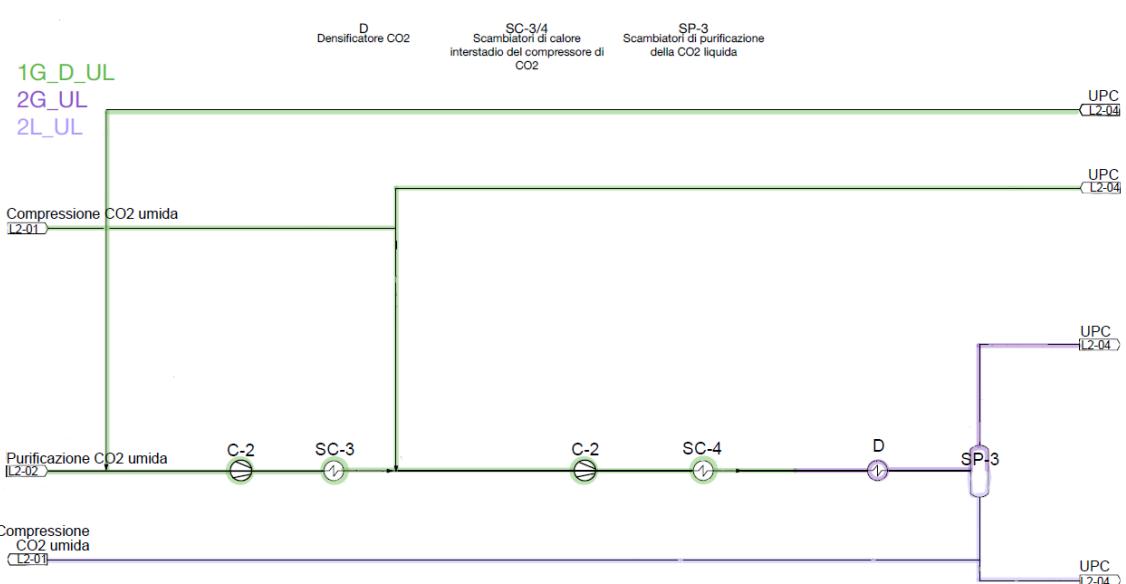


Figura 35. Sezioni isolabili 1G_D_UL, 2_G_UL, 2_L_UL

PFD-L2-03

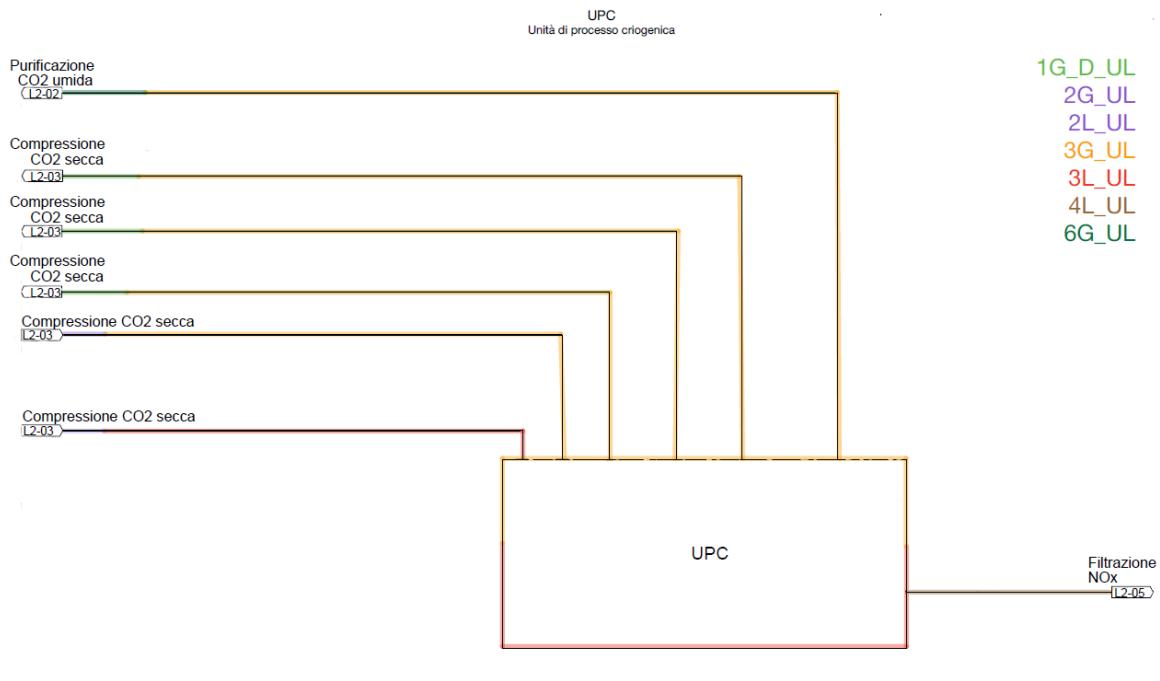


Figura 36. Sezioni isolabili 1G_D_UL, 2_G/2_L_UL, 3_G/3_L_UL, 4_L_UL, 6_G_UL

PFD-L2-04

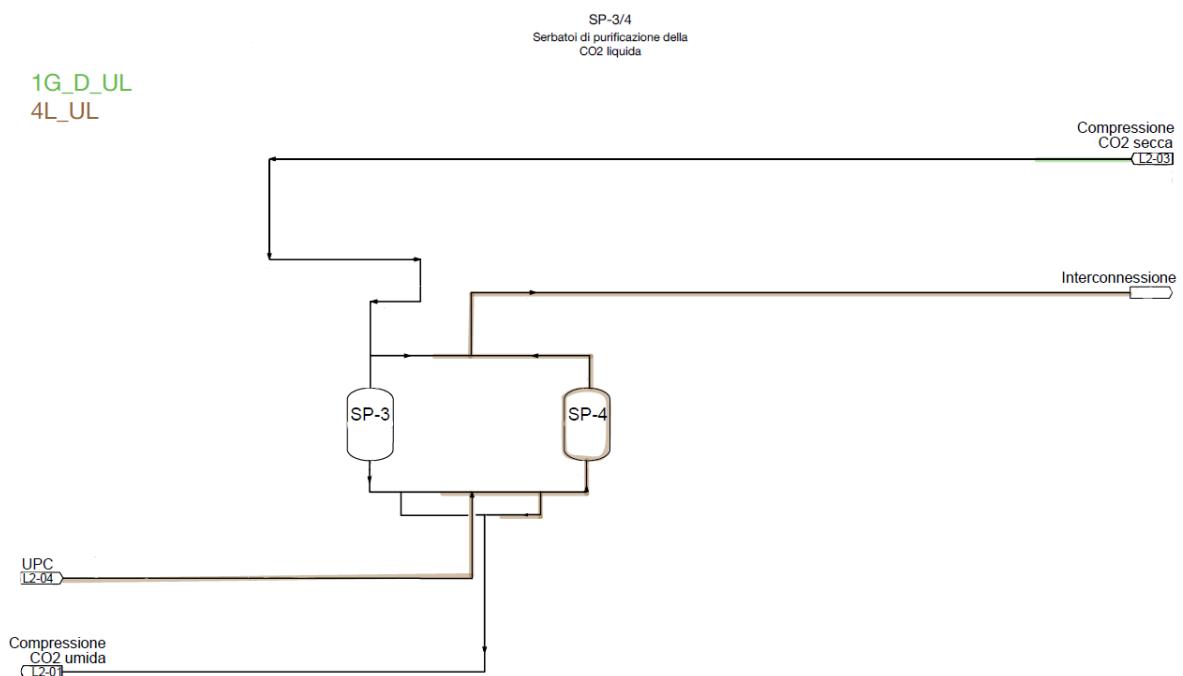


Figura 37. Sezioni isolabili 1G_D_UL, 4_L_UL

PFD-L2-06

In Tabella 18 sono elencati i punti di rilascio e le condizioni operative del fluido per le sezioni isolabili considerate, che costituiranno i dati in input per la modellazione su PHAST. Una rappresentazione grafica dei punti rilascio e la descrizione per le restanti sezioni isolabili sono presenti in Allegato 2.

La sezione 3_G è presente sia nella camera di compressione (3_G_a) che in quella di cattura (3_G_b), perciò, è stata divisa in due parti e la frequenza di rilascio per ogni parte è assunta pari alla metà della frequenza totale associata alla sezione.

Anche le sezioni 4_G e 5_G sono state divise in due parti, in quanto l'assorbitore e lo stripper hanno sia una parte indoor che una parte outdoor. In particolare:

- 4_G_indoor: il punto di rilascio è situato sull'assorbitore, all'interno della sala di cattura. L'altezza totale della colonna è pari a 100 metri, di cui 35 sono all'interno della stanza; di conseguenza, la frequenza di rilascio per la parte indoor sarà pari al 35% di quella totale associata alla sezione.
- 4_G_outdoor: il punto di rilascio è situato sulla parte esterna dell'assorbitore e la frequenza di rilascio per questa parte sarà pari al 65% della frequenza totale associata alla sezione, dato che la colonna si estende per 65 metri al di fuori della sala di cattura.
- 5_G_indoor: il punto di rilascio è situato sullo stripper, all'interno della sala di cattura. L'altezza totale della colonna è pari a 100 metri, di cui 35 sono all'interno della stanza; di conseguenza, la

frequenza di rilascio per la parte indoor sarà pari al 35% di quella totale associata alla sezione.

- 5_G_outdoor: il punto di rilascio è situato sulla parte esterna dello stripper e la frequenza di rilascio per questa parte sarà pari al 65% della frequenza totale associata alla sezione, dato che la colonna si estende per 65 metri al di fuori della sala di cattura.

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
3_G_a	Espansore gas di combustione (E)	Indoor	210	4	300
3_G_b	Valvola in uscita dall'assorbitore HPC (A-HPC)	Indoor	210	4	300
4_G_indoor	Assorbitore HPC (A-HPC)	Indoor	90	5	30000
4_G_outdoor	Assorbitore HPC (A-HPC)	Outdoor	90	5	30000
5_G_indoor	Stripper HPC (S-HPC)	Indoor	60	0,5	7000
5_G_outdoor	Stripper HPC (S-HPC)	Outdoor	60	0,5	7000
3_G_UL	Unità di processo	Outdoor	20	54	13000

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
	criogenica (UPC)				
3_L_UL	Unità di processo criogenica (UPC)	Outdoor	-50	54	36000
1G_D_UL	Tra gli scambiatori di calore interstadio del compressore di CO ₂ (SC-3/4)	Indoor	110	79	3000

Tabella 18. Descrizione dei punti di rilascio

5.2 Valutazione delle frequenze

Le frequenze di rilascio sono state calcolate considerando le frequenze di guasto base fornite dal database IOGP (report 434-1) e il numero dei componenti; la frequenza di ogni componente dipende dal suo diametro nominale.

Per un impianto BECCS di questo tipo si hanno diversi componenti: per comprendere la complessità di tale impianto il numero totale di alcuni di essi, calcolato come somma di quelli presenti in tutte le sezioni isolabili, è riportato in Tabella 19.

Componente	N° totale
Compressori	10
Espansori	5
Flange	915
Pompe	10
Scambiatori di calore	20
Serbatoi	20
Valvole	335

Tabella 19. Numero totale dei componenti per le sezioni isolabili dell'impianto

In particolare, i componenti presenti nelle sezioni analizzate in questo capitolo vengono elencati in Tabella 20.

	3_G	4_G	5_G	3_G_UL	3_L_UL	1G_D_UL
Compressori	0	0	0	0	0	1
Espansori	1	0	0	0	0	0
Flange	110	80	5	0	0	15
Pompe	0	0	0	0	1	0

	3_G	4_G	5_G	3_G_UL	3_L_UL	1G_D_UL
Scambiatori di calore	1	0	0	1	1	2
Serbatoi	0	1	1	1	1	0
Valvole	10	40	15	10	5	15

Tabella 20. Numero dei componenti presenti nelle sezioni isolabili analizzate

La lunghezza totale delle tubazioni di processo, invece, risulta essere di 2220 metri. In particolare, la lunghezza dei tubi delle sezioni analizzate in questo capitolo è riportata in Tabella 21.

	3_G	4_G	5_G	3_G_UL	3_L_UL	1G_D_UL
Lunghezza [m]	130	5	5	50	100	120

Tabella 21. Lunghezza delle tubazioni di processo delle sezioni isolabili analizzate

Le frequenze di perdita per le sezioni considerate sono riportate in Tabella 22; quelle relative alle restanti sezioni isolabili sono elencate in Allegato 3.

Sezione isolabile	Frequenza di perdita [ev/y]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
3_G_a	5,0E-03	8,0E-04	1,7E-04	2,4E-04
3_G_b	5,0E-03	8,0E-04	1,7E-04	2,4E-04
4_G_indoor	1,5E-03	2,5E-04	3,8E-05	1,6E-05
4_G_outdoor	2,9E-03	4,7E-04	7,1E-05	2,9E-05
5_G_indoor	9,4E-04	1,5E-04	2,6E-05	1,5E-05

Sezione isolabile	Frequenza di perdita [ev/y]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
5_G_outdoor	1,7E-03	2,8E-04	4,8E-05	2,9E-05
3_G_UL	2,1E-03	3,5E-04	9,2E-05	8,9E-05
3_L_UL	3,8E-03	8,6E-04	2,8E-04	3,9E-04
1G_D_UL	8,4E-03	1,4E-03	3,9E-04	4,2E-04

Tabella 22. Frequenze di perdita delle sezioni isolabili analizzate

La frequenza di dispersione è espressa in eventi all'anno [ev/y] ed è stata calcolata per tutti e quattro i fori presenti in Tabella 9 del paragrafo 4.3 per due scenari: il primo con intervento del sistema ESD e il secondo con guasto del sistema ESD.

Seguendo la costruzione dell'albero degli eventi (Figura 26, paragrafo 4.5), l'evento iniziatore, caratterizzato dalla frequenza di rilascio, si sviluppa in due rami:

- Il primo ramo prevede il mancato intervento del sistema ESD, per cui la frequenza di questo scenario sarà data da:

$$F_{sc1} = F_{rilascio} * PFD_{ESD}$$

- Il secondo ramo prevede il corretto intervento del sistema ESD, la cui probabilità è calcolata come $1 - PFD_{ESD}$, la quale rappresenta l'affidabilità del sistema. La frequenza dello scenario abbinato al secondo ramo è data da:

$$F_{sc2} = F_{rilascio} (1 - PFD_{ESD})$$

Per i sistemi ESD, un valore comune di PFD è pari a 1×10^{-2} , per cui le frequenze di dispersione per scenari con corretto intervento di ESD saranno date dalle frequenze di rilascio per gli scenari corrispondenti, moltiplicate per 0,99. Le frequenze di dispersione per gli scenari con guasto dell'ESD, invece, risulteranno due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle di rilascio.

Il secondo scenario è più gravoso in termini di conseguenze, ma la sua probabilità è estremamente bassa, in quanto dovrebbe esserci la rottura del componente e anche il guasto dell'ESD.

In Tabella 24 e Tabella 24 sono elencate, rispettivamente, le frequenze di dispersione per lo scenario con intervento dell'ESD e le frequenze di dispersione per lo scenario con guasto dell'ESD per le sezioni analizzate in questo capitolo. In Allegato 3 sono elencate le stesse frequenze per le restanti sezioni isolabili.

Sezione isolabile	Frequenza di dispersione [ev/y] con intervento ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
3_G_a	5,0E-03	7,9E-04	1,6E-04	2,4E-04
3_G_b	5,0E-03	7,9E-04	1,6E-04	2,4E-04
4_G_indoor	1,5E-03	2,5E-04	3,8E-05	1,6E-05
4_G_outdoor	2,8E-03	4,6E-04	7,0E-05	2,9E-05
5_G_indoor	9,3E-04	1,5E-04	2,5E-05	1,5E-05
5_G_outdoor	1,7E-03	2,8E-04	4,7E-05	2,8E-05
3_G_UL	2,1E-03	3,5E-04	9,1E-05	8,8E-05

Sezione isolabile	Frequenza di dispersione [ev/y] con intervento ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
3_L_UL	3,8E-03	8,5E-04	2,7E-04	3,9E-04
1G_D_UL	8,3E-03	1,4E-03	3,9E-04	4,2E-04

Tabella 23. Frequenze di dispersione con intervento di ESD per le sezioni isolabili analizzate

Sezione isolabile	Frequenza di dispersione [ev/y] con guasto ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
3_G_a	5,0E-05	8,0E-06	1,7E-06	2,4E-06
3_G_b	5,0E-05	8,0E-06	1,7E-06	2,4E-06
4_G_indoor	1,5E-05	2,5E-06	3,8E-07	1,6E-07
4_G_outdoor	2,9E-05	4,7E-06	7,1E-07	2,9E-07
5_G_indoor	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
5_G_outdoor	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
3_G_UL	2,1E-05	3,5E-06	9,2E-07	8,9E-07
3_L_UL	3,8E-05	8,6E-06	2,8E-06	3,9E-06
1G_D_UL	8,4E-05	1,4E-05	3,9E-06	4,2E-06

Tabella 24. Frequenze di dispersione con guasto ESD per le sezioni isolabili analizzate

5.3 Modellazione delle conseguenze per scenari outdoor

L'impatto della dispersione all'aperto è stato stimato in base alla distanza massima dal punto di rilascio alla quale vengono raggiunte le concentrazioni soglia e valutando la concentrazione media di CO₂ all'altezza di 1,5 metri prodotta da rilasci originati nell'area riportata in Figura 38.

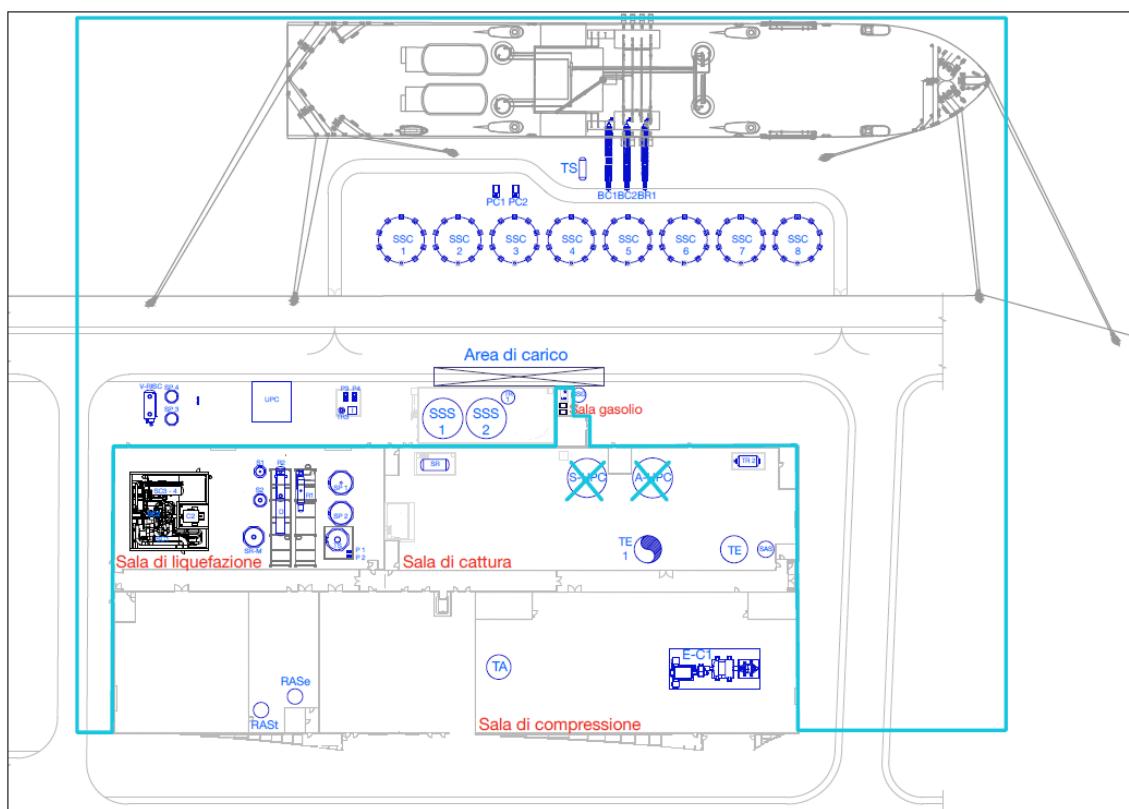


Figura 38. Area considerata per i rilasci outdoor

5.3.1 Scenari con guasto del sistema ESD

I componenti considerati per i punti di rilascio sono modellati su PHAST come serbatoi in pressione e per ogni serbatoio vengono inseriti i dati di input elencati nel paragrafo 4.6.2. Una volta modellato il componente,

si utilizza l'opzione "leak" per modellare il rilascio, impostando il diametro del foro. Quindi, ogni sezione isolabile avrà il corrispondente serbatoio in pressione e per ogni serbatoio saranno modellati 4 rilasci.

Nel caso di scenari senza intervento del sistema ESD, per visualizzare i risultati bisogna generare i grafici per ogni rilascio e considerare l'opzione "Max Footprint" per la dispersione, in modo da ottenere una visuale della nube dall'alto e la corrispondente distanza raggiunta nella direzione del vento.

Ad esempio, per le sezioni isolabili analizzate in questo capitolo, considerando un foro di 150 mm (caso peggiore) e una concentrazione di 105000 ppm, si ottengono i grafici mostrati in Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42, dove in blu è rappresentata la nube per le condizioni atmosferiche 5D e in verde quella per le condizioni atmosferiche 2F.

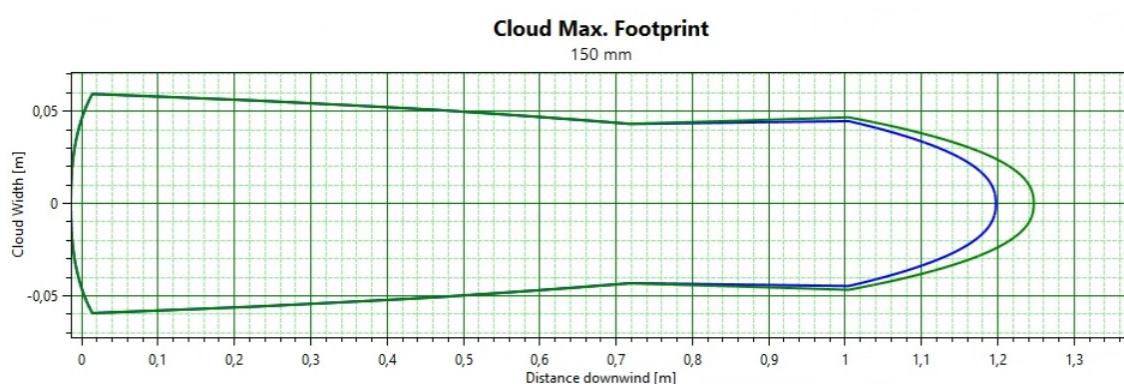


Figura 39. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 4_G

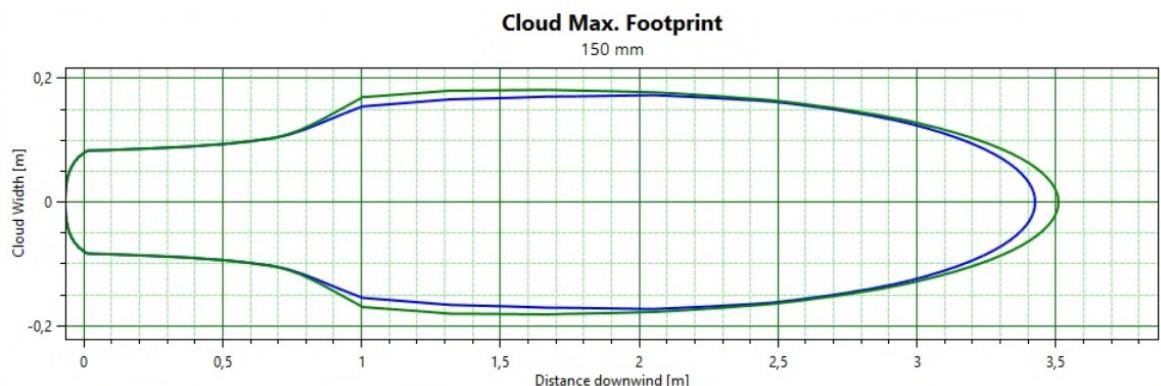


Figura 40. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 5_G

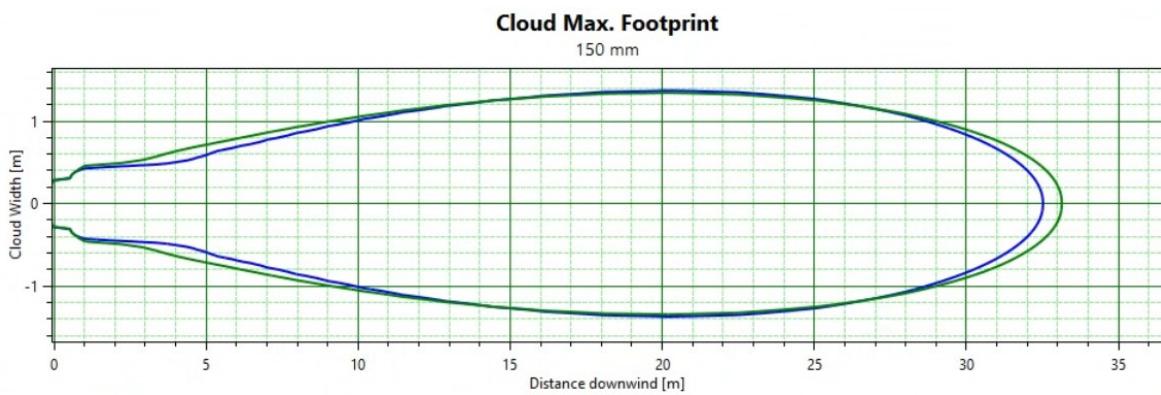


Figura 41. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 3_G_UL

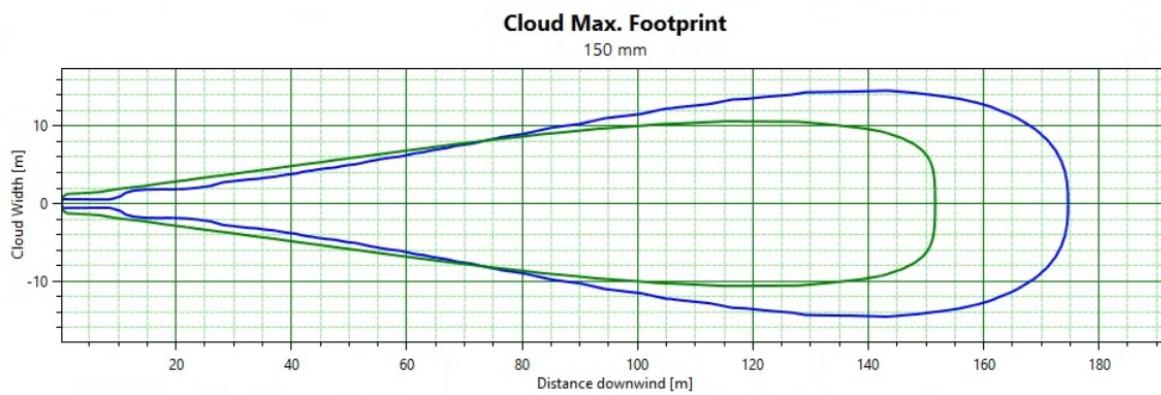


Figura 42. Max Footprint senza intervento ESD, sezione isolabile 3_L_UL

Ai fini dell'analisi, vengono considerate le lunghezze delle nubi soltanto per il caso peggiore tra un rilascio in condizioni 5D e un rilascio in

condizioni 2F. In Tabella 25 sono riportate le lunghezze delle nubi causate da un rilascio senza intervento di ESD per le sezioni isolabili 4_G, 5_G, 3_G_UL e 3_L_UL per tutti e 4 i fori e soltanto per le condizioni atmosferiche peggiori, considerando una concentrazione di 105000 ppm.

È possibile, per alcuni fori, che lo scenario di rilascio duri meno del tempo di esposizione da considerare per le concentrazioni soglia o che la dispersione causi delle concentrazioni inferiori a quelle di soglia. In questi casi il risultato viene indicato, rispettivamente, con “–” o con “n.a.”. In Allegato 4 sono riportate le lunghezze delle nubi per ogni sezione isolabile e per tutte le concentrazioni soglia.

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n.a.	n.a.	1,2
5_G	-	0,7	2,4	3,5
3_G_UL	1,4	5,0	20,9	33,1
3_L_UL	4,3	21,1	105,7	174,6

Tabella 25. Lunghezza della nube per rilascio senza intervento ESD, 105000 ppm

Come è possibile notare, i risultati peggiori si hanno, in generale, per un foro di 150 mm, mentre la nube raggiunge una lunghezza maggiore per le due sezioni caratterizzate da pressioni più alte, temperature più basse e un fluido composto dal 100% di CO₂. In generale, osservando anche le tabelle in Allegato 4, si nota come le nubi causate da un rilascio di CO₂ liquida siano caratterizzate da lunghezze maggiori.

5.3.2 Scenari con intervento del sistema ESD

I componenti vengono modellati come per gli scenari senza intervento del sistema ESD ma, per modellare il rilascio, si utilizza l'opzione "time varying release".

Una volta fatte girare le simulazioni, per visualizzare i risultati bisogna generare i grafici per ogni rilascio e considerare l'opzione "side view" per la dispersione, in modo da ottenere una visione laterale della nube. Nella sezione delle conseguenze si seleziona la concentrazione di interesse e, successivamente, nella sezione di "animation" si fa girare l'animazione, che mostra l'evolversi della nube. Tra i risultati in output c'è il tempo di residenza nella nube, a cui vengono aggiunti i 120 secondi per tenere in considerazione l'intervento dell'ESD. Se questo tempo totale supera i 600 secondi per una concentrazione di 105000 ppm, i 1680 secondi per una concentrazione di 120000 ppm o i 180 secondi per una concentrazione di 150000 ppm, allora si procede a misurare la lunghezza della nube come nel caso del rilascio senza intervento del sistema ESD.

In Figura 43 e Figura 44 è possibile osservare i grafici ottenuti per due delle sezioni isolabili analizzate in questo capitolo, per un rilascio da un foro di 150 mm e una concentrazione di 105000 ppm.

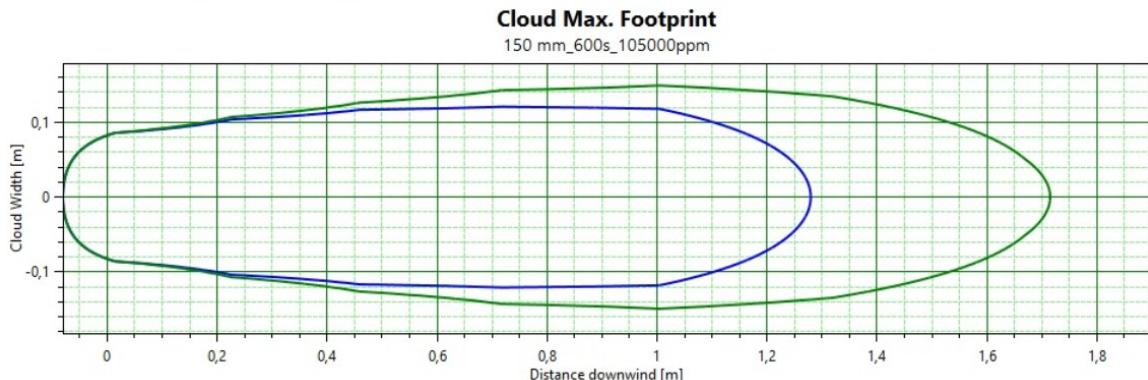


Figura 43. Max Footprint con intervento ESD, sezione isolabile 5_G

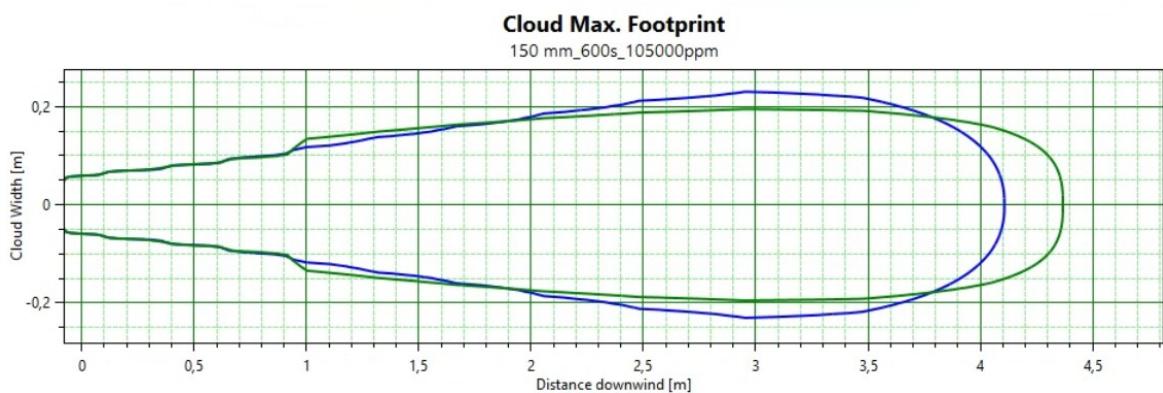


Figura 44. Max Footprint con intervento ESD, sezione isolabile 3_G_UL

Come è possibile notare già dai grafici, la lunghezza delle nubi per scenari di rilascio con intervento del sistema ESD è minore rispetto a quella per scenari di rilascio con guasto dell'ESD, in quanto il compito di questo sistema è proprio quello di mettere in sicurezza l'impianto, proteggendo il personale, le strutture e l'ambiente.

In Tabella 26 sono riportate le lunghezze delle nubi causate da un rilascio con intervento del sistema ESD per le sezioni isolabili 4_G, 5_G, 3_G_UL e 3_L_UL per tutti e 4 i fori e soltanto per le condizioni

atmosferiche peggiori, considerando una concentrazione di 105000 ppm.

È possibile, per alcuni fori, che lo scenario di rilascio duri meno del tempo di esposizione da considerare per le concentrazioni soglia o che la dispersione causi delle concentrazioni inferiori a quelle di soglia. In questi casi il risultato viene indicato, rispettivamente, con “–” o con “n.a.”. In Allegato 4 sono riportate le lunghezze delle nubi per ogni sezione isolabile e per tutte le concentrazioni soglia.

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n.a.	n.a.	n.a.
5_G	-	0,6	1,2	1,7
3_G_UL	1,4	4,2	4,3	4,4
3_L_UL	4,3	21,0	-	-

Tabella 26. Lunghezza della nube per rilascio con intervento ESD, 105000 ppm

5.4 Modellazione delle conseguenze per scenari indoor

L'impatto della dispersione all'interno dell'impianto è stato stimato valutando la concentrazione media di CO₂, a 1,5 metri di altezza dal suolo, prodotta da rilasci originati nelle sale di compressione, cattura e liquefazione, mostrate in Figura 45.

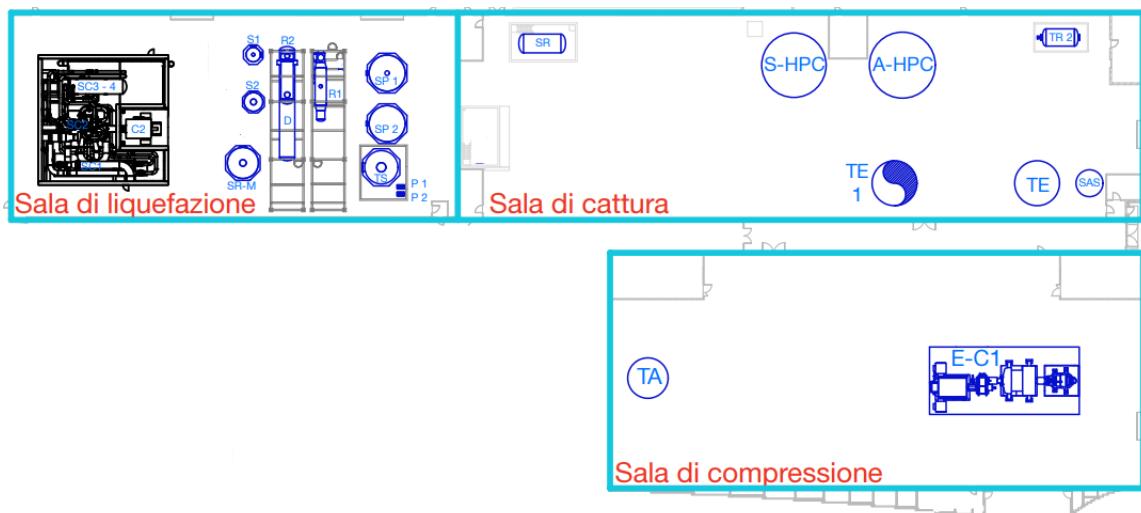


Figura 45. Area considerata per i rilasci indoor

Nel caso dei rilasci indoor, i risultati vengono presi nello stesso modo sia per gli scenari con intervento del sistema ESD che per quelli con guasto del sistema ESD.

Nella sezione “Map” vengono definiti, nella cartella “Building”, tutti gli scenari riportati in Tabella 12 del paragrafo 4.6.5, impostando un’altezza delle sale pari a 2 metri. Nonostante questo valore sia molto inferiore rispetto all’altezza effettiva delle strutture, viene scelto per dare un peso

maggiore al fatto che l'anidride carbonica sia più pesante dell'aria e per ottenere, quindi, dei risultati conservativi.

I componenti e i rilasci indoor vengono modellati allo stesso modo dei rilasci outdoor, ma per ogni componente deve essere selezionato l'edificio di rilascio tra quelli generati precedentemente nella sezione "Map".

Una volta eseguite tutte le simulazioni, i risultati sono reperibili sul report generato da PHAST, nella sezione "In-Building" per l'opzione "Equipment": qui è presente una tabella che riporta i valori medi di concentrazione per diversi istanti di tempo. Il risultato consisterà nella concentrazione massima raggiunta se:

- Una concentrazione ≥ 105000 ppm è presente per più di 600 secondi;
- Una concentrazione ≥ 120000 ppm è presente per più di 1680 secondi;
- Una concentrazione ≥ 150000 ppm è presente per più di 180 secondi;
- È presente una concentrazione ≥ 280000 ppm.

In caso contrario, lo scenario non è in grado di produrre una concentrazione tossica.

In Tabella 27 sono riportati i risultati per gli scenari senza intervento dell'ESD e con corretto intervento del sistema di ventilazione forzata di emergenza per le sezioni isolabili in grado di produrre delle concentrazioni tossiche per la sala di cattura e la sala di liquefazione.

Se la concentrazione raggiunta non è tossica, viene indicata con "-".

Sala di cattura – 0,8 ACPH	Concentrazione tossica [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
3_G	-	-	-	-
4_G	-	-	305465	684825
5_G	-	-	-	-
Sala di liquefazione – 1,7 ACPH				
1G_D_UL	-	-	-	-

Tabella 27. Concentrazioni tossiche prodotte da rilasci con intervento dell'ESD per le sale di cattura e liquefazione

Tra le sezioni analizzate, l'unica in grado di produrre una concentrazione tossica è la 4_G.

In Allegato 5 vengono riportati gli scenari di tutte le sezioni isolabili indoor per tutti i casi elencati in Tabella 12 del paragrafo 4.6.5.

Dai risultati si nota che quasi tutte le sezioni isolabili producono una concentrazione tossica per lo scenario con mancato intervento dell'ESD e assenza di ventilazione forzata. Già passando allo scenario con guasto dell'ESD e presenza di ventilazione forzata, le concentrazioni prodotte non risultano più tossiche.

Le sezioni isolabili 2_G_UL e 2_L_UL rappresentano un caso particolare, in quanto per lo scenario con guasto del sistema ESD e presenza di ventilazione forzata, per un rilascio da fori di 100 mm e 150 mm, producono ugualmente una concentrazione in grado di saturare la stanza come per lo scenario di mancato intervento dell'ESD e assenza di ventilazione forzata. Per lo scenario con intervento del sistema ESD e presenza di ventilazione forzata, un rilascio da fori di 100 mm e 1500 mm

per la sezione 2_G_UL è comunque in grado di produrre delle concentrazioni tossiche.

Oltre all'altezza della sala posta pari a 2 metri, questo risultato può essere dovuto al fatto che queste due sezioni isolabili sono state spostate dall'esterno all'interno dell'impianto e il numero di ACPH definito negli studi precedenti non è stato modificato. Questo risultato non influisce sui valori di IRPA finali, ma sarebbe un buon accorgimento aumentare il numero di ACPH per la sala di liquefazione.

5.5 Valutazione del rischio per scenari outdoor

Come anticipato nel paragrafo 4.6.1, la ricomposizione del rischio è stata eseguita tramite un tool implementato sul software Excel con l'obiettivo di ottenere i valori di LSIR. Questa procedura prende il nome di "mappatura", in quanto restituisce come output la mappa dell'impianto colorata in modo diverso a seconda dell'LSIR calcolato per ogni zona.

Per la mappatura outdoor i dati in input sono:

- Lunghezze delle nubi ottenute nello step precedente dalla modellazione su PHAST.
- Frequenze di dispersione per ogni scenario outdoor (per tutti e 4 i fori e per ogni concentrazione soglia) corrette per tener conto del fatto che la dispersione avviene in direzioni diverse; in questo caso le frequenze sono state divise per 4.
- Immagine scalata dell'impianto, per cui ogni cella di Excel corrisponde a 1 metro.
- Perimetro dell'impianto, barriere fisiche presenti e indicazione dei punti di rilascio.

Una volta ottenuti i valori di LSIR totali, questi vengono moltiplicati per il tempo di esposizione, considerato pari al 10% del tempo operativo, per ottenere i valori di IRPA. Questo valore specifico del 10% è stato considerato perché, non avendo dati specifici riguardo l'occupazione, si è ipotizzato che il personale non si trovi nell'area di processo 24 ore su 24, 7 giorni su 7. In particolare, questo impianto è di tipo "unmanned",

ovvero il personale è collocato nelle sale di controllo da cui monitora e gestisce il processo, invece che nell'area di processo vera e propria, in cui si trova soltanto per effettuare delle ispezioni, manovre di routine o operazioni manutentive.

Facendo riferimento alla classificazione del rischio:

- Rischio intollerabile: >1E-03/anno (rosso)
- Rischio tollerabile se ridotto al livello ALARP: compreso tra 1E-03 e 1E-06/anno (giallo)
- Rischio ampiamente accettabile: <1E-06/anno (verde)

In Figura 46 è mostrata la mappa IRPA outdoor colorata in base ai risultati ottenuti, mentre in Tabella 28 sono riportati i valori di IRPA ottenuti.

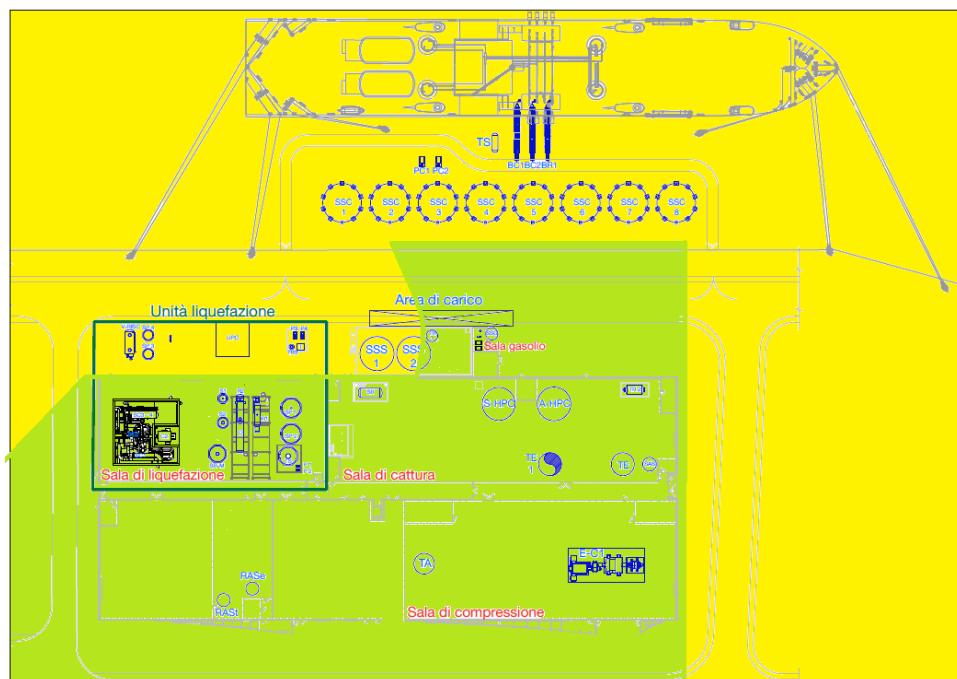


Figura 46. Mappa IRPA outdoor

Area	IRPA medio [ev/y]
Area Nord	4,0E-05
Area Sud	8,9E-07

Tabella 28. IRPA medio per scenari outdoor

I valori di LSIR ottenuti ricadevano nella fascia del rischio inaccettabile per le sezioni isolabili che comprendono i serbatoi di stoccaggio della CO₂ e per quelle che comprendono l'unità di processo criogenico; ma, considerando il fattore di occupazione, il valore del rischio è ridotto a valori accettabili.

In accordo con i criteri di tollerabilità definiti nel paragrafo 4.7, i valori di IRPA outdoor rientrano nella zona ALARP.

In particolare, si può notare che l'area sud è caratterizzata da un valore di IRPA minore rispetto a quello dell'area nord; questo perché, tra le due aree, è presente un muro protettivo vista la presenza dei serbatoi di stoccaggio della CO₂, che rappresentano gli elementi più critici dell'impianto, in quanto contengono la sostanza pericolosa sia allo stato gassoso che liquido e genererebbero delle distanze di danno molto elevate in caso di rilascio incidentale.

5.6 Valutazione del rischio per scenari indoor

I dati richiesti in input per la mappatura indoor sono:

- Frequenze di rilascio per ogni scenario indoor in grado di produrre una concentrazione tossica.
- Immagine scalata dell'area considerata per i rilasci indoor, per cui ogni cella di Excel corrisponde a 1 metro.

Anche in questo caso, l'output consiste nella mappa fornita colorata in modo diverso a seconda dell'LSIR calcolato per ogni zona. Una volta ottenuti i valori di LSIR totali, questi vengono moltiplicati per il tempo di esposizione per ottenere i valori di IRPA e la mappa associata.

In Figura 47 sono mostrate le mappe IRPA indoor e in Tabella 29 sono riportati i valori di IRPA ottenuti.



Figura 47. Mappa IRPA indoor

Sala	IRPA [ev/y]
Sala di compressione	-
Sala di cattura	3,8E-06
Sala di liquefazione	3,0E-05

Tabella 29. IRPA per scenari indoor

Per la sala di compressione, il valore dell'IRPA risulta estremamente basso, per cui non viene considerato e l'area non viene colorata.

Si nota, invece, che l'IRPA per la sala di liquefazione risulta maggiore di quello della sala di cattura, il che rispecchia i risultati della parte outdoor per cui le conseguenze dei rilasci di CO₂ liquida causano conseguenze peggiori. Questo specifico risultato potrebbe dipendere, infatti, dalle condizioni operative più critiche del fluido nella sala di liquefazione o dalla specifica configurazione degli impianti in questa sala. Perciò, si può concludere che quest'area risulta prioritaria nell'attuazione di misure di controllo aggiuntive.

Inoltre, il fatto che quasi tutti gli scenari producono concentrazioni tossiche soltanto in assenza di ventilazione forzata e guasto dell'ESD, sottolinea l'importanza dell'affidabilità dei sistemi di ventilazione di emergenza e la necessità di una corretta manutenzione per tutti i sistemi di sicurezza attivi.

Anche in questo caso, come per gli scenari outdoor, i valori di IRPA ottenuti rientrano nella zona ALARP; questi risultati sono sicuramente rassicuranti, ma ciò non significa che il rischio sia trascurabile. Infatti, deve essere dimostrata l'implementazione delle misure di riduzione del rischio ragionevolmente praticabili, le quali devono rappresentare un equilibrio tra costi e benefici della sicurezza.

5.7 Valutazione del rischio sociale

Per la valutazione del rischio sociale sono state considerate le aree circostanti l'impianto e il numero di persone presenti in ognuna di essa; si sono poi selezionati gli scenari incidentali in grado di generare delle distanze di danno tali da impattare queste aree.

Gli scenari incidentali considerati consistono tutti in rilasci di CO₂ liquida da fori di 100 mm o 150 mm; in particolare, questi rilasci riguardano le sezioni isolabili 6_L, 7_L, 8_L, 12_L_1/8, 3_L_UL e 4_L_UL.

In questo caso le aree effettivamente impattate risultano essere 6 e sono rappresentate in Figura 48; il numero di persone presenti in queste aree è riportato in Tabella 30.

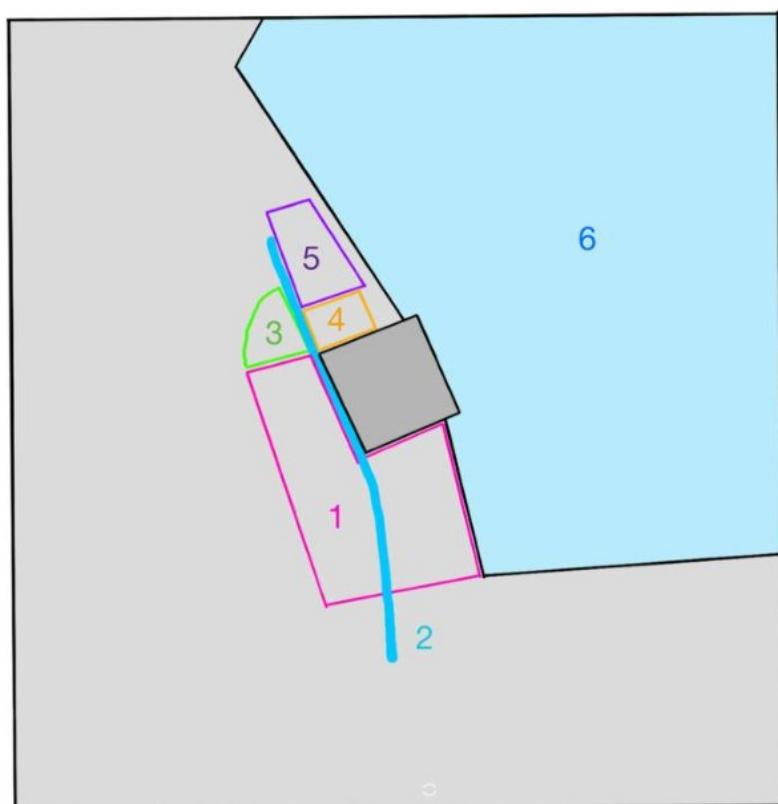


Figura 48. Aree impattate dagli scenari incidentali

Area	Orari	n° persone
1	7:00 - 17:00	40
	17:00 - 7:00	5
2	7:30 - 17:00	10
	17:00 - 7:30	5
3	7:00 - 17:00	5
4	7:00 - 17:00	5
5	7:00 - 17:00	35
	17:00 - 7:00	10
6	-	max 150

Tabella 30. Persone presenti nelle aree impattate dagli scenari incidentali

Per ogni area si considera soltanto la percentuale effettivamente impattata dallo scenario incidentale, la quale viene moltiplicata per il numero di persone presenti nell'area stessa in modo tale da ottenere il numero di potenziali morti. Le frequenze degli scenari di dispersione considerati, invece, vengono corrette per tenere in considerazione sia il fatto che i rilasci non avvengono in una sola direzione, sia il fatto che le persone non sono costantemente presenti in quelle aree. Questa correzione si ottiene moltiplicando le frequenze per il manning level, ovvero la percentuale di tempo all'anno in cui le persone sono presenti nell'area considerata.

Le frequenze corrette e il numero di morti per ogni scenario considerato costituiscono i dati in input per ogni area impattata, da inserire sul software Excel, il quale calcola una cumulata per le frequenze di dispersione e una cumulata per il numero di morti per ogni scenario incidentale e per ogni area.

Infine, viene calcolata una frequenza cumulata totale per ogni scenario incidentale e il numero di morti totali per lo stesso scenario.

La curva F-N totale ottenuta per questo studio è riportata in Figura 49.

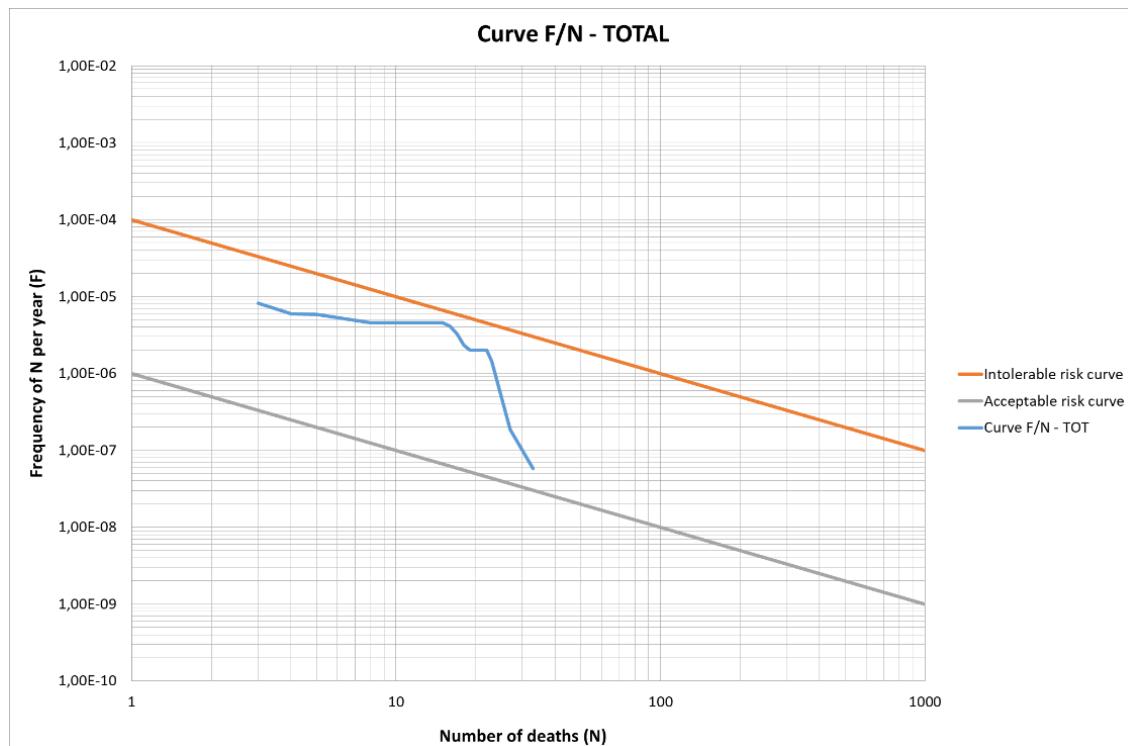


Figura 49. Curva F-N totale

Il numero maggiore di morti risulta essere di 40 persone e si raggiungerebbe in seguito ad un rilascio incidentale da un foro di 150 mm della sezione isolabile 4_L_UL senza intervento del sistema ESD.

Invece, per gli scenari che prevedono l'intervento del sistema ESD si raggiungerebbe un numero massimo di morti pari a 25, in seguito ad un rilascio da un foro di 150 mm delle sezioni isolabili 12_L_7 e 12_L_8.

Anche in questo caso, gli scenari peggiori si hanno in seguito ad un rilascio di CO₂ liquida, indicando nuovamente la necessità di

un'attenzione maggiore per le misure di sicurezza sulle porzioni di impianto che la contengono.

La curva F-N totale ottenuta si trova al di sotto della soglia di inaccettabilità, per cui il rischio sociale calcolato è accettabile, anche se non rientra nella zona di rischio ampiamente accettabile. Come per i risultati dell'IRPA, questo valore è rassicurante, ma indica che il rischio è accettabile soltanto se è stato effettivamente ridotto al livello più basso ragionevolmente praticabile. Dovrebbe essere dimostrato da chi di dovere, quindi, che la scelta del sito, i piani di emergenza, la progettazione dell'impianto e le procedure operative siano in grado di soddisfare questo requisito.

Per ottenere una rappresentazione grafica della cumulata delle frequenze e di come gli scenari incidentali impattano le aree esterne all'impianto, sono stati rappresentato su AutoCad proprio i valori delle frequenze cumulate per gli scenari che impattano le aree esterne all'impianto. In particolare, sono stati disegnati dei cerchi aventi per raggio la distanza di danno per ogni scenario incidentale e sono stati colorati in base alla seguente legenda:

Legend	
(events/year)	
>	1,00E-03
>	1,00E-04
>	1,00E-05
>	1,00E-06
<	1,00E-06

Figura 50. Legenda frequenze cumulate

I risultati sono riportati in Figura 51 e Figura 52.

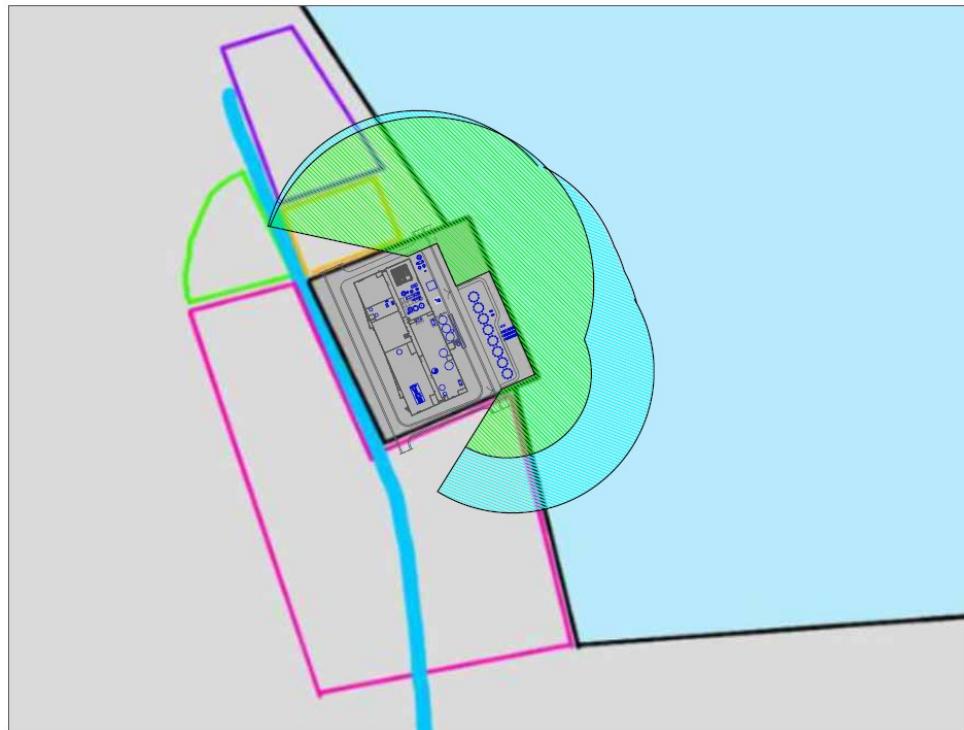


Figura 51. Frequenze cumulate senza intervento ESD



Figura 52. Frequenze cumulate con intervento ESD

Come si può notare, i risultati per gli scenari con intervento del sistema ESD risultano “peggiori” (aree rosse e gialle): questo è dovuto al fatto che, nonostante le conseguenze siano meno gravi di quelle per rilasci con guasto del sistema ESD, la frequenza di dispersione con corretto intervento del sistema di emergenza risulta essere maggiore perché l'ESD è caratterizzato da un'elevata affidabilità.

6. Risultati dell'analisi di sensitività

In questo capitolo verranno analizzati i risultati ottenuti dall'analisi di sensitività eseguita sul software DNV PHAST. A titolo esemplificativo e per tenere in considerazione le diverse concentrazioni di CO₂ e gli scenari di rilasci indoor e outdoor dell'anidride carbonica sia in fase gassosa che in fase liquida, sono state analizzate le seguenti sezioni isolabili:

- 3_G: indoor, 2% di CO₂;
- 4_G: sia indoor che outdoor, 15% di CO₂;
- 5_G: sia indoor che outdoor, 80%di CO₂;
- 3_G_UL: outdoor, 100% di CO₂;
- 3_L_UL: outdoor, 100% di CO₂;
- 1G_D_UL: indoor, 100% di CO₂.

Quest'analisi è stata svolta con il fine di indagare quali tra i parametri in input tra temperatura, pressione e inventario, pesano maggiormente sui risultati in output che sono stati modellati nella sezione precedente. Con questo studio, infatti, oltre ad analizzare le peculiarità dell'anidride carbonica, si può valutare la robustezza dei risultati della QRA considerando la fluttuazione delle condizioni operative dell'impianto. Inoltre, vista la novità che caratterizza le tecnologie CCS, con un'analisi di sensitività di questo tipo si può fornire anche una valutazione critica della metodologia QRA applicata, definendo i parametri che dominano le stime di rischio e che possono richiedere, di conseguenza, dei margini di sicurezza più ampi in fase progettuale. La CO₂ che circola in questo

tipo di impianti è caratterizzata da comportamenti termodinamici complessi, trovandosi vicino al punto triplo o al punto critico; per cui, è importante osservare come delle piccole variazioni delle condizioni operative possano o meno influenzare la dinamica del rilascio.

Per le sezioni isolabili indoor sono state monitorate le concentrazioni massime; per le sezioni isolabili outdoor 5_G, 3_G_UL e 3_L_UL, oltre alla lunghezza della nube, parametro calcolato e utilizzato per lo svolgimento della QRA, sono stati monitorati anche il volume, la temperatura di centreline e il tempo di residenza della nube, in modo da avere una visione completa delle conseguenze.

In particolare, la temperatura di centreline è la temperatura lungo l'asse centrale (centreline) della nube di CO₂ ed è considerabile, quindi, come una rappresentazione monodimensionale dell'evoluzione della temperatura. Questo profilo di temperatura è importante negli studi di rilascio dell'anidride carbonica, in quanto è in grado di indicare dove avvengono le trasformazioni fisiche e per quanto tempo durano, risultando utile nella definizione del termine sorgente. [57] Il volume della nube, invece, è stato preso in considerazione per avere anche una misura tridimensionale dell'estensione della nube stessa; questo dato, infatti, potrebbe servire alla valutazione dell'impatto di alcune aree semi-confinate.

Il tempo di residenza della nube, infine, è stato considerato per la stretta correlazione con le soglie di vulnerabilità, che dipendono, appunto, dalla durata dell'esposizione alla sostanza tossica.

6.1 Definizione del set di parametri in input

Per studiare delle variazioni dei parametri coerenti e realistiche, si è scelto un delta pari a $\pm 5\%$ e sono stati presi in considerazione più valori in modo tale da verificare anche se le variazioni dei dati in output seguissero un andamento lineare in funzione degli input.

L'analisi è stata svolta seguendo il metodo OFAT (One Factor At a Time), ovvero mantenendo costanti due dei tre parametri e modificando il terzo.

Per lo studio delle sezioni isolabili outdoor è stato considerato un rilascio da un foro di 150 mm con guasto del sistema ESD e i risultati sono stati presi per una concentrazione di 105000 ppm per le condizioni atmosferiche peggiori (2F per le sezioni con CO₂ gassosa e 5D per la sezione con CO₂ liquida).

Nello studio delle distanze di danno, visto che, come si vedrà successivamente nel paragrafo 6.2, l'impatto dell'inventario risulterà essere nullo, per tenere in considerazione l'interazione tra la temperatura e la pressione, sono state svolte delle simulazioni aggiuntive in cui l'inventario è mantenuto costante e gli altri due parametri seguono lo schema riportato in Tabella 31.

Variazione	Pressione	Temperatura
V-1	Basso	Basso
V-2	Alto	Alto
V-3	Basso	Alto
V-4	Alto	Basso

Tabella 31. Variazione dei parametri p e T per le sezioni isolabili outdoor

In questo schema, per “alto” si intende il valore di base aumentato del 5% e per “basso” si intende il valore di base diminuito del 5%.

Nello studio delle concentrazioni massime per le sezioni isolabili indoor, invece, visto che l’impatto di tutti e tre i parametri risulterà diverso da zero (paragrafo 6.7), per tenere in considerazione l’interazione tra temperatura, pressione e inventario, sono state svolte delle simulazioni che seguono lo schema in Tabella 32.

Per considerare il caso più realistico, i risultati sono stati presi per un rilascio da un foro di 150 mm all’interno della sala di cattura con intervento dell’ESD e 1,8 ACPH per le sezioni 3_G, 4_G e 5_G e da un foro di 150 mm all’interno della sala di liquefazione con intervento dell’ESD e 15 ACPH per la sezione 1G_D_UL.

Variazione	Pressione	Temperatura	Inventario
V-1	Alto	Alto	Alto
V-2	Basso	Alto	Alto
V-3	Alto	Basso	Alto
V-4	Alto	Alto	Basso
V-5	Basso	Basso	Basso
V-6	Basso	Basso	Alto
V-7	Basso	Alto	Basso
V-8	Alto	Basso	Basso

Tabella 32. Variazione dei parametri p , T e inventario per le sezioni isolabili indoor

6.2 Lunghezza della nube

La lunghezza della nube, importante per la definizione delle aree di danno, è stata calcolata come descritto nel paragrafo 5.3.1.

Dai risultati dell'analisi, la variazione della lunghezza della nube mostra un andamento lineare sia in funzione della pressione che della temperatura. In particolare, all'aumentare della pressione la lunghezza aumenta, mentre all'aumentare della temperatura la lunghezza diminuisce. Questi risultati sono riportati a titolo di esempio in Figura 53 e Figura 54 per la sezione isolabile 4_G, ma lo stesso comportamento è riscontrabile in tutte le sezioni isolabili.

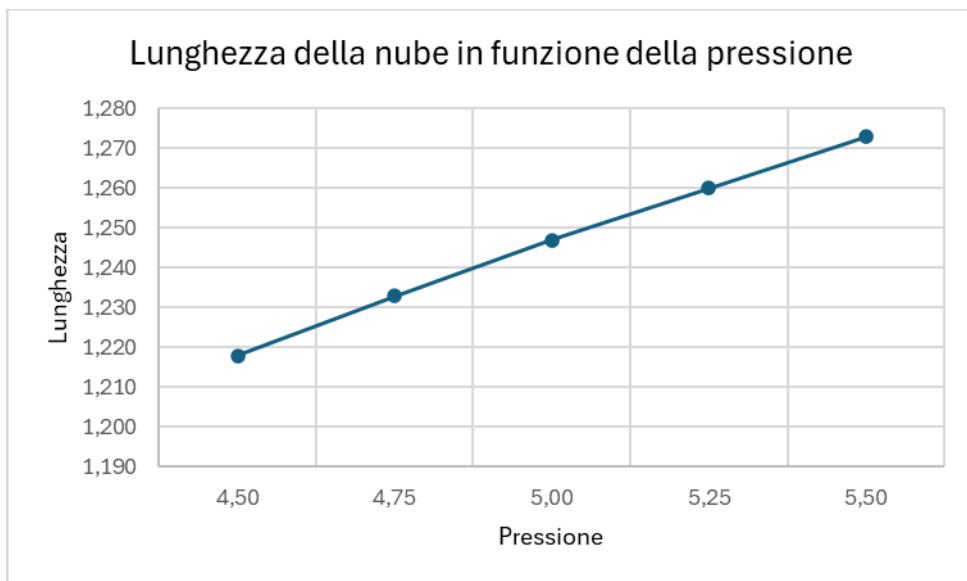


Figura 53. Lunghezza della nube in funzione della pressione, sezione isolabile 4_G

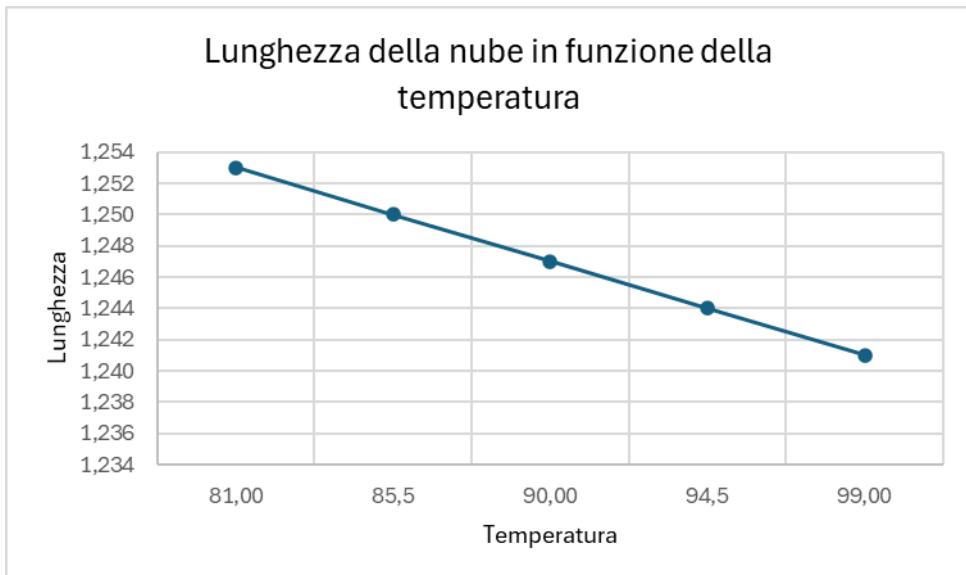


Figura 54. Lunghezza della nube in funzione della temperatura, sezione isolabile 4_G

La lunghezza della nube risulta essere inversamente proporzionale alla temperatura operativa: un fluido caratterizzato da una temperatura iniziale elevata presenta una densità minore e una maggiore energia termica, che rendono la miscelazione con l'aria ambiente più efficace; di conseguenza, la distanza necessaria affinché la nube non sia più tossica, è minore.

Mantenendo costante il valore dell'inventario e variando quello della pressione e della temperatura secondo lo schema riportato in Tabella 31, si ottengono i risultati riportati in Tabella 33.

4_G	p [barg]	T [°c]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
Caso base	5	90	30000	1,247
V-1	4,75	85,5	30000	1,236

4_G	p [barg]	T [°c]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-2	5,25	94,5	30000	1,257
V-3	4,75	94,5	30000	1,230
V-4	5,25	85,5	30000	1,263

Tabella 33. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione isolabile 4_G

Si nota come il risultato peggiore si ha nel caso di pressione alta e temperatura bassa; dalla Tabella 34, inoltre, si nota che il valore di lunghezza della nube corrispondente a questo caso (v-4) è molto più vicino a quello che si ottiene variando soltanto la pressione (v-p) rispetto a quello ottenuto variando soltanto la temperatura (v-T).

4_G	p [barg]	T [°c]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
Caso base	5	90	30000	1,247
V-p	5,25	90	30000	1,260
V-T	5	85,5	30000	1,249
V-4	5,25	85,5	30000	1,263

Tabella 34. Confronto delle variazioni dei parametri, sezione isolabile 4_G

Tuttavia, la lunghezza della nube per il caso peggiore (v-4) aumenta soltanto di 1,6 cm, rappresentando una variazione trascurabile rispetto alla lunghezza della nube per il caso base di circa 1 m. Questa differenza, infatti, per quanto piccola non avrebbe nessun impatto sui risultati finali.

della QRA, che si dimostra essere, perciò, robusta e non influenzata dalle piccole fluttuazioni dei parametri operativi.

L'impatto di ogni parametro può essere calcolato come la differenza del valore in output ottenuto per il valore "alto" in input e quello ottenuto per il valore "basso".

In questo caso, infatti, rispecchiando le osservazioni precedenti, l'impatto della pressione risulta essere di 0,027, mentre quello della temperatura è pari a -0,005.

Lo stesso procedimento è stato adottato per lo studio delle sezioni isolabili 5_G, 3_G_UL e 3_L_UL, i cui risultati principali sono riportati nelle tabelle sottostanti, mentre i restanti risultati sono riportati in Allegato 7, Allegato 8 e Allegato 9.

In particolare, in Tabella 35 e Tabella 36, il segno “–” indica che il risultato non è ottenibile, in quanto per quei valori di pressione e temperatura la CO₂ cambia stato, mentre nella Tabella 38 indica che la simulazione non può essere eseguita in quanto la temperatura risulta minore del limite inferiore.

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	48,6	20	13000	29,965
V-2	51,3	20	13000	31,455
Caso base	54	20	13000	33,136
V-3	56,7	20	13000	-
V-4	59,4	20	13000	-

Tabella 35. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione 3_G_UL

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	54	18	13000	-
V-2	54	19	13000	33,365
Caso base	54	20	13000	33,136
V-3	54	21	13000	32,935
V-4	54	22	13000	32,727

Tabella 36. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione 3_G_UL

Da questi risultati si nota come, per la sezione 3_G_UL, la pressione ha un impatto maggiore rispetto alla temperatura sulla lunghezza della nube. Tuttavia, la variazione della lunghezza non è superiore a 3,171 centimetri per un aumento totale di pressione di 5,4 barg (da 48,6 barg a 54 barg). Pertanto, si può ritenere che la variazione della lunghezza della nube non sia particolarmente significativa: un aumento di circa 3 centimetri su una lunghezza totale di 33 metri non è rilevante ai fini dell'analisi di rischio. Con questi risultati si sono dimostrate nuovamente la stabilità e l'affidabilità dei risultati della QRA svolta.

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	48,6	-54	36000	173,280
V-2	51,3	-54	36000	173,950
Caso base	54	-54	36000	174,600
V-3	56,7	-54	36000	175,220
V-4	59,4	-54	36000	175,850

Tabella 37. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione 3_L_UL

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	54	-59,4	36000	-
V-2	54	-56,7	36000	175,470
Caso base	54	-54	36000	174,600
V-3	54	-51,3	36000	173,710
V-4	54	-48,6	36000	172,830

Tabella 38. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione 3_L_UL

Per la sezione 3_L_UL, un aumento di 5,4°C causa una diminuzione della lunghezza della nube di 1,76 metri; sebbene questa variazione non sia dell'ordine dei centimetri come per la sezione precedente, è da considerare che una diminuzione o un aumento di 1-2 metri su una lunghezza totale di circa 175 metri risulta insignificante. Perciò, anche in questo caso, i risultati finali della QRA non varierebbero.

Confrontando le sezioni 3_G_UL e 3_L_UL, caratterizzate dalla stessa pressione operativa e dalla stessa composizione del fluido, ma da diversa temperatura operativa, si può concludere, osservando le tabelle precedenti (Tabella 35, Tabella 36, Tabella 37, Tabella 38), che i rilasci di CO₂ gassosi sono pericolosi per la sovrapressione, mentre quelli liquidi lo sono per i rischi criogenici.

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	0,45	60	7000	3,465
V-2	0,475	60	7000	3,488
Caso base	0,5	60	7000	3,510
V-3	0,525	60	7000	3,532
V-4	0,55	60	7000	3,553

Tabella 39. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	0,5	54	7000	3,553
V-2	0,5	57	7000	3,531
Caso base	0,5	60	7000	3,510
V-3	0,5	63	7000	3,488
V-4	0,5	66	7000	3,466

Tabella 40. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G

Per la sezione isolabile 5_G, l'impatto della pressione e della temperatura sulla lunghezza della nube sono quasi uguali: l'alta percentuale di CO₂ (80%) porta il fluido a raffreddarsi, ma la pressione estremamente bassa (0,5 barg) rende l'espansione lieve. Di conseguenza, l'effetto Joule-Thomson è contenuto, il che significa che l'espansione del gas rilasciato non provoca un raffreddamento significativo (osservabile in seguito anche in Figura 58). Si può concludere, quindi, che per le sezioni isolabili caratterizzate da pressioni non elevate che contengono un fluido con una percentuale di CO₂ minore del 100%, diminuiscono il rischio criogenico e il pericolo di frattura fragile per le tubazioni e i componenti.

Inoltre, visto che il gas rilasciato è meno freddo, questo si miscela con l'aria ambiente più velocemente della CO₂ pura, per cui le distanze di danno sono minori.

L'impatto della variazione di pressione, di temperatura e di inventario per le diverse sezioni isolabili è riportato in Tabella 41.

Lunghezza nube	Sezione isolabile			
	4_G	5_G	3_G_UL	3_L_UL
Impatto p [m]	0,027	0,044	3,171	1,270
Impatto T [m]	-0,005	-0,043	-0,430	-1,760
Impatto inventario [m]	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 41. Impatto dei diversi parametri sulla lunghezza della nube

Analizzando i risultati ottenuti, si possono trarre diverse conclusioni:

- L'impatto della pressione sulla lunghezza della nube è determinato dall'energia accumulata sotto forma di pressione. Dalla Tabella 41 si nota, infatti, che per le sezioni 4_G e 5_G (che operano a pressioni molto basse) l'impatto della pressione risulta essere quasi nullo, mentre per le sezioni 3_G_UL e 3_L_UL (che operano a una pressione di 54 barg) l'impatto ha un valore maggiore. Ciò significa che il rischio legato ad onde d'urto potrebbe essere determinato dalla sola pressione operativa.
- L'impatto della temperatura è determinato dalla combinazione di tutti e tre i parametri in input: all'aumentare della pressione e della percentuale di CO₂ nel fluido il suo valore aumenta, come riscontrabile in Tabella 41. Se si parte da una temperatura molto bassa, il suo impatto sulla lunghezza della nube aumenta

maggiormente: l'impatto termico più significativo si ha per la sezione 3_L_UL, caratterizzata da una temperatura operativa di -54°C.

- Osservando le Tabella 35, Tabella 36, Tabella 37, Tabella 38, Tabella 39 e Tabella 40 e le Figura 53 e Figura 54, si può affermare che la variazione della lunghezza della nube segue un andamento lineare sia in funzione della pressione che della temperatura in tutti i casi. Si deduce, quindi, che il comportamento del sistema è prevedibile e che delle piccole variazioni dei parametri operativi causano dei cambiamenti delle distanze di danno piccoli e proporzionali. Questo risultato dimostra nuovamente la robustezza della QRA svolta.

6.3 Volume della nube

Per quest'analisi, si è completata la valutazione dell'estensione di dispersione della nube considerando il volume massimo della nube stessa. Questo valore non è presente tra gli output delle simulazioni, per cui è stato approssimato al prodotto della superficie (reperibile dalla schermata del "Max Footprint" insieme alla lunghezza della nube) per l'altezza massima, la quale è stata calcolata dalla visione laterale della nube. In Figura 55, Figura 56 e Figura 57, dove la linea viola si riferisce alle condizioni atmosferiche 2F e quella blu alle condizioni atmosferiche 5D, è possibile osservare una visione laterale delle nubi generate da un rilascio da un foro di 150 mm per le sezioni isolabili 5_G, 3_G_UL e 3_L_UL, senza intervento del sistema ESD e monitorando una concentrazione di CO₂ di 105000 ppm.

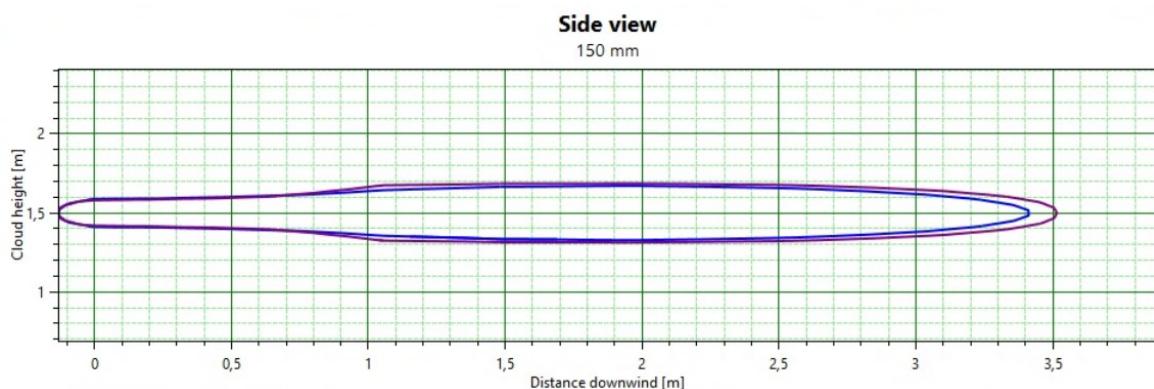


Figura 55. Visione laterale per rilascio senza intervento ESD, sezione isolabile 5_G

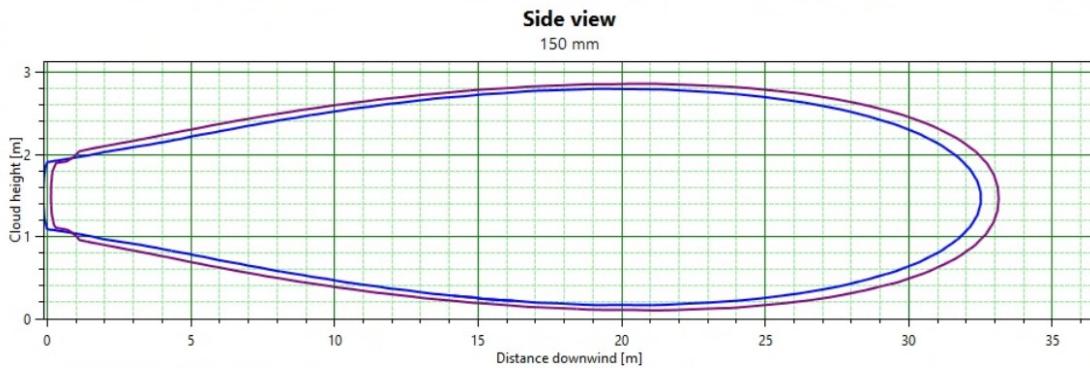


Figura 56. Visione laterale per rilascio senza intervento ESD, sezione isolabile 3_G_UL

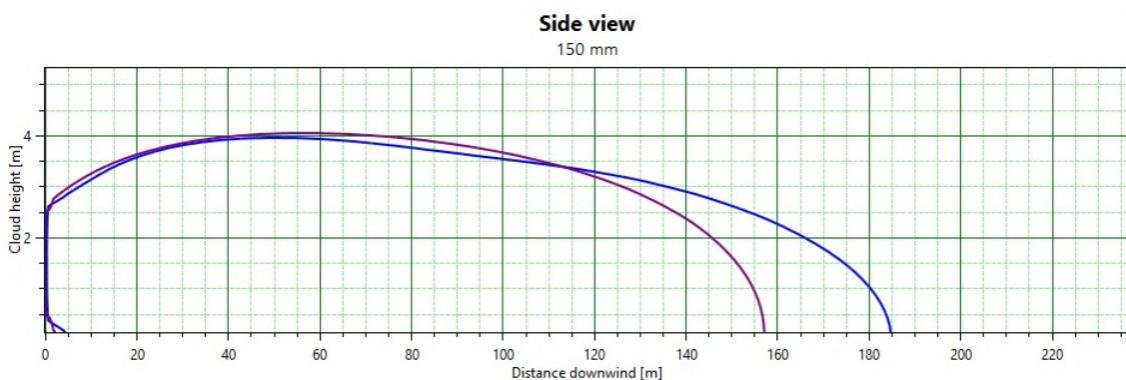


Figura 57. Visione laterale per rilascio senza intervento ESD, sezione isolabile 3_L_UL

Come è possibile notare dalle immagini, la nube di CO₂ risultante da un rilascio liquido non si solleva per galleggiamento, a differenza delle altre, perché risulta più densa e pesante dell'aria circostante e, quindi, si allarga orizzontalmente raggiungendo delle distanze molto più elevate.

Il processo seguito per l'analisi di sensitività con valore in output uguale al volume della nube è lo stesso seguito per la lunghezza della nube. Si riportano direttamente i risultati degli impatti in Tabella 42, mentre i risultati di ogni variazione sono elencati in Allegato 7, Allegato 8 e Allegato 9.

Volume nube	Sezione isolabile		
	5_G	3_G_UL	3_L_UL
Impatto p [m³]	0,011	46,280	132,448
Impatto T [m³]	-0,010	-5,401	-325,041
Impatto inventario [m³]	0,000	0,000	0,792

Tabella 42. Impatto dei diversi parametri sul volume della nube

Analizzando i risultati ottenuti, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Lo stato fisico è il fattore che maggiormente influenza la dimensione della nube: la CO₂ in condizioni liquide causa una nube molto più grande di quella generata da un rilascio di CO₂ gassosa. Questo risultato è importante per la definizione del layout dell'impianto: per le porzioni di impianto che contengono CO₂ liquida risulta utile installare muri o altre barriere fisiche per rallentare la diffusione orizzontale della nube e favorirne la miscelazione verticale, in modo da ridurre la distanza di danno.
- Le sezioni 3_G_UL e 3_L_UL risultano più sensibili alle variazioni dei parametri rispetto alla sezione 5_G; questo è dovuto alle diverse condizioni operative in cui si trova il fluido. Nella sezione 3_G_UL la CO₂ è vicina al punto di liquefazione e il volume risulta, perciò, più sensibile alla pressione, mentre nella sezione 3_L_UL è

vicina al punto di solidificazione e il volume risulta, perciò, più sensibile alla temperatura. Nella sezione 5_G il fluido è caratterizzato, invece, da una pressione bassissima e, quindi, risulta più stabile.

Un rilascio da una sezione che opera in prossimità del punto di solidificazione, come la 3_L_UL, causerebbe la formazione di ghiaccio secco. È importante considerare anche questo tipo di scenario per la pianificazione della risposta all'emergenza, considerando, quindi, anche i rischi legati alla formazione di ghiaccio secco e non soltanto quelli di tossicità.

- L'inventario ha un impatto nullo: anche se nella sezione 3_L_UL il suo valore è diverso da zero, è comunque trascurabile rispetto all'impatto di pressione e temperatura.

6.4 *Tempo di residenza della nube*

Il tempo di residenza della nube, importante per la valutazione del danno tossicologico e la definizione delle soglie di vulnerabilità, è stato calcolato come descritto nel paragrafo 5.3.2.

L'impatto della variazione dei diversi parametri è riportato in Tabella 43, mentre i risultati di tutte le simulazioni effettuate per giungere a queste conclusioni sono riportati in Allegato 7, Allegato 8 e Allegato 9.

Tempo di residenza	Sezione isolabile		
	5_G	3_G_UL	3_L_UL
Impatto p [s]	5	-7	-1
Impatto T [s]	5	2	-1
Impatto inventario [s]	43	4	3

Tabella 43. Impatto dei diversi parametri sul tempo di residenza della nube

Dall'analisi dei risultati riportati, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Rispetto ai casi precedenti, l'influenza dell'inventario non è nulla; al contrario, il tempo di residenza risulta essere una funzione diretta dell'inventario stesso. In particolare, il tempo di residenza per la sezione 5_G, il cui fluido è caratterizzato da una pressione estremamente bassa (0,5 barg), è influenzato maggiormente

dalla quantità di massa invece che dai parametri termodinamici: operando ad una pressione così bassa, la dispersione è dominata dalla durata del rilascio che dipende, a sua volta, dall'inventario.

- Per la sezione 3_G_UL, nonostante l'impatto dell'inventario sia diverso da zero, il parametro che maggiormente influenza il tempo di residenza della nube è la pressione, in quanto la dispersione per un rilascio gassoso è guidata dalla quantità di moto, che è funzione della pressione stessa: una pressione maggiore porta a una miscelazione con l'aria ambiente più rapida. Questo risultato può sembrare ingannevole: sebbene un'alta pressione causi una più rapida miscelazione con l'aria ambiente, la distanza di danno non è ridotta, bensì aumenta perché una maggiore quantità di moto spinge il getto tossico più lontano.
- Il tempo di residenza di una nube causata da un rilascio di CO₂ liquida, che si trova vicino al punto di solidificazione, è sensibile in ugual modo sia alla pressione che alla temperatura, ma risulta maggiormente influenzato dall'inventario. Questo perché, in seguito ad un rilascio liquido, la nube che si forma è densa e pesante e, quindi, la sua dispersione è guidata dalla gravità: un inventario maggiore alimenterebbe la nube per più tempo, aumentando, perciò, il tempo di residenza. Questo risultato suggerisce di considerare il tempo di esposizione effettivo, ovvero il tempo di residenza calcolato, per la determinazione delle soglie

di vulnerabilità. Anche se le concentrazioni di CO₂ della nube non risultano immediatamente letali o tossiche, la permanenza prolungata della nube stessa potrebbe causare una concentrazione tossica cumulativa. Per cui, considerando un tempo di esposizione inferiore, si sottostimerebbe il rischio reale per le persone.

6.5 Temperatura di centreline

Per ogni simulazione il software DNV PHAST genera un report contenente alcune informazioni e risultati, tra cui la temperatura di centreline per diverse distanze dal punto di rilascio, importante indicatore dei fenomeni fisici in atto durante la dispersione. Per ognuna delle tre sezioni isolabili studiate è stata analizzata l'influenza della pressione operativa, della temperatura operativa e dell'inventario sulla temperatura di centreline per due distanze diverse. In particolare, si sono analizzate la distanza di 0m, corrispondente con il punto del rilascio, e la distanza che corrisponde alla metà della lunghezza della nube generata dal rilascio.

Si sono tracciati, inoltre, gli andamenti della temperatura di centreline per le nubi generate dal rilascio da ogni sezione isolabile.

I risultati di tutte le simulazioni per l'analisi di sensitività per questo parametro di output sono riportati in Allegato 7, Allegato 8 e Allegato 9.

I risultati generali di questa analisi sono riportati, invece, in Tabella 44 e Tabella 45.

Temperatura di centreline a 0 metri	Sezione isolabile		
	5_G	3_G_UL	3_L_UL
Impatto p [°C]	2,29	0,00	0,00
Impatto T [°C]	5,66	0,00	0,00
Impatto inventario [°C]	0,00	0,00	0,00

Tabella 44. Impatto dei diversi parametri sulla temperatura di centreline della nube a 0 metri

Temperatura di centreline a metà della lunghezza della nube	Sezione isolabile		
	5_G	3_G_UL	3_L_UL
Impatto p [°C]	0,33	5,25	0,22
Impatto T [°C]	1,00	1,47	1,03
Impatto inventario [°C]	0,00	0,00	0,00

Tabella 45. Impatto dei diversi parametri sulla temperatura di centreline della nube a metà della sua lunghezza

Dall'analisi dei risultati, si possono trarre diverse conclusioni:

- L'inventario risulta irrilevante per la temperatura di centreline, ciò significa che questa è determinata dalle condizioni operative del fluido.
- Come riscontrabile in Tabella 44, a una distanza di 0 metri l'impatto dei parametri è nullo per la CO₂ pura, la quale fuoriesce a circa -79°C, mentre è significativo quello della pressione e della temperatura se il fluido ha una composizione mista. In particolare, l'impatto della temperatura è maggiore di quello della pressione, ma entrambi diminuiscono all'aumentare della distanza (Tabella 45).
- La temperatura di centreline è influenzata maggiormente dalla pressione per un rilascio di CO₂ gassosa e maggiormente dalla temperatura per un rilascio di CO₂ liquida.

Gli andamenti delle temperature di centreline per le nubi causate dai rilasci dalle diverse sezioni isolabili sono riportati nelle seguenti figure.

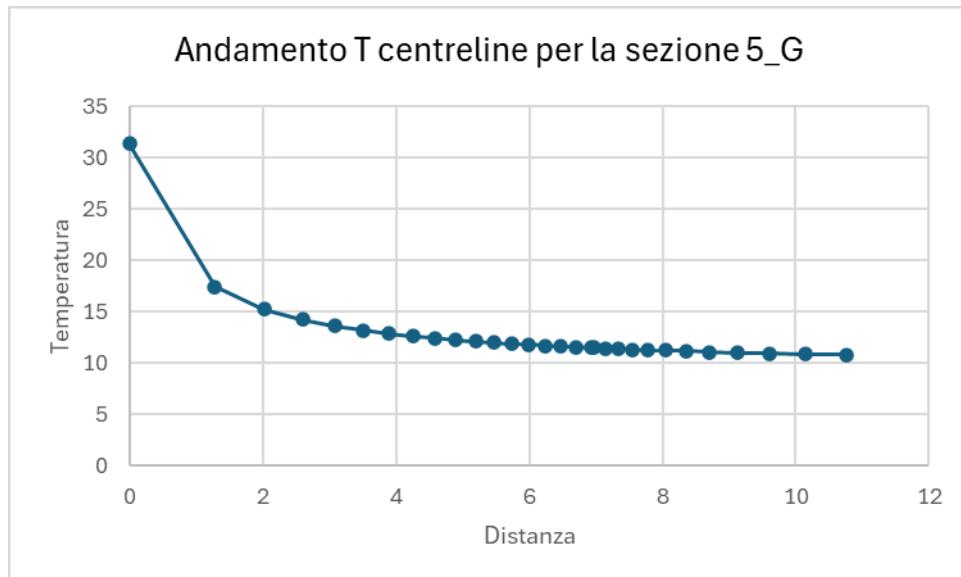


Figura 58. T di centreline per la sezione 5_G

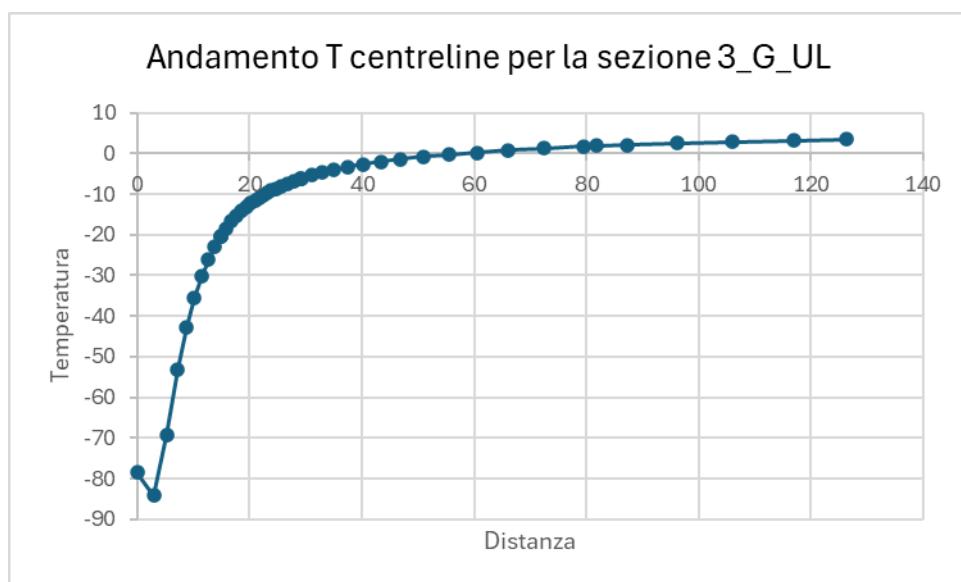


Figura 59. T di centreline per la sezione 3_G_UL

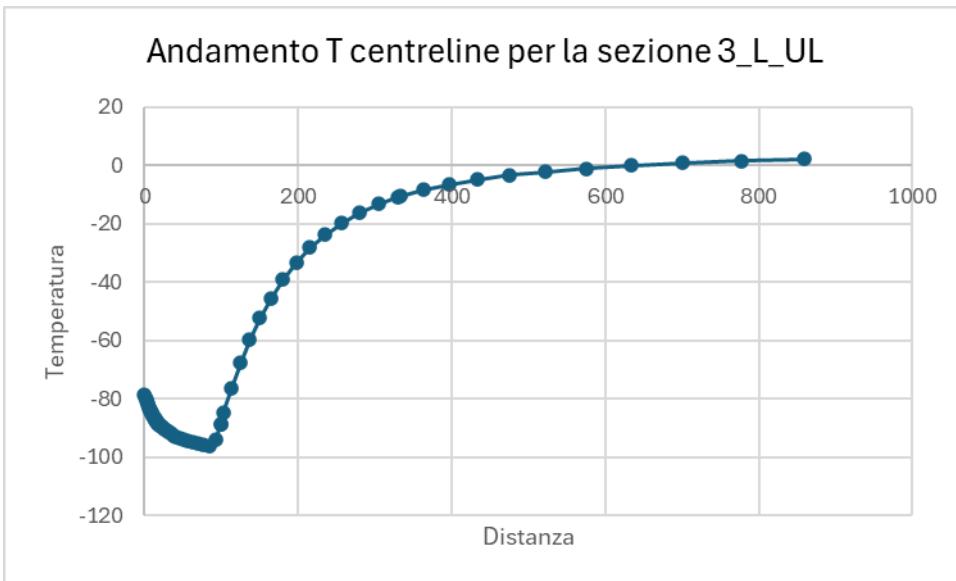


Figura 60. *T di centreline per la sezione 3_L_UL*

Dagli andamenti ottenuti, si può concludere che la temperatura di centreline segue un comportamento fondamentale, ovvero si dirige verso una temperatura di equilibrio, che può essere considerata uguale alla temperatura ambiente. Questo processo è guidato dalla miscelazione della nube con l'aria circostante, per cui all'inizio la differenza di temperatura è massima e lo scambio termico è rapido; infatti, la curva è caratterizzata da una pendenza elevata. Man mano che la nube si mescola con l'aria circostante, lo scambio termico diventa più lento e la curva, infatti, si appiattisce e si può dire che tende asintoticamente al valore della temperatura dell'aria ambiente (10-15°C).

In particolare, il rilascio dalla sezione 5_G avviene a temperatura elevata e, infatti, la nube si raffredda man mano che si allontana dalla fonte di rilascio.

Per la sezione 3_G_UL si nota l'impatto dell'effetto Joule-Thomson: al momento del rilascio, a causa della forte depressurizzazione, la temperatura raggiunta è di circa -79°C, ma prima di iniziare a stabilizzarsi verso la temperatura ambiente raggiunge temperature ancora più basse.

Per la sezione 3_L_UL, invece, dove la CO₂ è liquida e caratterizzata da alta pressione e -54°C, appena questa fuoriesce, la pressione diminuisce istantaneamente fino a quella ambiente. In questo caso, però, una frazione del liquido evapora immediatamente sottraendo una grande quantità di calore al liquido rimanente, raffreddandolo. Perciò, la temperatura raggiunge il valore di circa -100°C prima di iniziare ad aumentare, la quale permane fino a circa 100 metri di distanza. In questo caso, tutti i componenti che si trovano vicino a quello da cui avviene il rilascio o tutti quelli che si trovano nell'ipotetico percorso di questo rilascio, devono essere costruiti con dei materiali caratterizzati da una temperatura di transizione duttile-fragile minore di -100°C per evitare un effetto domino e un guasto catastrofico.

6.6 Risultati generali per gli scenari outdoor

Considerando tutti i risultati ottenuti dall'analisi di sensitività svolta per le sezioni isolabili che generano rilasci outdoor, si possono trarre delle conclusioni generali:

- L'impatto dell'inventario, ad eccezione per il tempo di residenza della nube, risulta essere quasi sempre nullo o trascurabile.
- Il fattore più influenzante sugli output è lo stato fisico del fluido. In particolare, un rilascio di CO₂ liquida genera, rispetto a un rilascio di CO₂ gassosa, una nube molto più grande, più densa e più pesante dell'aria, che raggiunge distanze maggiori.
- I rilasci di CO₂ gassosa sono pericolosi per i rischi di sovrapressione, come le onde d'urto, mentre i rilasci di CO₂ liquida sono pericolosi per i rischi criogenici legati alle bassissime temperature. Il rischio, quindi, è guidato principalmente dalle condizioni termodinamiche operative, per cui si potrebbero suggerire dei margini di sicurezza maggiori in fase progettuale. I risultati della QRA relativi ai rilasci liquidi, che risultano essere i più critici, sono sensibili alla temperatura; perciò, ci potrebbe essere bisogno di un controllo rigido sulla temperatura per la gestione del rischio criogenico.
- La sensibilità ai parametri in input dipende principalmente dalle condizioni operative: le sezioni che operano vicino a un punto di transizione di fase sono le più sensibili alle variazioni.

- Le variazioni di tutti gli output seguono un andamento lineare in funzione sia della pressione che della temperatura e, quando l'impatto dell'inventario è diverso da zero, anche la variazione in funzione di questo segue un andamento lineare. Questo risultato sottolinea nuovamente il comportamento prevedibile del sistema impiantistico.
- Nella determinazione delle distanze di danno, la percentuale di CO₂ contenuta nel fluido rilasciato (in combinazione con il valore di pressione) gioca un ruolo importante: la distanza aumenta all'aumentare della concentrazione dell'anidride carbonica passando da una distanza di danno di circa 1,2 metri per un fluido contenente il 15% di CO₂, a una di 3,5 metri per un fluido composto dall'80% di CO₂ e dal 20% di H₂O, fino ad arrivare a una distanza di circa 33 metri per un rilascio di CO₂ pura. Quindi, le sezioni dell'impianto post-purificazione sono caratterizzate da un rischio più elevato, richiamando nuovamente la necessità dell'installazione di barriere fisiche di contenimento in questi punti.
- In generale, le variazioni dei parametri in output non sono significative e questo risultato per le distanze di danno è importante per dimostrare la robustezza e l'affidabilità della QRA svolta.

6.7 Scenari indoor

Il fine dell'analisi di sensitività svolta per le sezioni isolabili indoor consiste nell'indagare l'impatto che i parametri in input hanno sulla concentrazione prodotta. Perciò, visto che alcune sezioni non sono in grado di generare una concentrazione tossica, si sono considerate le concentrazioni massime, reperibili dal report generato da PHAST alla fine della simulazione.

In particolare, le sezioni 3_G, 5_G e 1G_D_UL non producono concentrazioni tossiche né per il caso base, né per tutte le variazioni che sono state effettuate. La sezione 4_G, invece, produce concentrazioni tossiche per ogni situazione analizzata.

In questo paragrafo verranno analizzati direttamente i risultati finali che considerano l'impatto di ogni parametro, mentre i risultati di tutte le simulazioni svolte sono riportati in Allegato 10, Allegato 11, Allegato 12 e Allegato 13.

In Tabella 46 sono riportati gli impatti che i diversi parametri in input hanno sulla concentrazione massima prodotta dai diversi scenari incidentali.

Concentrazione massima	Sezione isolabile			
	3_G	4_G	5_G	1G_D_UL
Impatto p [ppm]	240	2181	3542	2490
Impatto T [ppm]	1477	4186	737	-732
Impatto inventario [ppm]	3157	298	829	16598

Tabella 46. Impatto dei diversi parametri sulla concentrazione massima

Dai risultati ottenuti si possono fare diverse osservazioni:

- La variazione della concentrazione segue un andamento lineare in funzione di tutti i parametri in input; anche in questo caso, come evidenziato per i rilasci outdoor, il comportamento del sistema è prevedibile.
- L'impatto della temperatura è negativo per la sezione 1G_D_UL: se il fluido è composto da CO₂ pura, un aumento della temperatura causa una diminuzione della concentrazione massima prodotta dal rilascio: per una sostanza pura, una temperatura maggiore comporta una densità inferiore, per cui il gas ha una spinta di galleggiamento maggiore, che lo induce ad interagire in modo più efficace con il sistema di ventilazione.
- Non esiste un parametro dominante a cui la concentrazione risulta essere sensibile, ma l'impatto di ogni parametro dipende dalla sezione specifica: per le sezioni 3_G e 4_G l'impatto della

pressione è minore di quello della temperatura, per la sezione 5_G l'impatto della pressione è maggiore sia di quello della temperatura che di quello dell'inventario, per le sezioni 3_G e 1G_D_UL l'impatto maggiore è quello dell'inventario. Perciò, qualsiasi misura di sicurezza adottata deve essere scelta in base alla specifica sezione isolabile.

- Le concentrazioni prodotte dalla sezione 4_G, che risultano essere le uniche tossiche, sono sensibili soprattutto alla temperatura. Questo potrebbe essere causato dalla dipendenza del fluido di questa sezione (composto da H₂O, N₂, O₂, CO₂) dalla temperatura operativa dell'assorbitore. Questo risultato suggerisce l'implemento di un sensore di temperatura sull'assorbitore e la presenza di un sistema di monitoraggio ad alta integrità.
- Non c'è proporzionalità diretta tra l'entità dell'impatto e la scala del sistema: ad esempio, la sezione 4_G è caratterizzata dall'inventario maggiore (30000 kg), ma risulta essere quella meno influenzata da una sua variazione, mentre la sezione 1G_D_UL è quella più sensibile alla variazione di inventario nonostante il suo valore di base sia di 3000 kg.
- Il fatto che le concentrazioni prodotte dalle sezioni 3_G, 5_G e 1G_D_UL non risultano mai tossiche e che quelle prodotte dalla sezione 4_G, invece, risultano tossiche per ogni situazione analizzata, è un altro risultato che dimostra la robustezza

dell'analisi QRA svolta, la quale non è influenzata dalle piccole fluttuazioni dei parametri operativi.

7. Conclusioni e studi futuri

In un contesto globale che richiede nuove sfide innovative per la riduzione e la rimozione di CO₂ dall'atmosfera, la catena CCS gioca un ruolo fondamentale. Con essa, però, sono introdotti nuovi rischi legati alla manipolazione e allo stoccaggio di anidride carbonica. Perciò, questa tesi si è incentrata sullo sviluppo di una QRA per un impianto BECCS reale, per cui è stata implementata una metodologia completa, partendo dall'identificazione dei pericoli e la suddivisione dell'impianto in 41 sezioni isolabili. Sono state stimate le frequenze di rilascio, modellate le conseguenze tramite il software DNV PHAST sul quale è stata poi condotta un'analisi di sensitività e, infine, sono stati calcolati IRPA e rischio sociale.

Questo studio si è voluto soffermare sulle difficoltà metodologiche relative all'applicazione di una metodologia di QRA classica ad impianti che trattano la CO₂.

La criticità principale emersa durante questo studio, di cui si è parlato nel paragrafo 4.3.1, consiste nella mancanza di standard robusti e database di guasto dedicati esclusivamente alla CO₂. In questo studio, infatti, sono stati adottati i dati di frequenza storici del database IOGP. Nei paragrafi 3.7 e 3.7.1, invece, si è affrontata l'evoluzione dei criteri di vulnerabilità umana, per cui non si considera più soltanto l'asfissia causata dall'assenza di ossigeno, ma anche la letalità dell'anidride carbonica a concentrazioni inferiori.

I risultati ottenuti dall'analisi di rischio sono complessivamente rassicuranti: i valori di IRPA calcolati rientrano nella zona ALARP sia per gli scenari outdoor che per quelli indoor, indicando un livello di rischio gestibile per il personale. Anche per la popolazione esterna all'impianto il progetto risulta accettabile: nonostante alcuni scenari portino fino a 40 decessi, la bassissima frequenza che li caratterizza rende il rischio sociale aggregato accettabile. La curva F-N totale, infatti, si trova interamente al di sotto della soglia dell'inaccettabilità.

I risultati dell'analisi di sensitività hanno dimostrato che per i rilasci outdoor il fattore dominante sulle conseguenze è lo stato fisico e che, mentre i rilasci liquidi sono più sensibili alla temperatura, confermando il rischio criogenico come dominante, quelli gassosi lo sono di più alla pressione, indicando un rischio maggiore di sovrapressione.

Per i rilasci indoor non è emersa una particolare dipendenza da uno specifico parametro, ma le conseguenze dipendono da un'interazione specifica tra pressione, temperatura e inventario. Per questo motivo, le misure di sicurezza, come il numero di ACPH, devono essere decise in base alle condizioni operative del singolo caso.

L'analisi di sensitività ha dimostrato, inoltre, la robustezza e l'affidabilità dell'analisi QRA svolta: considerando delle fluttuazioni realistiche dei parametri operativi ($\pm 5\%$), le distanze di danno aumentano o diminuiscono in modo trascurabile (pochi centimetri o un paio di metri su una lunghezza totale di circa 174 metri), senza alterare, quindi, i risultati finali di IRPA e rischio sociale. Anche le concentrazioni prodotte

dai rilasci indoor non variano in modo significativo e le concentrazioni che non risultano tossiche rimangono tali anche per una variazione dei parametri operativi.

Questo lavoro di tesi ha dimostrato l'accettabilità del rischio per un impianto BECCS di grandi dimensioni, fornendo allo stesso tempo un'analisi sulle criticità metodologiche che caratterizzano la QRA nel settore emergente della CCS. Da quest'analisi è emersa l'importanza dell'evoluzione degli standard come ISO, DNV e API, i quali si stanno muovendo verso approcci basati sulla fisica del guasto per ottenere una stima del rischio più accurata.

Osservando i risultati, è emersa la criticità dei rilasci di anidride carbonica liquida rispetto a quella gassosa e l'importanza di considerare meccanismi di danno evoluti e soglie di vulnerabilità anche per rischi minori. In particolare, per i rilasci liquidi da sezioni caratterizzate da grandi inventari, è importante sottolineare che non è sufficiente considerare un tempo standard per la definizione delle soglie di vulnerabilità: anche se le concentrazioni di CO₂ della nube non risultano immediatamente letali o tossiche, la permanenza prolungata della nube stessa potrebbe causare una concentrazione tossica cumulativa. Per cui, considerando un tempo di esposizione inferiore, si sottostimerebbe il rischio reale per le persone.

I dati di DNV e HSE dimostrano la letalità della CO₂ anche a concentrazioni più basse e, insieme alle nuove linee guida API, hanno sottolineato l'importanza della definizione di nuove concentrazioni soglia da monitorare, in modo tale da ottenere una QRA multilivello in

grado di distinguere tra conseguenze letali e non letali con maggiore precisione. Sulla base di queste criticità, i risultati ottenuti suggeriscono:

- Implementazione di misure di prevenzione come sistemi di monitoraggio della temperatura su determinati componenti (ad esempio, l'assorbitore).
- Installazione di interblocchi di sicurezza nelle sezioni dell'impianto attraversate da CO₂ liquida e di barriere fisiche (ad esempio, muri di contenimento) nei dintorni delle stesse, in modo da contenere la dispersione di una nube densa di CO₂.

Questo lavoro, quindi, sottolinea l'importanza dello sviluppo e del consolidamento di standard tecnici e database specifici per la CO₂, in modo da ridurre le incertezze nella valutazione del rischio in un settore necessario per il raggiungimento della neutralità climatica. In particolare, sarebbe opportuno introdurre nelle future QRA una quantificazione del rischio criogenico indagando gli effetti diretti:

- Sul personale: ustioni da freddo e shock termico, ma anche effetti come la mobilità ridotta o la perdita di lucidità, che risultano invalidanti per la fuga, aumentando il tempo di permanenza nell'area di pericolo. A questo proposito risulterebbe utile lo studio di funzioni di vulnerabilità, come la funzione probit, apposite per l'esposizione criogenica.
- Sull'asset: l'infragilimento potrebbe causare un guasto catastrofico. Infatti, per comprendere come l'impatto termico agisce sulle strutture e sui componenti adiacenti, sarebbe utile modellare l'infragilimento come innesco di un'escalation degli

eventi. Questo studio, in particolare, potrebbe quantificare il rischio di un effetto domino, calcolando il tempo necessario affinché la temperatura di un componente vicino a quello da cui avviene il rilascio scenda al di sotto di quella di transizione duttile-fragile.

Con riferimento al capitolo sulla metodologia, in cui sono stati discussi i limiti di DNV PHAST, una ricerca importante sarebbe, invece, quella di modellare lo stesso scenario di rilascio su software diversi, (considerando un approccio semi-empirico, CFD semplificato e CFD avanzato) e di confrontare i risultati tra di loro.

Da uno studio del genere si potrebbe determinare:

- Quanto le semplificazioni dei modelli integrali, come l'assente modellazione di ostacoli e delle diverse direzioni del vento, influenzino realmente la stima delle distanze di danno e, in generale, la geometria della nube.
- Se i modelli più complessi portano a risultati significativamente diversi e se, quindi, il maggior costo computazionale sarebbe giustificato nella realizzazione di una QRA. Questo studio sarebbe particolarmente utile per la modellazione di scenari indoor, caratterizzati da un'elevata congestione e da geometrie complesse.
- Come queste modellazioni impattano la valutazione dei criteri di vulnerabilità: se, ad esempio, partendo dallo stesso rilascio, un modello CFD modellasse una nube più rapida a disperdersi

rispetto a un modello integrale, questo porterebbe a conclusioni diverse sui tempi di esposizione.

Da questi confronti si potrebbe, quindi, determinare il grado di conservatività dei modelli integrali e individuare il software di modellazione migliore per la realizzazione delle future QRA su impianti che trattano CO₂.

Bibliografia

- [1] Crutzen, Paul J., and Eugene F. Stoermer. "The 'Anthropocene'." *Global Change NewsLetter*, no. 41, May 2000
- [2] International Energy Agency. "CO₂ Emissions." *Global Energy Review 2025*, 2025, www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions
Accesso 22 luglio 2025
- [3] National Oceanic and Atmospheric Administration. "Carbon Cycle". NOAA, 28 agosto 2025
<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>
Accesso 30 agosto 2025
- [4] International Energy Agency. *CO₂ Emissions in 2023*. IEA, Mar. 2024,
www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023
Accesso 22 luglio 2025
- [5] IPCC. "Summary for Policymakers." *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2022
- [6] Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC). *Come funziona l'effetto serra?*. Marzo 2020
- [7] IPCC. "Summary for Policymakers." *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2023
- [8] Power, Max. "Importanza degli oceani nello stoccaggio del carbonio." *AboutPlants*, n.d.
<https://www.aboutplants.eu/notizie/ricerca/importanza-degli-oceani-nello-stoccaggio-del-carbonio>
Accesso 26 luglio 2025
- [9] ISPRA. "Protocollo di Kyoto." *ISPRA Ambiente*, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/aspetti-generalisti/protocollo-di-kyoto
Accesso 22 luglio 2025

- [10] Consiglio dell'Unione Europea. "Accordo di Parigi sul clima." *Consilium Europa*, www.consilium.europa.eu/it/policies/paris-agreement-climate/
Accesso 22 luglio 2025
- [11] Commissione Europea. "European Climate Law." *Azione per il Clima*, climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en
Accesso 22 luglio 2025
- [12] Intini, Elisabetta. "Nobel per la chimica 2025 a Susumu Kitagawa, Richard Robson e Omar M. Yaghi". Focus, 8 ottobre 2025
<https://www.focus.it/scienza/scienze/nobel-per-la-chimica-2025-i-vincitori>
Accesso 15 ottobre 2025
- [13] ReCommon. "La falsa soluzione di Ravenna." *ReCommon*, 28 Mar. 2023, www.recommon.org/la-falsa-soluzione-di-ravenna/
Accesso 23 luglio 2025
- [14] International Energy Agency. "Bioenergy with Carbon Capture and Storage – Energy System – IEA." *IEA*, 25 Apr. 2024,
<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>
Accesso 23 luglio 2025
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Edited by B. Metz et al., Cambridge University Press, 2005,
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
Accesso 27 luglio 2025
- [16] Al-Kharusi, Hisham T. T., and Mathias S. P. Bielecki. "Instability Analysis of Supercritical CO₂ in Geological Storage Systems." *3rd European Geothermal Workshop*, Feb. 2018,
www.researchgate.net/publication/331848805_Instability_analysis_of_supercritical_CO2_in_geological_storage_systems
Accesso 29 luglio 2025
- [17] IEAGHG. *Effects of Impurities on Geological Storage of CO₂*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2011,
<https://ieaghg.org/publications/effects-of-impurities-on-geological-storage-of-co2/>
Accesso 1 agosto 2025

- [18] Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer, editors. "Chapter 3: Capture of CO₂." *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, 2005,
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_chapter3-1.pdf
Accesso 12 agosto 2025
- [19] Consiglio Nazionale Ingegneri. "Ingegneria e sostenibilità: Le tecnologie di cattura e utilizzo della CO₂ e conversione in combustibili rinnovabili".
Consiglio Nazionale Ingegneri, 21 dicembre 2023,
www.cni.it/images/eventi/2023/CNI_21Dic2023.pdf
Accesso 12 agosto 2025
- [20] "Direct Air Capture." *International Energy Agency*, www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture
Accesso 12 agosto 2025
- [21] "Our Technology." *Carbon Engineering*, 2024,
carbonengineering.com/our-technology/
Accesso 12 agosto 2025
- [22] Rubin, Edward S. "Future R&D Needs for CO₂ Capture." *International Workshop on the CO₂ Geological Storage*, 20-22 Feb. 2006. *Carnegie Mellon University*,
[www.cmu.edu/epp/iecm/rubin/PDF%20files/2006/2006a%20Rubin,%20Intl%20Wkshp%20on%20CO2%20Geo%20Storage%20\(Feb\).pdf](http://www.cmu.edu/epp/iecm/rubin/PDF%20files/2006/2006a%20Rubin,%20Intl%20Wkshp%20on%20CO2%20Geo%20Storage%20(Feb).pdf)
Accesso 14 agosto 2025
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change. "Chapter 5: Carbon Dioxide Transport, Injection and Geological Storage." *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. 2, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006
www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/v2_5_Ch5_CCS.pdf
Accesso 14 agosto 2025
- [24] "What Does the Latest IPCC Report Say About Carbon Capture?" *Clean Air Task Force*, 20 Apr. 2022
www.catf.us/2022/04/what-does-latest-ipcc-report-say-about-carbon-capture/
Accesso 14 agosto 2025

- [25] ACGIH. "Carbon Dioxide." *ACGIH*, n.d.
www.acgih.org/carbon-dioxide/
Accesso 3 agosto 2025
- [26] National Institute for Occupational Safety and Health. "NIOSH IDLH Introduction: Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH) Values." *Centers for Disease Control and Prevention*, U.S. Department of Health and Human Services, 4 dicembre 2014
www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html
Accesso 3 agosto 2025
- [27] "L'ossigeno." *Inquinamento.org*, n.d.,
www.inquinamento.org/ossigeno.html
Accesso 3 agosto 2025
- [28] Linde. "Avviso di sicurezza - La gestione dell'anidride carbonica CO2".
Linde AG,
static.prd.echannel.linde.com/wcsstore/CH_REC_Industrial_Ntl_Store/media/it_CH/linde-avviso-di-sicurezza-la-gestione-dell-anidride-carbonica-co2-i.pdf
Accesso 2 agosto 2025
- [29] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). "Cold Stress Guide." *Occupational Safety and Health Administration*, U.S. Department of Labor
www.osha.gov/emergency-preparedness/guides/cold-stress
Accesso 4 agosto 2025
- [30] ISPRA. "Impianti industriali strategici per la sicurezza energetica: I sistemi CCS". Presentazione, 2023
www.isprambiente.gov.it/files2023/controlli-ambientali/6-stoccaggi-sotterranei-co2-astorri_ispra.pdf
Accesso 5 agosto 2025
- [31] Global CCS Institute. *Caprock Systems for CO2 Geological Storage*. 2015,
www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/100471/caprock-systems-co2-geological-storage.pdf
Accesso 5 agosto 2025
- [32] Fan, Xiaofeng, et al. "A Review of Key Challenges and Evaluation of Well Integrity in CO2 Storage." *Sustainability*, vol. 17, no. 13, 2025,
doi.org/10.3390/su17135911
Accesso 7 agosto 2025

[33] Shuaiwei Gu, et al. "An experimental study on the flow characteristics during the leakage of high pressure CO₂ pipelines". 2014–2021, https://ro.ecu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=6943&context=ecuworks_post2013

Accesso 8 agosto 2025

[34] Barker, R., et al. "Internal corrosion of carbon steel pipelines for dense phase CO₂ transport in Carbon Capture and Storage (CCS) – A review." 2016, <https://eprints.whiterose.ac.uk/99011/>

Accesso 10 agosto

[35] Kairy, S.K., et al. "Corrosion of pipeline steel in dense phase CO₂ containing impurities: A critical review of test methodologies." *Corrosion Science*, vol. 214, 2023, <https://colab.ws/articles/10.1016/j.corsci.2023.110986>

Accesso 10 agosto

[36] Det Norske Veritas. *Design and Operation of CO₂ Pipelines*. DNV, Apr. 2010

<https://dexprodehy.com/wp-content/uploads/2021/06/Design-Operation-of-CO2-Pipelines-2010.pdf>

Accesso 11 agosto

[37] Ximming Hu, Anne Neville. "CO₂ erosion-corrosion of pipeline steel API X65 in oil and gas conditions-A systematic approach.". *Wear*, vol.267, 2009, https://www.researchgate.net/publication/238370399_CO_2_erosion-corrosion_of_pipeline_steel_API_X65_in_oil_and_gas_conditions-A_systematic_approach

Accesso 11 agosto 2025

[38] "How BECCS Works." *Stockholm Exergi* beccs.se/cdr-carbon-dioxide-removal/how-beccs-works/

Accesso 26 agosto 2025

[39] "BECCS Requirements Outlined by the IPCC." *Biorecro*, www.biorecro.com/beccs-requirements-outlined-by-the-ipcc/

Accesso 26 agosto 2025

[40] Vitali et al. "Statistical analysis of incidents on onshore CO₂ pipelines based on PHMSA database", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022.

[41] Johnsen et al. "Mapping of Potential HSE Issues Related to Large-Scale Capture, Transport and Storage of CO₂". Det Norske Veritas, 2009.

- [42] O'Brien, Simon. "ISO Update: TC265 – Geologic Storage of CO₂", 2023.
- [43] Andrea Carpignano. Risk Analysis Booklet, 2009.
- [44] Witlox, Henk, et al. "A Unified Model for Jet, Heavy and Passive Dispersion Including Droplet Rainout and Re-evaporation." *ResearchGate*, 2014,
www.researchgate.net/publication/265566709_A_unified_model_for_jet_heavy_and_passive_dispersion_including_droplet_rainout_and_re-evaporation
Accesso 20 agosto 2025
- [45] DNV. "Consequence Analysis". *DNV*, 2024,
www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis/
Accesso 21 agosto 2025
- [46] DNV. "Phast: Software for Consequence Analysis". *DNV*, 2024,
www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast/
Accesso 21 agosto 2025
- [47] Fiorucci, A., et al. "Risk assessment of dangerous products release and dispersion: a comparison between CFD and integral models", n.d.
<https://www.aidic.it/cisap3/webpapers/66Fiorucci.pdf>
Accesso 21 agosto 2025
- [48] Gallo, Alma. "Analysis of the state of the art of vulnerability and impairment thresholds associated to physical effects of a CO₂ release. Application to the Allam cycle case study", Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, a.a. 2020–2021
- [49] Bleve, Cristina. "Analysis of the state of the art of the consequences of CO₂ releases into the atmosphere. Application to the Allam cycle case study", Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, a.a. 2020–2021
- [50] International Organization of Oil & Gas Producers. "Risk Assessment Data Directory: vulnerability of humans". Report 434-14, luglio 2023
- [51] American Petroleum Institute. Carbon Dioxide Emergency Response Tactical Guidance Document". Novembre 2023
- [52] Ted J.G.d.S.. "Commenti pubblici al Docket No. PHMSA-2023-0013". 15 dicembre 2023
https://downloads.regulations.gov/PHMSA-2023-0013-0116/attachment_1.pdf
Accesso 3 ottobre 2025

[53] Reierson, Kelley, et al. "PHSMA Releases Notice of Proposed Rulemaking to Enhance Safety of Carbon Dioxide Pipelines". Carbon Management. 22 gennaio 2025

<https://betterenergy.org/blog/phmsa-releases-notice-of-proposed-rulemaking-to-enhance-safety-of-carbon-dioxide-pipelines/>

Accesso 10 ottobre 2025

[54] HSE. "Reducing Risks, Protecting People", 2001

[55] HSE. "Guidance on conveying carbon dioxide in pipelines in connection with carbon capture and storage projects". 24 giugno 2025

<https://www.hse.gov.uk/pipelines/co2conveying-full.htm>

Accesso 10 ottobre 2025

[56] Witlox, Henk W.M, et al. "PHAST validation of discharge and atmospheric dispersion for pressurised carbon dioxide releases". Symposium series no. 158 Hazards 23

[57] Wareing, Chris, et al. "High Pressure CO₂ CCS pipelines: Comparing dispersion models with multiple experimental datasets". International Journal of Greenhouse Gas Control. Agosto 2016

[58] Barbieri, Riccardo. "Trattamento e trasporto dell'anidride carbonica catturata per lo stoccaggio geologico in giacimenti offshore in dismissione". Tesi di laurea magistrale. Politecnico di Torino, a.a. 2023/2024

[59] Pertuso, Francesco. "Riconversione di una piattaforma petrolifera in dismissione e del relativo reservoir per l'installazione di un impianto di stoccaggio di anidride carbonica. Progettazione preliminare". Tesi di laurea magistrale. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022

[60] Boele, Georgette. "Applications of carbon capture in the energy transition". ABN AMRO. Novembre 2023

<https://www.abnamro.com/research/en/our-research/applications-of-carbon-capture-in-the-energy-transition>

Accesso 27 ottobre 2025

[61] "List of Carbon Capture and Storage Projects". Wikipedia. Ottobre 2025.

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_carbon_capture_and_storage_projects

Accesso 27 Ottobre 2025

[62] Shelat, Maulik. "Utilizing Oxy-combustion for Cost-Effective, Large-Scale Decarbonization". 8 Rivers, 2025.

<https://8rivers.com/utilizing-oxy-combustion-for-cost-effective-large-scale-decarbonization/>

Accesso 27 ottobre 2025

[63] Lebling, Katie, et al. "6 Things to Know About Direct Air Capture". World Resources Institute. Settembre 2025.

<https://www.wri.org/insights/direct-air-capture-resource-considerations-and-costs-carbon-removal>

Accesso 27 ottobre 2025

[64] Government of Canada. "Thermal Stress in the Work Place". Employment and Social Development Canada. Gennaio 2023

<https://www.canada.ca/en/employment-social-development/services/health-safety/reports/thermal-stress-work-place.html>

Accesso 27 ottobre 2025

[65] National Institute for Occupational Safety and Health. "Working in the Cold". Centers for Disease Control and Prevention. Agosto 2024.

<https://www.cdc.gov/niosh/cold-stress/about/index.html>

Accesso 27 ottobre 2025

[66] Comotti. "Seminario Pilota – Formazione GNL". Livorno, luglio 2016.

[67] Committee on Toxicology, National Research Council, "Methane," in Emergency and Continuous Exposure Guidance Levels for Selected Airborne Contaminants, Volume 1: Acute Exposure Guideline Levels. Washington, DC: National Academies Press, 2000.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK208285/>

Accesso 29 ottobre 2025

[68] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. "Studio CCUS". MASE, 2025.

Allegati

Allegato 1 – Sezioni Isolabili

Sezione isolabile	Tipologia	Sostanza pericolosa	Componenti
1_L	Puntuale	Gasolio	Serbatoio di stoccaggio del gasolio (SSG)
2_G	Puntuale	1	Generatore di vapore a recupero di calore (GVRC); Scambiatori di calore a recupero (SCR-1/2); Tamburo di aspirazione del compressore (TA)
6_L	Lineare	5	-
7_L	Lineare	5	-
8_L	Lineare	6	-
9_L_A	Puntuale	6	Braccio di carico (BC-1)
9_L_B	Puntuale	6	Braccio di carico (BC-2)
10_G	Lineare	7	-
11_G	Puntuale	7	Braccio di ritorno (BR-1)
12_G1	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-1)
12_G2	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-2)
12_G3	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-3)
12_G4	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-4)
12_G5	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-5)
12_G6	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-6)
12_G7	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-7)

Sezione isolabile	Tipologia	Sostanza pericolosa	Componenti
12_G8	Puntuale	7	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-8)
12_L1	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-1)
12_L2	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-2)
12_L3	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-3)
12_L4	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-4)
12_L5	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-5)
12_L6	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-6)
12_L7	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-7)
12_L8	Puntuale	5	Serbatoio di stoccaggio di CO ₂ (SSC-8)
1G_A_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Compressore CO ₂ (C-2); Scambiatori di calore interstadio del compressore di CO ₂ (SC-1/2); Serbatoio per la rimozione del mercurio (SR-M); Tamburo di abbattimento di CO ₂ (TAb)
1G_B_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Refrigeratore per CO ₂ umida (R-1); Refrigeratore di bypass (R-2); Separatore di CO ₂ umida (S-2)
1G_C_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Serbatoio di purificazione del gas di alimentazione (SP-2)
2_G_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Densificatore CO ₂ (D);

Sezione isolabile	Tipologia	Sostanza pericolosa	Componenti
			Scambiatore di purificazione della CO ₂ liquida (SP-3)
2_L_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Scambiatore di purificazione della CO ₂ liquida (SP-3)
4_L_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Serbatoio di purificazione della CO ₂ liquida (SP-4)
5_G_UL	Lineare	CO ₂ pura	-
6_G_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Serbatoio di purificazione del gas di alimentazione (SP-1)
7_G_UL	Puntuale	CO ₂ pura	Idrolizzatore NO ₂ (I)

Tabella 47. Descrizione delle sezioni isolabili

Allegato 2 – Punti di rilascio

La sezione isolabile 2_G è presente sia nella camera di compressione che in quella di cattura, per cui è stata divisa in due parti: la frequenza associata ad ogni parte è pari alla metà della frequenza totale associata all'intera sezione isolabile. Anche le sezioni 1_L e 5G_UL sono divise in due parti, essendo sia indoor che outdoor; come per il caso precedente, la frequenza di ogni parte è pari alla metà della frequenza totale associata all'intera sezione isolabile.

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
1_L_indoor	Interno sala gasolio	Indoor	20	2	56000
1_L_outdoor	Serbatoio di stoccaggio del gasolio (SSG)	Outdoor	20	2	56000
2_G_a	Compressore gas di combustione (C-1)	Indoor	290	6	700
2_G_b	Valvola in ingresso all'assorbitore HPC (A-HPC)	Indoor	290	6	700
6_L	Collettore liquido ai serbatoi di stoccaggio di CO ₂	Outdoor	-30	15	2000

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
7_L	Collettore liquido alle pompe di carico	Outdoor	-30	15	10000
8_L	Collettore liquido ai bracci di carico (BC-1/2)	Outdoor	-30	26	7000
9_L_A	Braccio di carico (BC-1)	Outdoor	-30	26	300
9_L_B	Braccio di carico (BC-2)	Outdoor	-30	26	300
10_G	Collettore vapore dal braccio di ritorno (BR-1)	Outdoor	-25	15	100
11_G	Braccio di ritorno (BR-1)	Outdoor	-25	15	10
12_G1	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-1)	Outdoor	-25	15	8000
12_G2	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-2)	Outdoor	-25	15	8000

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
12_G3	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-3)	Outdoor	-25	15	8000
12_G4	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-4)	Outdoor	-25	15	8000
12_G5	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-5)	Outdoor	-25	15	8000
12_G6	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-6)	Outdoor	-25	15	8000
12_G7	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-7)	Outdoor	-25	15	8000
12_G8	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-8)	Outdoor	-25	15	8000
12_L1	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-1)	Outdoor	-30	15	1900000

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
12_L2	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-2)	Outdoor	-30	15	1900000
12_L3	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-3)	Outdoor	-30	15	1900000
12_L4	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-4)	Outdoor	-30	15	1900000
12_L5	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-5)	Outdoor	-30	15	1900000
12_L6	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-6)	Outdoor	-30	15	1900000
12_L7	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-7)	Outdoor	-30	15	1900000
12_L8	Serbatoio di stoccaggio della CO ₂ (ssc-8)	Outdoor	-30	15	1900000

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
1G_A_UL	Serbatoio per la rimozione del mercurio (SR-M)	Indoor	180	10	2000
1G_B_UL	Separatore di CO ₂ umida (S-2)	Indoor	80	10	1000
1G_C_UL	Serbatoio di purificazione del gas di alimentazione (SP-2)	Indoor	150	10	2000
2_G_UL	Serbatoio di purificazione della CO ₂ liquida (SP-3)	Indoor	60	79	10000
2_L_UL	Serbatoio di purificazione della CO ₂ liquida (SP-3)	Indoor	10	54	27000
4_L_UL	Serbatoio di purificazione della CO ₂ liquida (SP-4)	Outdoor	-50	23	44000
5G_UL_indoor	Tra i serbatoi di purificazione del gas di alimentazione (SP-1/2)	Indoor	-20	5	20

Sezione isolabile	Punto di rilascio	Indoor/ Outdoor	T [°C]	p [barg]	Inventario [kg]
5G_UL_outdoor	Tra i serbatoi di purificazione della CO ₂ liquida (SP-3/4)	Outdoor	-20	5	20
6_G_UL	Serbatoio di purificazione del gas di alimentazione (SP-1)	Indoor	150	4	200
7_G_UL	Idrolizzatore NO ₂ (I)	Outdoor	180	10	3000

Tabella 48. Descrizione dei punti di rilascio

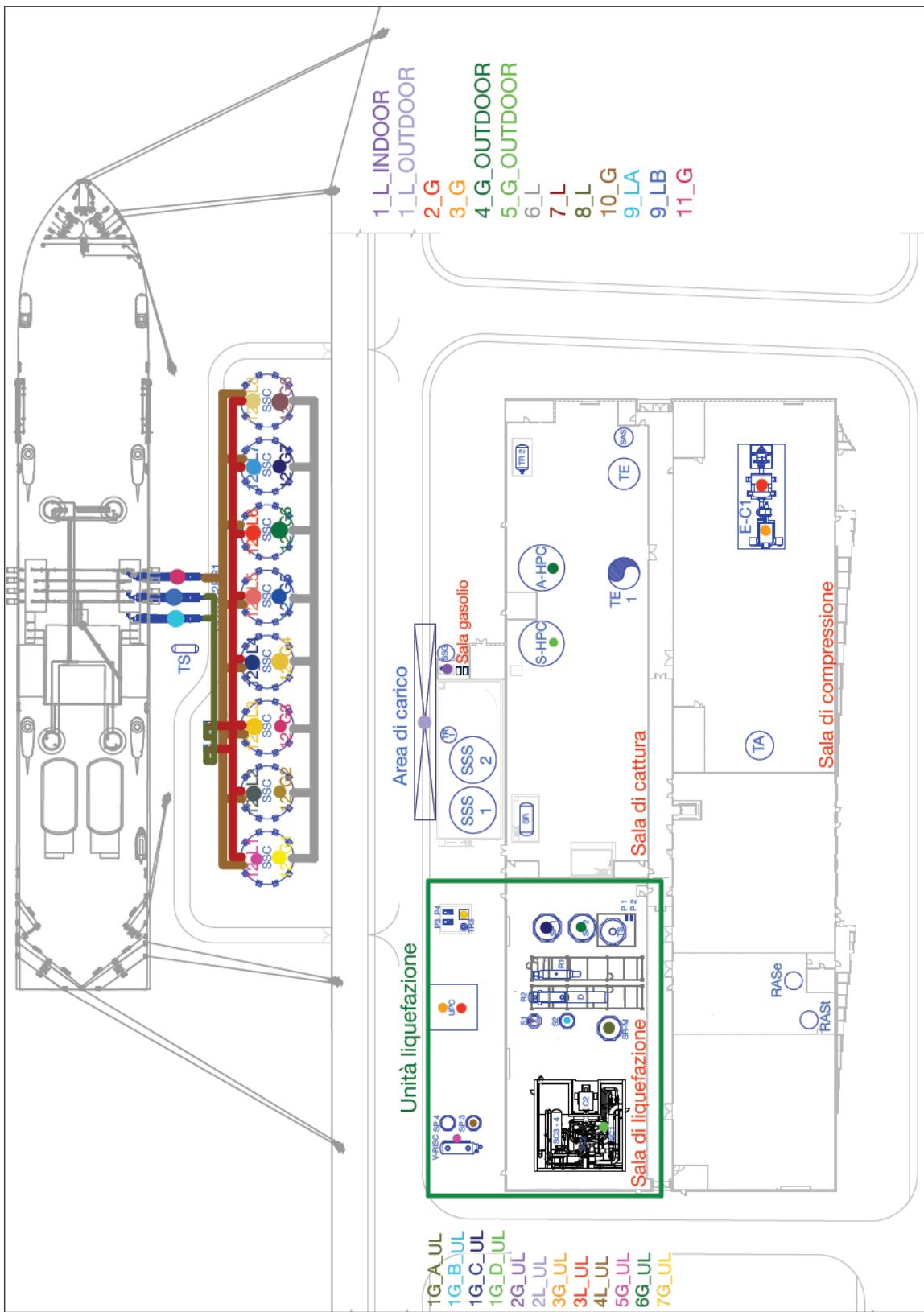


Figura 61. Punti di rilascio

Allegato 3 – Frequenze

Per lo scopo di questo lavoro di tesi, da questa sezione in poi verranno analizzate soltanto le sezioni isolabili contenenti CO₂, senza riportare i risultati del lavoro svolto per le sezioni 1_L_indoor e 1_L_outdoor, che trattano il gasolio.

Sezioni isolabili	Frequenza di perdita [ev/y]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_a	1,0E-02	1,8E-03	3,7E-04	4,7E-04
2_G_b	1,0E-02	1,8E-03	3,7E-04	4,7E-04
6_L	2,2E-03	2,9E-04	5,5E-05	3,7E-05
7_L	1,3E-02	1,2E-03	2,6E-04	1,6E-04
8_L	7,9E-03	9,9E-04	2,2E-04	1,6E-04
9_L_A	4,2E-04	5,4E-05	1,6E-05	8,3E-06
9_L_B	5,4E-04	6,9E-05	2,0E-05	1,5E-05
10_G	5,5E-03	7,8E-04	1,5E-04	1,4E-04
11_G	4,0E-04	5,3E-05	1,5E-05	1,2E-05
12_G_1	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_2	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_3	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_4	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_5	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_6	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_7	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_G_8	1,1E-03	1,7E-04	4,0E-05	2,7E-05
12_L_1	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_2	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_3	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_4	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_5	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_6	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05

Sezioni isolabili	Frequenza di perdita [ev/y]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
12_L_7	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_8	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
1G_A_UL	2,4E-02	3,3E-03	9,2E-04	1,0E-03
1G_B_UL	4,1E-03	7,2E-04	2,2E-04	2,4E-04
1G_C_UL	1,7E-03	3,5E-04	1,1E-04	1,4E-04
2_G_UL	4,5E-03	7,2E-04	2,0E-04	1,8E-04
2_L_UL	3,2E-03	4,8E-04	1,2E-04	9,5E-05
4_L_UL	3,2E-03	4,9E-04	1,2E-04	1,1E-04
5G_UL_indoor	7,9E-04	9,9E-05	2,2E-05	1,3E-05
5G_UL_outdoor	7,9E-04	9,9E-05	2,2E-05	1,3E-05
6_G_UL	3,7E-03	6,6E-04	2,1E-04	2,2E-04
7_G_UL	1,4E-03	2,1E-04	5,0E-05	4,5E-05

Tabella 49. Frequenze di perdita

Sezioni isolabili	Frequenza di dispersione [ev/y] con intervento ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_a	1,0E-02	1,7E-03	3,6E-04	4,7E-04
2_G_b	1,0E-02	1,7E-03	3,6E-04	4,7E-04
6_L	2,2E-03	2,8E-04	5,5E-05	3,6E-05
7_L	1,3E-02	1,2E-03	2,6E04	1,6E-04
8_L	7,8E-03	9,8E-04	2,2E-04	1,6E-04
9_L_A	4,1E-04	5,3E-05	1,6E-05	8,3E-06
9_L_B	5,4E-04	6,8E-05	1,9E-05	1,5E-05
10_G	5,4E-03	7,8E-04	1,5E-04	1,4E-04
11_G	3,9E-04	5,2E-05	1,5E-05	1,2E-05

Sezioni isolabili	Frequenza di dispersione [ev/y] con intervento ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_1	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_2	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_3	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_4	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_5	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_6	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_7	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_G_8	1,1E-03	1,7E-04	3,9E-05	2,7E-05
12_L_1	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_2	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_3	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_4	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_5	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_6	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_7	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
12_L_8	1,1E-03	1,7E-04	4,5E-05	3,2E-05
1G_A_UL	2,4E-02	3,2E-03	9,1E-04	1,0E-03
1G_B_UL	4,0E-03	7,1E-04	2,2E-04	2,4E-04
1G_C_UL	1,7E-03	3,5E-04	1,1E-04	1,4E-04
2_G_UL	4,4E-03	7,1E-04	2,0E-04	1,8E-04
2_L_UL	3,2E-03	4,8E-04	1,2E-04	9,4E-05
4_L_UL	3,1E-03	4,9E-04	1,2E-04	1,0E-04

Sezioni isolabili	Frequenza di dispersione [ev/y] con intervento ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
5G_UL_indoor	7,8E-04	9,8E-05	2,1E-05	1,3E-05
5G_UL_outdoor	7,8E-04	9,8E-05	2,1E-05	1,3E-05
6_G_UL	3,7E-03	6,5E-04	2,0E-04	2,2E-04
7_G_UL	1,3E-03	2,1E-04	5,0E-05	4,4E-05

Tabella 50. Frequenze di dispersione con intervento ESD

Sezioni isolabili	Frequenza di dispersione [ev/y] con guasto ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_a	1,0E-04	1,8E-05	3,7E-06	4,7E-06
2_G_b	1,0E-04	1,8E-05	3,7E-06	4,7E-06
6_L	2,2E-05	2,9E-06	5,5E-07	3,7E-07
7_L	1,3E-04	1,2E-05	2,6E-06	1,6E-06
8_L	7,9E-05	9,9E-06	2,2E-06	1,6E-06
9_L_A	4,2E-06	5,4E-07	1,6E-07	8,3E-08
9_L_B	5,4E-06	6,9E-07	2,0E-07	1,5E-07
10_G	5,5E-05	7,8E-06	1,5E-06	1,4E-06
11_G	4,0E-06	5,3E-07	1,5E-07	1,2E-07
12_G_1	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_G_2	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_G_3	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_G_4	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_G_5	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07

Sezioni isolabili	Frequenza di dispersione [ev/y] con guasto ESD			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
12_G_6	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_G_7	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_G_8	9,4E-06	1,5E-06	2,6E-07	1,5E-07
12_L_1	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_2	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_3	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_4	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_5	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_6	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_7	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
12_L_8	1,7E-05	2,8E-06	4,8E-07	2,9E-07
1G_A_LOT2	2,4E-04	3,3E-05	9,2E-06	1,0E-05
1G_B_LOT2	4,1E-05	7,2E-06	2,2E-06	2,4E-06
1G_C_LOT2	1,7E-05	3,5E-06	1,1E-06	1,4E-06
2_G_LOT2	4,5E-05	7,2E-06	2,0E-06	1,8E-06
2_L_LOT2	3,2E-05	4,8E-06	1,2E-06	9,5E-07
4_L_LOT2	3,2E-05	4,9E-06	1,2E-06	1,1E-06
5G_LOT2_indoor	7,9E-06	9,9E-07	2,2E-07	1,3E-07
5G_LOT2_outdoor	7,9E-06	9,9E-07	2,2E-07	1,3E-07
6_G_LOT2	3,7E-05	6,6E-06	2,1E-06	2,2E-06
7_G_LOT2	1,4E-05	2,1E-06	5,0E-07	4,5E-07

Tabella 51. Frequenze di dispersione con guasto ESD

Allegato 4 – Lunghezza delle nubi

In questa sezione sono riportate le lunghezze delle nubi per tutti e 4 i fori, per le condizioni peggiori e per le concentrazioni soglia di 105000 ppm (Tabella 52, Tabella 56), 120000 ppm (Tabella 53, Tabella 57), 150000 ppm (Tabella 54, Tabella 58), 280000 ppm (Tabella 55).

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
6_L	3,7	15,0	84,5	103,1
7_L	3,7	15,0	88,0	148,1
8_L	3,9	17,7	93,3	145,8
9_L_A	3,9	17,5	53,2	53,2
9_L_B	3,9	17,5	53,2	53,2
10_G	-	2,6	10,1	15,1
11_G	-	2,6	5,6	5,6
12_G_1	-	2,6	10,1	15,4
12_G_2	-	2,6	10,1	15,4
12_G_3	-	2,6	10,1	15,4
12_G_4	-	2,6	10,1	15,4
12_G_5	-	2,6	10,1	15,4
12_G_6	-	2,6	10,1	15,4
12_G_7	-	2,6	10,1	15,4
12_G_8	-	2,6	10,1	15,4
12_L_1	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_2	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_3	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_4	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_5	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_6	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_7	3,7	15,0	88,0	152,6
12_L_8	3,7	15,0	88,0	152,6
4_L_UL	4	17,1	96,3	163,1
5_G_UL	-	1,7	6,0	6,6
7_G_UL	n/a	1,8	5,6	8,4

Tabella 52. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 105000 ppm

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n/a	n/a	n/a
5_G	-	0,6	2,1	3,1
6_L	3,3	13,6	70,5	95,3
7_L	3,3	13,6	71,1	127,3
8_L	3,5	15,8	77,2	129,4
9_L_A	3,5	15,7	49,6	49,6
9_L_B	3,5	15,7	49,6	49,6
10_G	-	2,3	8,9	13,2
11_G	-	2,3	5,0	5,0
12_G_1	-	2,3	8,9	13,4
12_G_2	-	2,3	8,9	13,4
12_G_3	-	2,3	8,9	13,4
12_G_4	-	2,3	8,9	13,4
12_G_5	-	2,3	8,9	13,4
12_G_6	-	2,3	8,9	13,4
12_G_7	-	2,3	8,9	13,4
12_G_8	-	2,3	8,9	13,4
12_L_1	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_2	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_3	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_4	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_5	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_6	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_7	3,3	13,6	73,7	128,4
12_L_8	3,3	13,6	73,7	128,4
3_G_UL	1,3	4,4	18,1	28,5
3_L_UL	3,9	18,7	89,3	149,9
4_L_UL	3,6	15,4	79,8	138,4
5_G_UL	-	1,6	5,3	5,7
7_G_UL	n/a	1,7	4,8	7,3

Tabella 53. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 120000 ppm

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n/a	n/a	n/a
5_G	-	0,5	1,7	2,5
6_L	2,8	11,6	49,1	80,1
7_L	2,8	11,6	53,8	93,2
8_L	2,9	13,1	59,0	99,3
9_L_A	2,9	13,1	43,5	43,5
9_L_B	2,9	13,1	43,5	43,5
10_G	-	2,0	7,1	10,5
11_G	-	2,0	4,0	4,0
12_G_1	-	2,0	7,1	10,6
12_G_2	-	2,0	7,1	10,6
12_G_3	-	2,0	7,1	10,6
12_G_4	-	2,0	7,1	10,6
12_G_5	-	2,0	7,1	10,6
12_G_6	-	2,0	7,1	10,6
12_G_7	-	2,0	7,1	10,6
12_G_8	-	2,0	7,1	10,6
12_L_1	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_2	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_3	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_4	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_5	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_6	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_7	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_8	2,8	11,6	55,5	93,2
3_G_UL	1,2	3,5	14,2	22,1
3_L_UL	3,2	15,3	70,4	113,7
4_L_UL	3,0	13,0	61,4	101,8
5_G_UL	-	1,5	4,2	4,6
7_G_UL	n/a	1,5	3,8	5,7

Tabella 54. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 150000 ppm

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n/a	n/a	n/a
5_G	-	n/a	1,0	1,4
6_L	1,6	6,7	24,9	39,4
7_L	1,6	6,7	25,5	41,3
8_L	1,6	7,1	28,8	45,0
9_L_A	1,6	7,1	24,0	24,0
9_L_B	1,6	7,1	24,0	24,0
10_G	-	1,4	3,5	5,2
11_G	-	1,4	2,2	2,2
12_G_1	-	1,4	3,5	5,2
12_G_2	-	1,4	3,5	5,2
12_G_3	-	1,4	3,5	5,2
12_G_4	-	1,4	3,5	5,2
12_G_5	-	1,4	3,5	5,2
12_G_6	-	1,4	3,5	5,2
12_G_7	-	1,4	3,5	5,2
12_G_8	-	1,4	3,5	5,2
12_L_1	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_2	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_3	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_4	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_5	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_6	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_7	1,6	6,7	25,7	42,5
12_L_8	1,6	6,7	25,7	42,5
3_G_UL	0,9	2,0	7,0	10,5
3_L_UL	1,7	8,0	33,8	53,6
4_L_UL	1,7	7,4	29,3	47,3
5_G_UL	-	1,1	2,2	2,4
7_G_UL	n/a	1,2	2,8	3,0

Tabella 55. Lunghezza delle nubi per rilasci senza intervento ESD, 280000 ppm

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
6_L	3,7	-	-	-
7_L	3,7	14,0	-	-
8_L	3,9	-	-	-
9_L_A	-	-	-	-
9_L_B	-	-	-	-
10_G	-	1,0	-	-
11_G	-	0,9	-	-
12_G_1	-	2,4	4,2	4,4
12_G_2	-	2,4	4,2	4,4
12_G_3	-	2,4	4,2	4,4
12_G_4	-	2,4	4,2	4,4
12_G_5	-	2,4	4,2	4,4
12_G_6	-	2,4	4,2	4,4
12_G_7	-	2,4	4,2	4,4
12_G_8	-	2,4	4,2	4,4
12_L_1	3,7	15	88	152,6
12_L_2	3,7	15	88	152,6
12_L_3	3,7	15	88	152,6
12_L_4	3,7	15	88	152,6
12_L_5	3,7	15	88	152,6
12_L_6	3,7	15	88	152,6
12_L_7	3,7	15	88	152,6
12_L_8	3,7	15	88	152,6
4_L_UL	4,0	16,9	-	-
5_G_UL	n/a	1,0	-	-
7_G_UL	n/a	1,6	1,9	3,4

Tabella 56. Lunghezza delle nubi per rilasci con intervento ESD, 105000 ppm

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n/a	n/a	n/a
5_G	-	0,5	1,3	1,4
6_L	-	-	-	-
7_L	3,3	-	-	-
8_L	3,5	-	-	-

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
9_L_A	-	-	-	-
9_L_B	-	-	-	-
10_G	-	0,9	-	-
11_G	-	-	-	-
12_G_1	-	1,9	2	3,3
12_G_2	-	1,9	2	3,3
12_G_3	-	1,9	2	3,3
12_G_4	-	1,9	2	3,3
12_G_5	-	1,9	2	3,3
12_G_6	-	1,9	2	3,3
12_G_7	-	1,9	2	3,3
12_G_8	-	1,9	2	3,3
12_L_1	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_2	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_3	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_4	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_5	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_6	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_7	3,3	13,6	73,4	127,8
12_L_8	3,3	13,6	73,4	127,8
3_G_UL	1,3	4	4	4,1
3_L_UL	3,9	-	-	-
4_L_UL	3,6	14,3	-	-
5_G_UL	-	-	-	-
7_G_UL	n/a	n/a	1,7	3,1

Tabella 57. Lunghezza delle nubi per rilasci con intervento ESD, 120000 ppm

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G	-	n/a	n/a	n/a
5_G	-	0,4	1,5	1,9
6_L	2,8	-	-	-
7_L	2,8	11,4	-	-
8_L	2,9	12,9	-	-
9_L_A	2,9	-	-	-

Sezione isolabile	Lunghezza della nube [m]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
9_L_B	2,9	-	-	-
10_G	-	0,7	2,5	-
11_G	-	0,7	-	-
12_G_1	-	1,9	4,2	4,4
12_G_2	-	1,9	4,2	4,4
12_G_3	-	1,9	4,2	4,4
12_G_4	-	1,9	4,2	4,4
12_G_5	-	1,9	4,2	4,4
12_G_6	-	1,9	4,2	4,4
12_G_7	-	1,9	4,2	4,4
12_G_8	-	1,9	4,2	4,4
12_L_1	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_2	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_3	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_4	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_5	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_6	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_7	2,8	11,6	55,5	93,2
12_L_8	2,8	11,6	55,5	93,2
3_G_UL	1,2	3,2	3,9	3,6
3_L_UL	3,2	15,2	-	-
4_L_UL	3,0	13,0	56,8	-
5_G_UL	n/a	0,6	-	-
7_G_UL	n/a	1,5	2,1	2,5

Tabella 58. Lunghezza delle nubi per rilasci con intervento ESD, 150000 ppm

Non viene riportata una tabella per le lunghezze delle nubi per rilasci con intervento ESD per la concentrazione di 280000 ppm, in quanto a questa concentrazione si ha morte istantanea per asfissia. I risultati sono gli stessi presenti in Tabella 55.

Allegato 5 – Concentrazioni tossiche

5.1 Sala di compressione

1,7 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_a	-	-	-	-
3_G_a	-	-	-	-

Tabella 59. Concentrazioni tossiche sala di compressione, caso 1

0,9 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_a	-	-	-	-
3_G_a	-	-	-	-

Tabella 60. Concentrazioni tossiche sala di compressione, caso 2

0,001 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_a	-	174180	174215	174216
3_G_a	-	-	-	-

Tabella 61. Concentrazioni tossiche sala di compressione, caso 3

5.2 Sala di cattura

1,8 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_b	-	-	-	-
3_G_b	-	-	-	-
4_G_indoor	-	-	134990	308406
5_G_indoor	-	-	-	-

Tabella 62. Concentrazioni tossiche sala di cattura, caso 1

0,8 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_b	-	-	-	-
3_G_b	-	-	-	-

Tabella 63. Concentrazioni tossiche sala di cattura, caso 2

0,001 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_b	-	148871	148901	148903
3_G_b	-	-	-	-

0,001 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
4_G_indoor	-	247663	796376	796420
5_G_indoor	-	-	115569	260029

Tabella 64. Concentrazioni tossiche sala di cattura, caso 3

5.3 Sala di liquefazione

15 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
1G_A_UL	-	-	-	-
1G_B_UL	-	-	-	-
1G_C_UL	-	-	-	-
1G_D_UL	-	-	-	-
2_G_UL	-	-	317978	489376
2_L_UL	-	-	-	-
5G_UL_indoor	-	-	-	-
6_G_UL	-	-	-	-

Tabella 65. Concentrazioni tossiche sala di liquefazione, caso 1

1,7 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
1G_A_UL	-	-	-	-
1G_B_UL	-	-	-	-
1G_C_UL	-	-	-	-
2_G_UL	-	231976	Saturazione della stanza	Saturazione della stanza
2_L_UL	668650	668650	Saturazione della stanza	Saturazione della stanza
5G_UL_indoor	-	-	-	-
6_G_UL	-	-	-	-

Tabella 66. Concentrazioni tossiche sala di liquefazione, caso 2

0,001 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
1G_A_UL	-	275065	275116	275118
1G_B_UL	-	129168	129181	129182
1G_C_UL	-	254460	254506	254508
1G_D_UL	151088	348321	348337	348337

0,001 ACPH	Concentrazioni tossiche [ppm]			
	5 mm	25 mm	100 mm	150 mm
2_G_UL	171773	Saturazione della stanza	Saturazione della stanza	Saturazione della stanza
2_L_UL	434747	Saturazione della stanza	Saturazione della stanza	Saturazione della stanza
5G_UL_indoor	-	-	-	-
6_G_UL	-	-	-	-

Tabella 67. Concentrazioni tossiche sala di liquefazione, caso 3

Allegato 6 – Sezione 4_G_outdoor

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	4,50	90	30000	1,218
V-2	4,75	90	30000	1,233
Caso base	5,00	90	30000	1,247
V-3	5,25	90	30000	1,260
V-4	5,50	90	30000	1,273

Tabella 68. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione, sezione 4_G

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	5	81,00	30000	1,252
V-2	5	85,5	30000	1,249
Caso base	5	90,00	30000	1,247
V-3	5	94,5	30000	1,244
V-4	5	99,00	30000	1,241

Tabella 69. Lunghezza della nube per diversi valori di temperatura, sezione 4_G

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	5	90	27000	1,247
V-2	5	90	28500	1,247
Caso base	5	90	30000	1,247
V-3	5	90	31500	1,247
V-4	5	90	33000	1,247

Tabella 70. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione 4_G

Allegato 7 – Sezione 5_G_outdoor

Lunghezza della nube

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	0,5	60	6300	3,510
V-2	0,5	60	6650	3,510
Caso base	0,5	60	7000	3,510
V-3	0,5	60	7350	3,510
V-4	0,5	60	7700	3,510

Tabella 71. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	0,5	60	7000	1,473
V-2	0,475	57	7000	3,510
Caso base	0,525	63	7000	3,508
V-3	0,475	63	7000	3,467
V-4	0,525	57	7000	3,553

Tabella 72. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione isolabile 5_G

Volume della nube

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	0,45	60	7000	0,353
V-2	0,475	60	7000	0,358
Caso base	0,5	60	7000	0,365
V-3	0,525	60	7000	0,369
V-4	0,55	60	7000	0,373

Tabella 73. Volume della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	0,5	54	7000	0,373
V-2	0,5	57	7000	0,368
Caso base	0,5	60	7000	0,365
V-3	0,5	63	7000	0,358
V-4	0,5	66	7000	0,355

Tabella 74. Volume della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	0,5	60	6300	0,363
V-2	0,5	60	6650	0,363
Caso base	0,5	60	7000	0,365
V-3	0,5	60	7350	0,363
V-4	0,5	60	7700	0,363

Tabella 75. Volume della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G

Tempo di residenza della nube

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	0,45	60	7000	430
V-2	0,475	60	7000	433
Caso base	0,5	60	7000	436
V-3	0,525	60	7000	438
V-4	0,55	60	7000	440

Tabella 76. Tempo di residenza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	0,5	54	7000	431
V-2	0,5	57	7000	433
Caso base	0,5	60	7000	436
V-3	0,5	63	7000	438
V-4	0,5	66	7000	440

Tabella 77. Tempo di residenza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	0,5	60	6300	393
V-2	0,5	60	6650	414
Caso base	0,5	60	7000	436
V-3	0,5	60	7350	457
V-4	0,5	60	7700	479

Tabella 78. Tempo di residenza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G

Temperatura di centreline della nube

5_G 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	0,45	60	7000	33,68
V-2	0,475	60	7000	32,50
Caso base	0,5	60	7000	31,34
V-3	0,525	60	7000	30,21
V-4	0,55	60	7000	29,10

Tabella 79. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G

5_G 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	0,5	54	7000	25,68
V-2	0,5	57	7000	28,51
Caso base	0,5	60	7000	31,34
V-3	0,5	63	7000	34,17
V-4	0,5	66	7000	37

Tabella 80. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G

5_G 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	0,5	60	6300	31,34
V-2	0,5	60	6650	31,34
Caso base	0,5	60	7000	31,34
V-3	0,5	60	7350	31,34
V-4	0,5	60	7700	31,34

Tabella 81. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G

5_G 3 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	0,45	60	7000	14,37
V-2	0,475	60	7000	14,13
Caso base	0,5	60	7000	13,88
V-3	0,525	60	7000	13,80
V-4	0,55	60	7000	13,60

Tabella 82. Temperatura di centreline della nube a 3 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 5_G

5_G 3 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	0,5	54	7000	12,87
V-2	0,5	57	7000	13,38
Caso base	0,5	60	7000	13,88
V-3	0,5	63	7000	14,38
V-4	0,5	66	7000	14,88

Tabella 83. Temperatura di centreline della nube a 3 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 5_G

5_G 3 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	0,5	60	6300	13,88
V-2	0,5	60	6650	13,88
Caso base	0,5	60	7000	13,88
V-3	0,5	60	7350	13,88
V-4	0,5	60	7700	13,88

Tabella 84. Temperatura di centreline della nube a 3 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 5_G

Allegato 8 – Sezione 3_G_UL

Lunghezza della nube

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	54	20	11700	33,135
V-2	54	20	12350	33,136
Caso base	54	20	13000	33,136
V-3	54	20	13650	33,136
V-4	54	20	14300	33,136

Tabella 85. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione 3_G_UL

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	54	20	13000	33,136
V-2	51,3	19	13000	31,590
Caso base	56,7	21	13000	34,741
V-3	51,3	21	13000	31,305
V-4	56,7	19	13000	-

Tabella 86. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione 3_G_UL

Volume della nube

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	48,6	20	13000	138,687
V-2	51,3	20	13000	159,759
Caso base	54	20	13000	184,967
V-3	56,7	20	13000	-
V-4	59,4	20	13000	-

Tabella 87. Volume della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	54	18	13000	-
V-2	54	19	13000	187,899
Caso base	54	20	13000	184,967
V-3	54	21	13000	182,497
V-4	54	22	13000	180,110

Tabella 88. Volume della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	54	20	11700	184,967
V-2	54	20	12350	184,967
Caso base	54	20	13000	184,967
V-3	54	20	13650	184,967
V-4	54	20	14300	184,967

Tabella 89. Volume della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL

Tempo di residenza della nube

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	48,6	20	13000	62
V-2	51,3	20	13000	59
Caso base	54	20	13000	55
V-3	56,7	20	13000	-
V-4	59,4	20	13000	-

Tabella 90. Tempo di residenza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	54	18	13000	-
V-2	54	19	13000	54
Caso base	54	20	13000	55
V-3	54	21	13000	56
V-4	54	22	13000	56

Tabella 91. Tempo di residenza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	54	20	11700	51
V-2	54	20	12350	53
Caso base	54	20	13000	55
V-3	54	20	13650	57
V-4	54	20	14300	59

Tabella 92. Tempo di residenza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL

Temperatura di centreline della nube

3_G_UL 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	48,6	20	13000	-78,45
V-2	51,3	20	13000	-78,45
Caso base	54	20	13000	-78,45
V-3	56,7	20	13000	-
V-4	59,4	20	13000	-

Tabella 93. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	18	13000	-
V-2	54	19	13000	-78,45
Caso base	54	20	13000	-78,45
V-3	54	21	13000	-78,45
V-4	54	22	13000	-78,45

Tabella 94. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	20	11700	-78,45
V-2	54	20	12350	-78,45
Caso base	54	20	13000	-78,45
V-3	54	20	13650	-78,45
V-4	54	20	14300	-78,45

Tabella 95. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL 15 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	48,6	20	13000	-15,78
V-2	51,3	20	13000	-18,19
Caso base	54	20	13000	-21,03
V-3	56,7	20	13000	-
V-4	59,4	20	13000	-

Tabella 96. Temperatura di centreline della nube a 15 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL 15 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	18	13000	-
V-2	54	19	13000	-21,80
Caso base	54	20	13000	-21,03
V-3	54	21	13000	-20,33
V-4	54	22	13000	-19,62

Tabella 97. Temperatura di centreline della nube a 15 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_G_UL

3_G_UL 15 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	20	11700	-21,03
V-2	54	20	12350	-21,03
Caso base	54	20	13000	-21,03
V-3	54	20	13650	-21,03
V-4	54	20	14300	-21,03

Tabella 98. Temperatura di centreline della nube a 15 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_G_UL

Allegato 9 – Sezione 3_L_UL

In questa sezione il segno “–” indica che la simulazione non può essere eseguita in quanto la temperatura risulta minore del limite inferiore.

Lunghezza della nube

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	54	-54	32400	174,6
V-2	54	-54	34200	174,6
Caso base	54	-54	36000	174,6
V-3	54	-54	37800	174,61
V-4	54	-54	39600	174,61

Tabella 99. Lunghezza della nube per diversi valori di inventario, sezione 3_L_UL

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Lunghezza [m]
V-1	54	-54	36000	174,6
V-2	51,3	-56,7	36000	174,81
Caso base	56,7	-51,3	36000	174,34
V-3	51,3	-51,3	36000	173,1
V-4	56,7	-56,7	36000	176,1

Tabella 100. Lunghezza della nube per diversi valori di pressione e temperatura, sezione 3_L_UL

Volume della nube

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	48,6	-54	36000	11792,49
V-2	51,3	-54	36000	11825,91
Caso base	54	-54	36000	11899,13
V-3	56,7	-54	36000	11958,36
V-4	59,4	-54	36000	12029,84

Tabella 101. Volume della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	54	-59,4	36000	-
V-2	54	-56,7	36000	12055,716
Caso base	54	-54	36000	11899,127
V-3	54	-51,3	36000	11730,675
V-4	54	-48,6	36000	11584,686

Tabella 102. Volume della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Volume [m³]
V-1	54	-54	32400	11897,9
V-2	54	-54	34200	11898,81
Caso base	54	-54	36000	11899,13
V-3	54	-54	37800	11899,6
V-4	54	-54	39600	11899,64

Tabella 103. Volume della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL

Tempo di residenza della nube

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	48,6	-54	36000	33
V-2	51,3	-54	36000	32
Caso base	54	-54	36000	32
V-3	56,7	-54	36000	31
V-4	59,4	-54	36000	30

Tabella 104. Tempo di residenza della nube per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	54	-59,4	36000	-
V-2	54	-56,7	36000	32
Caso base	54	-54	36000	32
V-3	54	-51,3	36000	31
V-4	54	-48,6	36000	31

Tabella 105. Tempo di residenza della nube per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Tempo di residenza [s]
V-1	54	-54	32400	29
V-2	54	-54	34200	30
Caso base	54	-54	36000	32
V-3	54	-54	37800	33
V-4	54	-54	39600	35

Tabella 106. Tempo di residenza della nube per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL

Temperatura di centreline della nube

3_L_UL 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	48,6	-54	36000	-78,45
V-2	51,3	-54	36000	-78,45
Caso base	54	-54	36000	-78,45
V-3	56,7	-54	36000	-78,45
V-4	59,4	-54	36000	-8,45

Tabella 107. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	-59,4	36000	No; < limite
V-2	54	-56,7	36000	-78,45
Caso base	54	-54	36000	78,45
V-3	54	-51,3	36000	-78,45
V-4	54	-48,6	36000	-78,45

Tabella 108. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL 0 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	-54	32400	-78,45
V-2	54	-54	34200	-78,45
Caso base	54	-54	36000	-78,45
V-3	54	-54	37800	-78,45
V-4	54	-54	39600	-78,45

Tabella 109. Temperatura di centreline della nube a 0 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL 87 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	48,6	-54	36000	-96,11
V-2	51,3	-54	36000	-95,53
Caso base	54	-54	36000	-95,44
V-3	56,7	-54	36000	-95,75
V-4	59,4	-54	36000	-96,15

Tabella 110. Temperatura di centreline della nube a 87 metri per diversi valori di pressione, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL 87 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	-59,4	36000	No; < limite
V-2	54	-56,7	36000	-95,94
Caso base	54	-54	36000	-95,44
V-3	54	-51,3	36000	-94,91
V-4	54	-48,6	36000	-94,4

Tabella 111. Temperatura di centreline della nube a 87 metri per diversi valori di temperatura, sezione isolabile 3_L_UL

3_L_UL 87 metri	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	T di centreline [°C]
V-1	54	-54	32400	-95,44
V-2	54	-54	34200	-95,44
Caso base	54	-54	36000	-95,44
V-3	54	-54	37800	-95,44
V-4	54	-54	39600	-95,44

Tabella 112. Temperatura di centreline della nube a 87 metri per diversi valori di inventario, sezione isolabile 3_L_UL

Allegato 10 – Sezione 3_G

3_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	3,6	210	300	32641
V-2	3,8	210	300	32801
Caso base	4	210	300	32933
V-3	4,2	210	300	33041
V-4	4,4	210	300	33132

Tabella 113. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di pressione

3_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	4	189	300	31456
V-2	4	199,5	300	32195
Caso base	4	210	300	32933
V-3	4	220,5	300	33672
V-4	4	231	300	34412

Tabella 114. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di temperatura

3_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	4	210	270	29760
V-2	4	210	285	31351
Caso base	4	210	300	32933
V-3	4	210	315	34508
V-4	4	210	330	36075

Tabella 115. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di inventario

3_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
Caso base	4	210	300	32933
V-1	4,2	220,5	315	35406
V-2	3,8	220,5	315	35132
V-3	4,2	199,5	315	33852
V-4	4,2	220,5	285	32158
V-5	3,8	199,5	285	30530
V-6	3,8	199,5	315	33597
V-7	3,8	220,5	285	31929
V-8	4,2	199,5	285	30744

Tabella 116. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 3_G per diversi valori di pressione, temperatura e inventario

Allegato 11 – Sezione 4_G_indoor

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	4,50	90	30000	286496
V-2	4,75	90	30000	297475
Caso base	5	90	30000	308406
V-3	5,25	90	30000	319292
V-4	5,50	90	30000	330136

Tabella 117. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di pressione

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	5	81	30000	304196
V-2	5	85,5	30000	306307
Caso base	5	90	30000	308406
V-3	5	94,5	30000	310493
V-4	5	99	30000	312567

Tabella 118. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di temperatura

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	5	90	27000	308063
V-2	5	90	28500	308247
Caso base	5	90	30000	308406
V-3	5	90	31500	308545
V-4	5	90	33000	308669

Tabella 119. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di inventario

4_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
Caso base	5	90	30000	308406
V-1	5,25	94,5	31500	321610
V-2	4,75	94,5	31500	299608
V-3	5,25	85,5	31500	317268
V-4	5,25	94,5	28500	321282
V-5	4,75	85,5	28500	295312
V-6	4,75	85,5	31500	295583
V-7	4,75	94,5	28500	299340
V-8	5,25	85,5	28500	316937

Tabella 120. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 4_G per diversi valori di pressione, temperatura e inventario

Allegato 12 – Sezione 5_G_indoor

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	0,45	65	7000	64190
V-2	0,475	65	7000	66035
Caso base	0,5	65	7000	67830
V-3	0,525	65	7000	69577
V-4	0,55	65	7000	71282

Tabella 121. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di pressione

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	0,5	54	7000	67087
V-2	0,5	57	7000	67460
Caso base	0,5	60	7000	67830
V-3	0,5	63	7000	68197
V-4	0,5	66	7000	68563

Tabella 122. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di temperatura

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	0,5	65	6300	66859
V-2	0,5	65	6650	67381
Caso base	0,5	65	7000	67830
V-3	0,5	65	7350	68210
V-4	0,5	65	7700	68535

Tabella 123. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di inventario

5_G	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
Caso base	0,5	60	7000	67830
V-1	0,525	63	7350	70338
V-2	0,475	63	7350	66767
V-3	0,525	57	7350	69587
V-4	0,525	63	6650	69503
V-5	0,475	57	6650	65228
V-6	0,475	57	7350	66054
V-7	0,475	63	6650	65954
V-8	0,525	57	6650	68738

Tabella 124. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 5_G per diversi valori di pressione, temperatura e inventario

Allegato 13 – Sezione 1G_D_UL

1G_D_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	72	110	3000	187461
V-2	75,5	110	3000	188879
Caso base	79	110	3000	190178
V-3	82,5	110	3000	191369
V-4	86	110	3000	192464

Tabella 125. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di pressione

1G_D_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	79	99	3000	190978
V-2	79	104,5	3000	190560
Caso base	79	110	3000	190178
V-3	79	115,5	3000	189828
V-4	79	121	3000	189513

Tabella 126. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di temperatura

1G_D_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
V-1	79	110	2700	173312
V-2	79	110	2850	181812
Caso base	79	110	3000	190178
V-3	79	110	3150	198410
V-4	79	110	3300	206515

Tabella 127. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di inventario

1G_D_UL	p [barg]	T [°C]	Inventario [kg]	Concentrazione massima [ppm]
Caso base	79	110	3000	190178
V-1	82,5	115,5	3150	199344
V-2	75,5	115,5	3150	196627
V-3	82,5	104,5	3150	200137
V-4	82,5	115,5	2850	182560
V-5	75,5	104,5	2850	180984
V-6	75,5	104,5	3150	197386
V-7	75,5	115,5	2850	180317
V-8	82,5	104,5	2850	183247

Tabella 128. Concentrazione massima prodotta per lo scenario della sezione 1G_D_UL per diversi valori di pressione, temperatura e inventario

Allegato 14 – SDS CO₂



Scheda di Dati di Sicurezza

Conforme all'Allegato II del REACH - Regolamento (UE) 2020/878

ANIDRIDE CARBONICA

Versione 2.0 del: 03/08/2023

Sostituisce Versione 1.0 del: 01/02/2021



Attenzione

SEZIONE 1: Identificazione della sostanza/miscela e della società/impresa

1.1. Identificatore del prodotto

Nome commerciale:	Anidride carbonica Anidride carbonica alimentare
Scheda Nr.:	GT/06
Denominazione chimica:	Diossido di carbonio
Numero CAS:	124-38-9
Numero CE:	204-696-9
Numero indice:	--
Numero di registrazione:	Indicata nella lista di sostanze dell'Allegato IV/V del REACH, esente dall'obbligo di registrazione
Formula chimica:	CO ₂

1.2. Usi identificati pertinenti della sostanza o della miscela e usi sconsigliati

Usi pertinenti identificati:	Impiego industriale e professionale. Fare un'analisi di rischio prima dell'uso. Gas di test/Gas di calibrazione. Gas per inertizzazione, diluizione, spurgo. Gas di protezione nei processi di saldatura. Uso nella produzione di componenti elettronici/fotovoltaici. Uso di laboratorio. Applicazioni alimentari. Contattare il fornitore per ulteriori informazioni sull'utilizzo.
------------------------------	--

1.3. Informazioni sul fornitore della scheda di dati di sicurezza

Identificazione della società: AGN ENERGIA S.P.A.

SEZIONE 2. Identificazione dei pericoli

2.1. Classificazione della sostanza o della miscela

Classificazione secondo il regolamento (CE) n. 1272/2008 [CLP]	
Pericoli fisici	Gas sotto pressione: Gas liquefatto H280

2.2. Elementi dell'etichetta

Etichettatura di pericolo ai sensi del Regolamento (CE) 1272/2008 (CLP) e successive modifiche ed adeguamenti

Pittogrammi di pericolo (CLP)



GHS04

Avvertenza (CLP)

Indicazioni di pericolo (CLP)

Consigli di prudenza (CLP)

- Conservazione:

Attenzione

H280 - Contiene gas sotto pressione; può esplodere se riscaldato

P403 - Conservare in luogo ben ventilato

2.3. Altri pericoli

Asfissiante in alte concentrazioni.

Il contatto con il liquido può causare ustioni da congelamento.

In alta concentrazione il diossido di carbonio causa rapidamente insufficienza respiratoria. I sintomi sono mal di testa, nausea e vomito che possono portare alla perdita di conoscenza.

Non classificato come PBT o vPvB.

La sostanza non presenta proprietà di interferenza con il sistema endocrino.

SEZIONE 3. Composizione/informazioni sugli ingredienti

3.1. Sostanze

Nome	Identificatore di prodotto	%	Classificazione secondo il regolamento (CE) n. 1272/2008 [CLP]
Diossido di carbonio	(Numero CAS) 124-38-9 (Numero CE) 204-696-9 (Numero indice EU) --- (Numero di registrazione:) *1	100	Press. Gas (Liq.), H280

Non contiene altri prodotti e/o impurezze che influenzano la classificazione del prodotto.

*1: Indicata nella lista di sostanze dell'Allegato IV/V del REACH, esente dall'obbligo di registrazione.

*2: Scadenza di registrazione non superata.

*3: Registrazione non richiesta: sostanza fabbricata o importata in quantità <1t/anno.

SEZIONE 4. Misure di primo soccorso

4.1. Descrizione delle misure di primo soccorso

- Inalazione: Spostare la vittima in zona non contaminata indossando l'autorespiratore. Mantenere il paziente disteso e al caldo. Chiamare un medico. Procedere alla rianimazione cardiopolmonare in caso di arresto della respirazione.
- Contatto con la pelle: In caso di ustioni da congelamento spruzzare con acqua per almeno 15 minuti. Applicare una garza sterile. Procursarsi assistenza medica.
- Contatto con gli occhi: Lavare immediatamente gli occhi con acqua per almeno 15 minuti.
- Ingestione: L'ingestione è considerata una via di esposizione poco probabile.

4.2. Principali sintomi ed effetti, sia acuti che ritardati

In alta concentrazione può causare asfissia. I sintomi possono includere perdita di mobilità e/o conoscenza. Le vittime possono non rendersi conto dell'asfissia.

Basse concentrazioni di CO2 causano aumento della frequenza respiratoria e mal di testa.

4.3. Indicazione dell'eventuale necessità di consultare immediatamente un medico e di trattamenti speciali

In caso di malessere consultare un medico.

SEZIONE 5. Misure di lotta antincendio

5.1. Mezzi di estinzione

- Mezzi di estinzione idonei: Acqua nebulizzata.
- Mezzi di estinzione non idonei: Non usare getti d'acqua per estinguere l'incendio.

5.2. Pericoli speciali derivanti dalla sostanza o dalla miscela

- Pericoli specifici L'esposizione alle fiamme può causare la rottura o l'esplosione del recipiente.
- Prodotti di combustione pericolosi Nessuno(a).

5.3. Raccomandazioni per gli addetti all'estinzione degli incendi

- Metodi specifici Utilizzare misure antincendio adeguate all'incendio circostante. L'esposizione alle fiamme e al calore può causare la rottura del recipiente. Raffreddare i contenitori esposti al rischio con getti d'acqua a doccia da una posizione protetta. Non riversare l'acqua contaminata dell'incendio negli scarichi fognari.

Se possibile arrestare la fuoriuscita di prodotto.

Se possibile utilizzare acqua nebulizzata per abbattere i fumi.

Spostare i recipienti lontano dall'area dell'incendio se questo può essere fatto senza rischi.

- Dispositivi di protezione speciali per addetti antincendio Usare l'autorespiratore in spazi confinati.

Indumenti di protezione e dispositivi di protezione (autorespiratori) standard per vigili del fuoco.
EN 137 - Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Autorespiratori a circuito aperto ad aria compressa con maschera intera.
EN 469 - Indumenti di protezione per vigili del fuoco. EN 659 - Guanti di protezione per vigili del fuoco

SEZIONE 6. Misure in caso di rilascio accidentale

6.1. Precauzioni personali, dispositivi di protezione e procedure in caso di emergenza

Tentare di arrestare la fuoriuscita.
Evacuare l'area.
Usare l'autorespiratore per entrare nella zona interessata se non è provato che l'atmosfera sia respirabile.
Assicurare una adeguata ventilazione.
Evitarne l'ingresso in fognature, scabinati, scavi e zone dove l'accumulo può essere pericoloso.
Operare in accordo al piano di emergenza locale.
Rimanere sopravvento.
Quando è possibile il rilascio di gas asfissianti, devono essere utilizzati dei rilevatori di ossigeno.

6.2. Precauzioni ambientali

Tentare di arrestare la fuoriuscita.

6.3. Metodi e materiali per il contenimento e per la bonifica

Ventilare la zona

6.4. Riferimento ad altre sezioni

Vedere anche le sezioni 8 e 13.

SEZIONE 7. Manipolazione e immagazzinamento

7.1. Precauzioni per la manipolazione sicura

Uso sicuro del prodotto

Non respirare il gas.
Evitare il rilascio del prodotto in atmosfera.
I serbatoi contenenti o che abbiano contenuto prodotti infiammabili o esplosivi non devono essere resi inerti con diossido di carbonio liquido. Deve essere esclusa qualsiasi formazione di particelle di CO₂ solido. Il sistema deve essere correttamente collegato a terra per evitare i rischi di scarica elettrostatica.
Il prodotto deve essere manipolato in accordo alle buone prassi di sicurezza e di igiene industriale.
Prendere in considerazione le valvole di sicurezza nelle installazioni per gas.
Soltanto il personale con esperienza e opportunamente addestrato può manipolare i gas sotto pressione.
Prendere in considerazione le valvole di sicurezza nelle installazioni per gas.
Assicurarsi che l'intero sistema di distribuzione del gas sia stato (o sia regolarmente) verificato contro le fughe prima dell'uso.
Non fumare mentre si manipola il prodotto.
Utilizzare solo apparecchiature specifiche adatte per il prodotto, la pressione e la temperatura di impiego. In caso di dubbi contattare il fornitore del gas.
Evitare il risucchio di acqua, acidi ed alcali.

Manipolazione sicura del contenitore del gas

Non permettere il riflusso del gas nel contenitore.
Proteggere le bombole da danni fisici; non trascinare, far rotolare, far scivolare o far cadere.
Quando si spostano le bombole, anche se per brevi distanze, utilizzare gli opportuni mezzi di movimentazione (carrelli, carrelli a mano, etc....) progettati per il trasporto delle bombole.
Lasciare i cappellotti di protezione delle valvole in posizione fino a quando il contenitore non è stato fissato a un muro o a un banco di lavoro o posizionato in un opportuno sostegno ed è pronto per l'uso.
Se l'operatore incontra una qualsiasi difficoltà durante il funzionamento della valvola interrompere l'uso e contattare il fornitore.
Mai tentare di riparare o modificare le valvole dei contenitori o i dispositivi di sicurezza.
Le valvole danneggiate devono essere immediatamente segnalate al fornitore.
Mantenere le valvole dei contenitori pulite e libere da contaminanti, in particolare olio e acqua.
Rimontare i tappi e/o i cappellotti delle valvole e dei contenitori, ove forniti, non appena il contenitore è disconnesso dall'apparecchiatura.
Chiudere la valvola del contenitore dopo ogni utilizzo anche se vuoto, anche se ancora connesso all'apparecchiatura.
Mai tentare di trasferire i gas da un contenitore a un altro.
Non utilizzare fiamme dirette o riscaldamento elettrico per aumentare la pressione interna del contenitore.

Non rimuovere né rendere illeggibili le etichette apposte dal fornitore per l'identificazione del contenuto del recipiente.
 Evitare il risucchio di acqua nel contenitore.
 Aprire lentamente la valvola per evitare colpi di pressione.

7.2. Condizioni per lo stoccaggio sicuro, comprese eventuali incompatibilità

Osservare le normative e i requisiti legislativi locali relativi allo stoccaggio dei recipienti.
 I recipienti non devono essere immagazzinati in condizioni tali da favorire fenomeni corrosivi.
 I cappellotti e/o i tappi devono essere montati.
 I recipienti devono essere immagazzinati in posizione verticale e ancorati in modo da prevenirne la caduta.
 I contenitori in stoccaggio dovrebbero essere controllati periodicamente per verificarne le condizioni generali ed eventuali perdite.
 Mantenere il contenitore sotto i 50°C in zona ben ventilata.
 Non immagazzinare con gas o materiali infiammabili.
 Immagazzinare i recipienti in aree dove non vi è rischio di incendio, lontano da sorgenti di calore e da fonti di ignizione.
 Tenere lontano da sostanze combustibili.

7.3. Usi finali particolari

Vedi sottosezione 1.2

SEZIONE 8. Controlli dell'esposizione/della protezione individuale

8.1. Parametri di controllo

OEL (Limiti di esposizione professionale):		
UE	ILV (EU) - 8 H - [mg/m ³]	9000 mg/m ³
	ILV (EU) - 8 H - [ppm]	5000 ppm
ACGIH	ACGIH TWA (ppm)	5000 ppm
	ACGIH STEL (ppm)	30000 ppm
	Commento (ACGIH)	Asphyxia
Italia	Valori Limite di Esposizione Professionale (Italia) 8 ore [mg/m ³]	9000 mg/m ³
	Valori Limite di Esposizione Professionale (Italia) 8 ore [ppm]	5000 ppm

DNEL (Livello derivato senza effetto: Nessun dato disponibile.
 PNEC (Prevedibili concentrazioni prive di effetti): Nessun dato disponibile.

8.2. Controlli dell'esposizione

8.2.1. Controlli tecnici idonei

Fornire adeguata ventilazione degli scarichi a livello generale e locale.
 I sistemi sotto pressione devono essere controllati periodicamente per verificare l'assenza di perdite.
 Assicurare che l'esposizione sia ben al di sotto dei limiti di esposizione professionale (ove disponibili).
 Quando è possibile il rilascio di gas asfissianti, devono essere utilizzati dei rilevatori di ossigeno.
 Considerare l'uso di un sistema di permessi di lavoro, per esempio per le attività di manutenzione.
 Quando è possibile il rilascio di CO₂ dovrebbero essere utilizzati dei rilevatori di CO₂.

Dovrebbe essere condotta e documentata un'analisi del rischio in ogni area di lavoro, per valutare il rischio correlato all'utilizzo del prodotto e per individuare i DPI appropriati ai rischi identificati. Devono essere considerate le seguenti raccomandazioni: Devono essere selezionati DPI conformi agli standard EN/ISO raccomandati.
 Indossare occhiali di sicurezza con protezione laterale.
 Standard EN 166 - Protezione personale degli occhi - Specifiche.

- Protezione per occhi/volto:

Indossare guanti da lavoro quando si movimentano i contenitori di gas.
 Norma UNI EN 388 - Guanti di protezione contro rischi meccanici.

Indossare guanti criogenici durante le operazioni di travaso o disconnessione della manichetta.

Norma UNI EN 511 - Guanti di protezione contro il freddo.

Indossare scarpe di sicurezza durante la movimentazione dei contenitori.
 EN ISO 20345 - Dispositivi di protezione individuale - Calzature di sicurezza.

Le maschere a filtro possono essere utilizzate se sono note tutte le condizioni dell'ambiente circostante (per es. tipo e concentrazione del/i contaminante/i) e la durata di utilizzo.
 Utilizzare maschere a filtro e maschere a pieno facciale quando i limiti di esposizione possono essere superati per un breve periodo, per esempio durante la connessione o la disconnessione dei recipienti.

- Protezione per la pelle

- Protezione per le mani :

- Altri:

- Protezione per le vie respiratorie :

Le maschere a filtro non proteggono dalle atmosfere sottossigenate.
In ambienti sottossigenati deve essere utilizzato un autorespiratore o un sistema di fornitura di aria respirabile con maschera.
Norma UNI EN 14387 - Apparecchi di protezione delle vie respiratorie - Filtri antigas e filtri combinati.
Norma UNI EN 136 - Apparecchi di protezione delle vie respiratorie. Maschere intere.
Norma UNI EN 137 - Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Autorespiratori a circuito aperto ad aria compressa con maschera intera.

- Pericoli termici:
8.2.3. Controlli dell'esposizione ambientale

Nessuno oltre a quelli indicati nelle sezioni precedenti.
Nessuna necessaria.

SEZIONE 9. Proprietà fisiche e chimiche

9.1. Informazioni sulle proprietà fisiche e chimiche fondamentali

a) Stato Fisico:	gassoso (20°C / 101.3kPa)
b) Colore:	incolore
c) Odore:	inodore. Non avvertibile dall'odore.
d) Punto di fusione/punto di congelamento:	La soglia olfattiva è soggettiva e inadeguata per avvertire di una sovraesposizione.
e) Punto di ebollizione o punto iniziale di ebollizione e intervallo di ebollizione	- 78,5 °C - A pressione atmosferica, il ghiaccio secco sublima in anidride carbonica gassosa. - 56,6 °C
f) Infiammabilità	non infiammabile.
g) Limite inferiore e superiore di esplosività	non applicabile.
h) Punto di inflammasibilità:	non applicabile ai gas.
i) Temperatura di autoaccensione:	non infiammabile.
j) Temperatura di decomposizione	non applicabile ai gas.
k) pH:	non applicabile ai gas.
l) Viscosità cinematica:	non applicabile ai gas.
m) Solubilità:	2000 mg/l
n) Coefficiente di ripartizione n-ottanolo/acqua	0,83
o) Tensione di vapore:	non applicabile ai gas.
p) Densità e/o densità relativa:	non applicabile ai gas.
q) Densità di vapore relativa:	1,52 (aria=1)
r) Caratteristiche delle particelle:	non applicabile ai gas.

9.2. Altre informazioni

9.2.1. Informazioni relative alle classi di pericoli fisici

Proprietà ossidanti:	Non presenta proprietà ossidanti.
Coefficiente di potere ossidante (CI):	-
Temperatura critica	30 °C

9.2.2. Altre caratteristiche di sicurezza

Massa molecolare	44 g/mol
------------------	----------

SEZIONE 10. Stabilità e reattività

10.1. Reattività

Non ci sono ulteriori pericoli di reattività oltre a quelli descritti nei paragrafi sottostanti.

10.2. Stabilità chimica

Stabile in condizioni normali.

10.3. Possibilità di reazioni pericolose

Nessuna.

10.4. Condizioni da evitare

Evitare l'umidità negli impianti.

10.5. Materiali incompatibili

Consultare la norma ISO 11114 per informazioni addizionali sulla compatibilità dei materiali.

10.6. Prodotti di decomposizione pericolosi

Nessuno(a).

SEZIONE 11. Informazioni tossicologiche

11.1. Informazioni sulle classi di pericolo definite nel regolamento (CE) n. 1272/2008

a) tossicità acuta:	A differenza degli asfissianti semplici, il diossido di carbonio ha la capacità di provocare la morte anche quando sono mantenuti livelli di ossigeno normale (20-21%). È stato riscontrato che il 5% di CO ₂ contribuisce in modo sinergico all'incremento di tossicità di altri gas (CO, NO ₂). Il CO ₂ ha dimostrato di aumentare la produzione di carbossi o metà emoglobina da
---------------------	---

b)	corrosione cutanea/irritazione cutanea:	parte di questi gas, probabilmente a causa dei suoi effetti stimolatori sull'apparato respiratorio e circolatorio.
c)	gravi danni oculari/irritazione oculare:	Per maggiori informazioni fare riferimento al documento 'EIGA Safety Info 24: Carbon Dioxide, Physiological Hazards' disponibile all'indirizzo www.eiga.eu .
d)	sensibilizzazione respiratoria o cutanea:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.
e)	mutagenicità sulle cellule germinali:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.
f)	cancerogenicità:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.
g)	tossicità per la riproduzione:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.
h)	tossicità specifica per organi bersaglio (STOT) — esposizione singola:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.
i)	tossicità specifica per organi bersaglio (STOT) — esposizione ripetuta:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.
j)	pericolo in caso di aspirazione:	Nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.

11.2. Informazioni su altri pericoli

La sostanza non presenta proprietà di interferenza con il sistema endocrino

SEZIONE 12. Informazioni ecologiche

12.1. Tossicità

Questo prodotto non causa alcun danno ecologico.

12.2. Persistenza e degradabilità

Questo prodotto non causa alcun danno ecologico.

12.3. Potenziale di bioaccumulo

Questo prodotto non causa alcun danno ecologico.

12.4. Mobilità nel suolo

Questo prodotto non causa alcun danno ecologico.

12.5 Risultati della valutazione PBT e vPvB

Non classificato come PBT o vPvB.

12.6. Proprietà di interferenza con il sistema endocrino

La sostanza non presenta proprietà di interferenza con il sistema endocrino.

12.7. Altri effetti avversi

Altri effetti avversi:

nessun effetto conosciuto da parte di questo prodotto.

Effetto sullo strato d'ozono:

nessun effetto sullo strato di ozono.

Effetti sul riscaldamento globale:

Gas a effetto serra

Se scaricato in grosse quantità può contribuire all'effetto serra.

(GWP): 1

SEZIONE 13. Considerazioni sullo smaltimento

13.1. Metodi di trattamento dei rifiuti

Può essere scaricato all'atmosfera in zona ben ventilata.

Evitare lo scarico diretto in atmosfera di grossi quantitativi.

Non scaricare dove l'accumulo può essere pericoloso.

Restituire al fornitore il prodotto non utilizzato nel recipiente originale.

Il trattamento e lo smaltimento dei rifiuti da parte di imprese esterne deve essere effettuato in conformità alla normativa vigente.

Eenco dei rifiuti pericolosi (secondo la Decisione della Commissione 2000/532/CE e s.m.i.)

16 05 05: gas in contenitori a pressione, diversi da quelli di cui alla voce 16 05 04*.

SEZIONE 14. Informazioni sul trasporto

14.1. Numero ONU o numero ID

Numero ONU

1013

14.2. Designazione ufficiale ONU di trasporto

DISSOSSIO DI CARBONIO

14.3. Classi di pericolo connesso al trasporto

2.2

14.4. Gruppo d'imballaggio

non applicabile ai gas.

14.5. Pericoli per l'ambiente

non pericoloso per l'ambiente.

14.6. Precauzioni speciali per gli utilizzatori

Misure di precauzione per il trasporto	<p>Evitare il trasporto su veicoli dove la zona di carico non è separata dall'abitacolo. Assicurarsi che il conducente sia informato del rischio potenziale del carico e sappia cosa fare in caso di incidente o di emergenza.</p> <p>Prima di iniziare il trasporto:</p> <ul style="list-style-type: none">- Assicurarsi che vi sia adeguata ventilazione.- Accertarsi che il carico sia ben assicurato.- Assicurarsi che la valvola sia chiusa e che non perda.- Assicurarsi che il tappo cieco della valvola, ove fornito, sia correttamente montato.- Assicurarsi che il cappellotto, ove fornito, sia correttamente montato.
--	---

14.7. Trasporto marittimo alla rinfusa conformemente agli atti dell'IMO

Non applicabile

SEZIONE 15. Informazioni sulla regolamentazione

15.1. Disposizioni legislative e regolamentari su salute, sicurezza e ambiente specifiche per la sostanza o la miscela

Restrizioni d'uso	Nessuna.
Ulteriori norme, limitazioni e prescrizioni legali	Non contiene alcuna sostanza elencata nell'elenco PIC (regolamento UE 649/2012 relativo all'esportazione e importazione di sostanze chimiche pericolose). Non contiene sostanze elencate nell'elenco POP (regolamento UE 2019/1021 sugli inquinanti organici persistenti). non incluso
Direttiva Seveso: 2012/18/UE (Seveso III)	

15.2. Valutazione della sicurezza chimica

Per questo prodotto non è necessario effettuare una valutazione della sicurezza chimica (CSA).

Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore prof. Andrea Carpignano per il supporto continuo e la disponibilità mostratami. Allo stesso modo ringrazio i miei correlatori e, in particolare, la dott.ssa Anna Chiara Uggenti e l'ingegner Luca Portè per la fiducia riposta nei miei confronti.

Ringrazio la società RAMS&E per le opportunità offritemi durante tutti i mesi passati insieme e per avermi introdotta con piacere nel mondo del lavoro.

Un ringraziamento particolare va a Valentina Furfaro, che mi ha affiancata dal primo giorno di tirocinio fino all'ultimo giorno di tesi: grazie per i tuoi consigli e per le moltissime cose che mi hai insegnato in questi mesi.