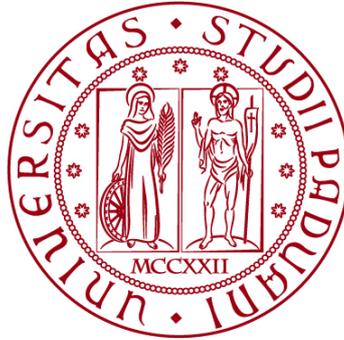


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Department Of Industrial Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza Civile e Industriale



TESI DI LAUREA

**Analisi dei rischi tecnologici e NaTech
di un impianto di produzione di biogas**

Relatrice:

Chiar.ma Prof. Chiara Vianello

Controrelatore:

Chiar.mo Prof. Paolo Mocellin

Laureando:

Giuseppe Molon

Matricola:

2071975

ANNO ACCADEMICO

2023 - 2024

INDICE

1	RIASSUNTO	5
2	INTRODUZIONE.....	6
3	NORMATIVA.....	7
3.1	UNI 10458:2022.....	7
3.2	D.Lgs. 81/08	8
3.3	Rischi di Incendio ed Esplosione.....	9
3.3.1	ATEX.....	9
3.3.2	UNI EN 1127	10
3.4	Lavoro in Solitudine.....	11
3.5	Attività in Spazi Confinati.....	11
3.6	Gestione della Sicurezza e delle Emergenze.....	12
3.7	Direttiva Seveso III	12
4	DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO.....	13
4.1	Trincee di stoccaggio.....	13
4.2	Vasca di alimentazione.....	13
4.3	Unità di idrolisi.....	14
4.4	Digestori anaerobici primari.....	14
4.5	Digestore anaerobico secondario con sovrastante gasometro	15
4.6	Sala di controllo e cabina elettrica.....	16
4.7	Depuratore di biogas.....	16
4.8	Impianto di cogenerazione	17
4.9	Aree di stoccaggio del digestato	17
4.10	Torcia	18

4.11	Tubazioni	18
4.12	Schema dell'impianto	19
5	PROCESSO DI PRODUZIONE DEL BIOGAS	21
5.1	Raccolta e Pretrattamento del Substrato	21
5.2	Digestione primaria	21
5.3	Digestione secondaria	24
5.4	Trattamento del biogas	24
5.5	Produzione di energia e calore	24
5.6	Utilizzo dei digestati.....	25
6	ANALISI DEI RISCHI.....	27
7	ANALISI DEGLI INCIDENTI	30
7.1	Esplosione del locale tecnico dell'impianto.....	30
7.2	Esplosione del digestore.....	31
7.3	Incendio del fermentatore	32
7.4	Incendio del serbatoio di stoccaggio	32
7.5	Esplosione del digestore a causa di un fulmine.....	33
7.6	Incendio nel gasdotto e conseguente effetto domino	34
7.7	Analisi quantitativa degli incidenti negli impianti di biogas in Europa	35
8	ANALISI DEL RISCHIO DELL'IMPIANTO.....	37
8.1	Valutazione dell'unità da analizzare.....	37
8.2	Analisi HazOp	37
8.3	Fault-Tree Analysis	41
8.4	Event-Tree Analysis	43

8.5	Valutazione quantitativa degli scenari incidentali.....	44
8.5.1	Rilascio di liquido	44
8.5.2	Rilascio di gas	44
8.6	Effetto domino.....	47
9	ANALISI NATECH.....	49
9.1	Possibili effetti di un fulmine.....	49
9.2	Metodo di valutazione del rischio fulmine	50
9.2.1	Calcolo delle probabilità	50
9.2.2	Valutazione delle perdite.....	54
9.2.3	Valutazione del rischio	58
9.3	Valutazione senza protezioni	59
9.3.1	Calcolo delle probabilità	60
9.3.2	Valutazione delle perdite.....	60
9.3.3	Rischio fulmine	62
9.3.4	Event-Tree Analysis.....	63
9.4	Valutazione con protezioni	64
9.4.1	Calcolo delle probabilità	64
9.4.2	Valutazione delle perdite.....	64
9.4.3	Rischio fulmine	65
9.4.4	Event-Tree Analysis.....	66
9.5	Valutazione delle conseguenze.....	67
9.5.1	Fireball	67
9.5.2	Unconfined Vapour Cloud Explosion	68
9.6	Effetto Domino	69
10	CONCLUSIONI.....	71
11	BIBLIOGRAFIA – SITOGRAFIA.....	73

1 Riassunto

In questo elaborato vengono esaminati i rischi tecnologici e NaTech a cui sono esposti gli impianti di biogas per migliorarne la gestione e la sicurezza operativa. In passato si sono verificati incidenti gravi come incendi ed esplosioni, sottolineando l'importanza di una gestione dei rischi precisa e strutturata per garantire la sicurezza degli impianti e delle persone coinvolte. Nello studio sono state condotte diverse analisi del rischio utilizzando metodologie sia qualitative che quantitative, con particolare attenzione agli scenari di rilascio di gas e agli effetti domino, in cui un evento iniziale può causare conseguenze gravi.

Inoltre, è stata effettuata un'analisi NaTech per studiare in quale modo eventi naturali, come i fulmini, possano influenzare gli impianti di biogas. È stata illustrata una valutazione del rischio di fulmini che include il calcolo delle probabilità e delle potenziali perdite. Sono state utilizzate tecniche come l'Event-Tree Analysis per valutare le conseguenze di un fulmine su un impianto, considerando scenari con e senza adeguate protezioni, e proponendo misure per mitigare tali rischi.

Infine, vengono evidenziate le probabilità di accadimento degli eventi più significativi, dimostrando l'importanza di implementare misure di protezione per ridurre i rischi come l'installazione di sistemi di protezione contro i fulmini. Le conclusioni dell'analisi sottolineano la necessità di una valutazione e gestione continua dei rischi per garantire la sicurezza degli impianti di biogas, enfatizzando l'importanza di un approccio integrato che comprenda la conformità normativa, un'analisi sistematica dei rischi e l'implementazione di misure preventive e protettive.

2 Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni, la crescente consapevolezza riguardo al cambiamento climatico e alle sue conseguenze ha spinto numerosi paesi a cercare alternative più sostenibili alle tradizionali fonti di energia basate sui combustibili fossili. Tra le molteplici opzioni di energia rinnovabile, il biogas si è distinto come una delle soluzioni più promettenti.

L'Europa, insieme all'Italia, possiede una ricchezza di biomasse che possono essere sfruttate per la produzione di biogas. Questo non solo contribuisce alla riduzione dei rifiuti, consentendo il recupero e il riutilizzo di materiali organici destinati altrimenti alla discarica, ma favorisce anche la valorizzazione dei sottoprodotti agricoli e zootecnici, trasformando ciò che potrebbe essere considerato un residuo in una risorsa utile.

Gli impianti di produzione di biogas non solo portano alla produzione di energia rinnovabile, ma offrono anche opportunità economiche tangibili: gli agricoltori e altri operatori possono generare reddito attraverso la vendita dell'energia elettrica e del calore prodotti dagli impianti di biogas, oltre alla commercializzazione dei fertilizzanti organici ottenuti come sottoprodotto del processo di digestione anaerobica. Inoltre, hanno un impatto positivo sulle comunità locali, creando posti di lavoro diretti e indiretti, e contribuendo allo sviluppo economico delle aree rurali. Questi impianti, quindi, non solo forniscono energia pulita e sostenibile, ma diventano anche un motore per la crescita economica locale e la riduzione della dipendenza dalle fonti energetiche non rinnovabili.

Per queste ragioni i governi europei, inclusa l'Italia, hanno introdotto politiche e incentivi per promuovere la produzione di energia da fonti rinnovabili, tra cui il biogas. Questi incentivi possono includere tariffe di alimentazione incentivata, come il DM del 18 Dicembre 2008 in cui viene avviata la Tariffa Omnicomprensiva da 280 €/MWh e a cui si attribuisce la vera nascita del biogas, sovvenzioni per gli investimenti e agevolazioni fiscali per gli impianti di biogas. Tali politiche hanno reso gli investimenti in impianti di biogas più attraenti per gli operatori del settore, incoraggiando così lo sviluppo di nuovi impianti.

Negli ultimi anni, si è assistito a un rapido sviluppo delle tecnologie di produzione di biogas, con il miglioramento dell'efficienza dei processi di digestione anaerobica e la diversificazione delle fonti di biomassa utilizzabili. Questi avanzamenti tecnologici hanno reso gli impianti di biogas più efficienti, affidabili e competitivi sul mercato dell'energia, contribuendo ulteriormente al loro diffondersi in Europa, inclusa l'Italia.

3 Normativa

Gli impianti di produzione di biogas con capacità superiore a 25 [Nm³/h] sono soggetti a controllo da parte dei Vigili del Fuoco, poiché rientrano nel punto 1 dell'Allegato I del D.P.R. n. 151/11. Di conseguenza, dovranno anche rispettare le regole tecniche del D.M del 3 Agosto 2015.

Dal punto di vista normativo, non esiste una singola normativa per la realizzazione di un impianto di biogas, ma una serie di regolamenti differenti. Il rischio di incendio è intrinsecamente legato alla tipologia dell'impianto di biogas. Tuttavia, è possibile delineare una configurazione di riferimento comune a tutti gli impianti, comprendente le seguenti sezioni:

- Alimentazione e pretrattamento della biomassa in ingresso
- Digestione anaerobica, produzione di biogas e stoccaggio del digestato
- Convogliamento, accumulo del biogas e conversione energetica

In relazione a queste sezioni, si possono identificare diverse sostanze combustibili: sostanze solide (biomassa a basso contenuto di umidità), sostanze gassose (biogas) e sostanze liquide (oli lubrificanti).

Per queste ragioni è cruciale che il progettista dell'impianto collabori strettamente con il progettista antincendio, che può fare affidamento su numerose norme di riferimento, questo anche per soddisfare i requisiti richiesti dalla norma "UNI 10458:2022: Sicurezza degli impianti di biogas - Linee guida per la progettazione e l'esercizio".

Nei seguenti paragrafi vengono riportate le principali norme applicabili agli impianti di produzione di biogas

3.1 UNI 10458:2022

Questa norma si applica a tutte le tipologie di impianti di biogas, sia agricoli che industriali, indipendentemente dalle loro dimensioni e capacità produttiva. Durante la fase di progettazione, è essenziale scegliere un sito appropriato per l'impianto, considerando la distanza da aree abitate e altri insediamenti per minimizzare i rischi per le persone. Inoltre, i materiali e i componenti utilizzati devono essere resistenti alla corrosione e adeguati all'ambiente di lavoro dell'impianto. La presenza di dispositivi di sicurezza, come valvole di sicurezza, sistemi di rilevazione di fughe di gas e dispositivi di controllo delle emissioni, è fondamentale per prevenire incidenti.

Per quanto riguarda l'esercizio degli impianti, è cruciale che gli operatori siano adeguatamente formati e consapevoli dei rischi associati al biogas. Una manutenzione regolare e sistematica è necessaria per mantenere l'efficienza e la sicurezza degli impianti. I sistemi di monitoraggio

continuo sono importanti per rilevare tempestivamente eventuali anomalie o malfunzionamenti, permettendo interventi rapidi e mirati.

La sicurezza operativa è un altro aspetto chiave della norma. Devono essere predisposte e regolarmente testate procedure di emergenza per gestire eventuali incidenti o situazioni critiche. Gli impianti devono essere dotati di sistemi di protezione antincendio adeguati e piani di evacuazione ben definiti.

La norma sottolinea anche l'importanza della documentazione e della registrazione accurata di tutte le attività svolte sull'impianto. I registri delle operazioni, della manutenzione e dei controlli devono essere mantenuti aggiornati, e la documentazione relativa alla sicurezza e all'operatività deve essere costantemente rivista e aggiornata per riflettere le migliori pratiche e le nuove conoscenze.

3.2 D.Lgs. 81/08

Il Decreto Legislativo 81/08 impone innanzitutto la valutazione dei rischi specifici derivanti dalle operazioni di produzione, come l'esposizione a gas pericolosi, come il metano, il rischio di esplosioni, il contatto con materiali corrosivi o tossici, e i pericoli meccanici legati all'uso di macchinari e attrezzature. I datori di lavoro sono tenuti a effettuare una valutazione dei rischi completa e a redigere un Documento di Valutazione dei Rischi (DVR) che identifichi e analizzi tutti i potenziali pericoli, proponendo misure di prevenzione e protezione adeguate.

Un aspetto fondamentale riguarda la formazione e l'informazione dei lavoratori. Il D.Lgs 81/08 stabilisce che i lavoratori devono essere adeguatamente formati sui rischi specifici presenti nell'impianto di biogas e sulle procedure di sicurezza da adottare. Questo include la formazione sull'uso corretto dei dispositivi di protezione individuale, sulle procedure di emergenza in caso di fughe di gas o incendi, e sulla manutenzione sicura delle attrezzature.

Il decreto prevede inoltre che le attrezzature e gli impianti siano progettati, installati e mantenuti in conformità con gli standard di sicurezza. Questo implica che gli impianti di biogas devono essere costruiti seguendo specifiche tecniche che minimizzino i rischi di incidenti, come la dispersione di gas o l'innesco di esplosioni. La manutenzione regolare delle apparecchiature e degli impianti è essenziale per garantire che rimangano sicuri nel tempo.

Il D.Lgs 81/08 richiede anche l'adozione di misure di emergenza, come piani di evacuazione e procedure di intervento rapido in caso di incidenti. Gli impianti di biogas devono essere dotati di sistemi di rilevazione e allarme per monitorare la presenza di gas pericolosi e altre condizioni critiche, permettendo una risposta tempestiva per minimizzare i danni e proteggere i lavoratori.

Infine, il decreto impone la sorveglianza sanitaria per i lavoratori esposti a rischi particolari. Nei contesti di produzione di biogas, dove i lavoratori possono essere esposti ad agenti chimici pericolosi, è necessario effettuare controlli medici periodici per monitorare la salute dei lavoratori e prevenire malattie professionali.

3.3 Rischi di Incendio ed Esplosione

Gli impianti di biogas possono essere soggetti a rischi di esplosione, in particolare a causa di emissioni derivanti da guasti nei sistemi di tenuta della rete di trasporto o da fori nelle coperture dei serbatoi di accumulo del biogas. In impianti che includono post-trattamenti del digestato, bisogna considerare anche la possibile presenza di polveri combustibili. È pertanto essenziale una preliminare classificazione delle aree a rischio di esplosione, sia per la presenza di gas infiammabili sia per le polveri combustibili. La corretta classificazione delle zone è indispensabile per la scelta e l'installazione delle apparecchiature, che devono essere conformi alla direttiva ATEX 2014/34/UE. Devono inoltre sottostare alla norma “UNI EN 1127-1:2011: Atmosfere esplosive - Prevenzione e protezione contro l'esplosione”.

3.3.1 ATEX

L'applicazione della normativa ATEX agli impianti di produzione di biogas è essenziale per garantire la sicurezza in ambienti potenzialmente esplosivi e si occupa della regolamentazione dei requisiti di sicurezza per le apparecchiature e i luoghi di lavoro in cui possono formarsi atmosfere esplosive.

Nel contesto degli impianti di biogas, la normativa ATEX richiede innanzitutto la classificazione delle aree a rischio di esplosione. Gli impianti di biogas producono e trattano metano e altri gas infiammabili, quindi, è fondamentale identificare le zone dove tali gas possono essere presenti in concentrazioni pericolose. Queste zone vengono classificate in base alla frequenza e durata della presenza di atmosfere esplosive: Zona 0 (presenza continua), Zona 1 (presenza probabile in normali condizioni di operazione) e Zona 2 (presenza improbabile e di breve durata).

Una volta classificate le aree, il datore di lavoro deve garantire che le attrezzature e gli impianti utilizzati nelle zone a rischio siano conformi ai requisiti delle direttive ATEX. Gli apparecchi e i sistemi di protezione devono essere progettati e certificati per l'uso in atmosfere esplosive, assicurando che non possano innescare un'esplosione. Questi dispositivi devono riportare la marcatura ATEX, che indica che sono stati testati e approvati per l'uso in determinate zone esplosive.

La normativa ATEX impone anche la redazione di un Documento sulla Protezione contro le Esplosioni (DPE), che dettaglia le misure adottate per prevenire e proteggere contro le esplosioni. Il DPE deve includere una valutazione dettagliata dei rischi di esplosione, descrivere le misure tecniche e organizzative messe in atto per controllare tali rischi, e fornire informazioni sui dispositivi di protezione installati. Questo documento deve essere mantenuto aggiornato e disponibile per le autorità di controllo.

I lavoratori che operano in aree a rischio devono ricevere una formazione specifica sui rischi di esplosione, sulle procedure di sicurezza da seguire, e sull'uso corretto delle attrezzature certificate ATEX. Questa formazione deve essere continua, assicurando che i lavoratori siano sempre aggiornati sulle nuove normative e sulle tecniche di sicurezza.

Inoltre, la manutenzione delle attrezzature e degli impianti deve essere effettuata seguendo rigorose procedure di sicurezza. Le attrezzature devono essere ispezionate e mantenute in conformità con gli standard ATEX, per garantire che non diventino una fonte di innesco di esplosioni. Questo include la manutenzione preventiva e correttiva, la sostituzione dei componenti usurati e l'aggiornamento delle tecnologie di sicurezza.

Infine, la normativa ATEX richiede l'adozione di misure di emergenza specifiche per la gestione delle esplosioni. Gli impianti di biogas devono essere dotati di sistemi di rilevazione e allarme per le atmosfere esplosive, piani di evacuazione ben definiti e procedure di risposta rapida in caso di incidenti. È fondamentale che tutto il personale sia addestrato per reagire efficacemente in situazioni di emergenza, minimizzando i rischi per la salute e la sicurezza.

3.3.2 UNI EN 1127

In un impianto di produzione di biogas, l'applicazione della UNI EN 1127-1:2011 inizia con una dettagliata valutazione del rischio di esplosione. Questo processo comprende l'identificazione delle sorgenti di accensione, la valutazione della probabilità che una atmosfera esplosiva si formi e si inneschi, e l'analisi delle conseguenze potenziali di un'esplosione. Le sorgenti di accensione possono includere scintille elettriche, superfici calde, fiamme libere, e reazioni chimiche.

Una volta identificati i rischi, la norma prescrive una serie di misure preventive e protettive. Tra queste, una delle principali è l'eliminazione delle sorgenti di accensione. Ciò può essere ottenuto mediante l'uso di apparecchiature elettriche certificate per aree pericolose, la messa a terra e il collegamento equipotenziale per prevenire scariche elettrostatiche, e il controllo delle temperature superficiali delle apparecchiature per evitare che raggiungano livelli pericolosi.

La UNI EN 1127-1:2011 sottolinea l'importanza del contenimento e della riduzione delle concentrazioni di gas infiammabili. Negli impianti di biogas, questo può essere realizzato attraverso la ventilazione adeguata delle aree a rischio, l'adozione di sistemi di rilevazione e allarme per monitorare i livelli di gas, e l'implementazione di procedure operative che riducano al minimo la liberazione di gas infiammabili durante le fasi di produzione e manutenzione.

La progettazione e la costruzione degli impianti devono seguire criteri specifici per minimizzare i rischi di esplosione. Questo include l'uso di materiali resistenti alle esplosioni e la costruzione di strutture che possano contenere o deviare la forza di un'esplosione, proteggendo così il personale e le attrezzature circostanti. I componenti degli impianti devono essere selezionati e installati in modo tale da garantire che non rappresentino una sorgente di innesco.

La manutenzione e l'ispezione regolare delle attrezzature sono fondamentali per prevenire le esplosioni. Questo include controlli periodici, la sostituzione dei componenti usurati, e l'aggiornamento delle attrezzature per rispondere ai più recenti standard di sicurezza.

Infine, la norma UNI EN 1127-1:2011 richiede l'adozione di misure di emergenza specifiche per la gestione delle esplosioni. Gli impianti devono essere dotati di piani di emergenza ben definiti, che includano procedure di evacuazione, sistemi di allarme, e misure per il contenimento e il controllo delle esplosioni. È cruciale che tutto il personale sia addestrato per reagire efficacemente in caso di incidente, minimizzando i rischi per la salute e la sicurezza.

3.4 Lavoro in Solitudine

Nei contesti operativi degli impianti di biogas, la turnazione del personale può comportare situazioni di lavoro in solitudine. Questa condizione diventa particolarmente critica in caso di infortunio o malore se non è possibile richiedere soccorsi tempestivi. Per mitigare questo rischio, è necessario stabilire una comunicazione periodica tra l'operatore in turno e il responsabile dell'impianto, gestita tramite procedure specifiche. Questo sistema di comunicazione garantisce un monitoraggio continuo durante l'intero turno lavorativo.

3.5 Attività in Spazi Confinati

Gli spazi confinati, definiti come ambienti limitati dove il rischio di morte o infortunio grave è elevato a causa della presenza di sostanze o condizioni pericolose, rappresentano un rischio significativo negli impianti di biogas. Le attività di manutenzione o ispezione possono richiedere l'accesso a cisterne e serbatoi per bonifica e pulizia. Il titolare dell'impianto deve valutare i rischi specifici associati agli spazi confinati e determinare se affidare queste attività a ditte esterne specializzate o a personale interno adeguatamente formato.

3.6 Gestione della Sicurezza e delle Emergenze

La gestione della sicurezza e delle emergenze negli impianti di biogas richiede l'implementazione di un programma di manutenzione rigoroso e una valutazione dei rischi accurata. Devono essere adottate tutte le misure necessarie per garantire il corretto funzionamento degli impianti di sicurezza e antincendio. Gli operatori devono avere accesso ai manuali d'uso, agli schemi di flusso del biogas e alle planimetrie delle aree protette. È fondamentale che il personale sia informato sui rischi specifici legati all'incendio, esplosione e spazi confinati.

Parallelamente alla gestione della sicurezza, il titolare dell'impianto deve sviluppare un piano di emergenza, che preveda la formazione degli addetti antincendio secondo le disposizioni del D.M. 1-2-3/09/2021 e includa tutte le procedure per la gestione delle emergenze, compresa la messa in sicurezza dell'impianto.

3.7 Direttiva Seveso III

Gli impianti di produzione di biogas da biomasse non rientrano, generalmente, nella direttiva Seveso III (Direttiva 2012/18UE) per alcune ragioni specifiche legate alla natura dei materiali e delle sostanze coinvolte, nonché ai criteri stabiliti dalla direttiva stessa. I motivi principali per cui gli impianti di biogas da biomasse non rientrano in questa direttiva sono: la tipologia delle sostanze coinvolte, poiché le biomasse e il biogas prodotto da esse non sono generalmente classificati come sostanze pericolose ai livelli richiesti dalla direttiva, la quantità di sostanze pericolose dato che, anche quando vengono utilizzate sostanze potenzialmente pericolose, la direttiva Seveso III si applica solo se le quantità presenti in un impianto superano determinati limiti spesso non superati dagli impianti di biogas, e, infine, la bassa probabilità di eventi catastrofici, correlata anche al consueto posizionamento degli impianti in zone rurali a causa dei cattivi odori emanati.

4 Descrizione dell'impianto

L'impianto trattato è composto da:

- Tre trincee di stoccaggio delle biomasse;
- Un mulino tritratore
- Una vasca di alimentazione dell'impianto;
- Un'unità di idrolisi;
- Due digestori primari;
- Un digestore secondario con sovrastante gasometro;
- Una sala di controllo e una cabina elettrica
- Un depuratore del biogas
- Un impianto di cogenerazione
- Un separatore solido – liquido;
- Una trincea di stoccaggio coperta per il digestato solido;
- Due vasche di stoccaggio del digestato liquido.
- Una torcia

Vengono di seguito descritti gli elementi che compongono l'impianto di produzione di biogas.

4.1 Trincee di stoccaggio

Sono presenti tre trincee di stoccaggio delle biomasse costituite da mura prefabbricate in calcestruzzo, ognuna delle dimensioni di 40 metri di lunghezza per 40 metri di larghezza e 5 metri in altezza, con una capacità di contenimento di 8000 tonnellate di biomassa l'una.

4.2 Vasca di alimentazione

È presente una vasca circolare di alimentazione (Figura 1), che rifornisce tutto l'impianto, di diametro 10 metri e alta 5 metri, di cui 3 metri interrati.

Questa vasca è dotata tritratore – miscelatore che provvederanno a una parziale omogeneizzazione e miscelazione del materiale, prima della fase di idrolisi.



Figura 1 Vasca di alimentazione

4.3 Unità di idrolisi

L'unità di idrolisi presente è fondamentale per la produzione del biogas. Questa unità è formata da un serbatoio di acciaio con il basamento in conglomerato cementizio, avente diametro di 17,3 metri e altezza di 8 metri, per un totale di 1880 metri cubi. Nella sommità è presente una calotta in grado di stoccare 85 metri cubi di gas, rappresentato prevalentemente da anidride carbonica e tracce di altri gas, metano compreso.

All'interno del serbatoio si avrà una pressione massima di 0,04 barg, garantita dalla presenza di valvole di sovrappressione poste sul duomo.

Il biogas prodotto uscirà dall'unità di idrolisi tramite duomo di ripresa gas che provvederà ad inviare, tramite tubazione dedicata, il gas al gasometro e, quindi, all'utilizzazione. Invece, il liquame viene inviato mediante pompa volumetrica ai digestori primari.

4.4 Digestori anaerobici primari

I due digestori presenti (Figura 2) sono serbatoi in acciaio con la parte basale in conglomerato cementizio armato, sormontata da una copertura in ferro al carbonio di diametro 21 metri, altezza 8 metri e volume 2770 metri cubi, coibentato con poliuretano autoestinguente in pannelli dello spessore di 50 millimetri e protetto da un lamierino in acciaio di spessore 9 millimetri.

I serbatoi vengono riscaldati mediante l'invio dei fanghi a uno scambiatore di calore che viene azionato da sensori di temperatura presenti all'interno dei digestori.

I digestori saranno occupati dal liquame fino alla sommità della parte cilindrica, livello controllato dalla guardia idraulica del serbatoio, mentre nella cupola verrà accumulato un quantitativo di biogas pari a 122 metri cubi. Il liquame viene mantenuto in movimento grazie a una pompa trituratrice posta all'esterno del serbatoio, la quale fornisce entrambi i digestori e

viene attivata in modo alternativo con frequenza prestabilita; la pompa ha in ingresso i liquami dei digestori e li rimanda in circolo nei serbatoi mediante degli ugelli posti all'interno di questi. All'interno dei serbatoi verrà mantenuta una pressione di 0,04 barg, garantita dalla presenza di valvole di sovrappressione poste sul duomo, il quale, inoltre, invierà tramite tubazione dedicata il gas al gasometro e, quindi, all'utilizzazione.

Da qui il digestato viene mandato al digestore secondario mediante pompa volumetrica.



Figura 2 Digestori Anaerobici

4.5 Digestore anaerobico secondario con sovrastante gasometro

Il digestore secondario è un serbatoio a freddo in cui nella parte bassa si raccoglie il liquame e nella parte alta (gasometro) si accumula il biogas. È costituito da due serbatoi in ferro al carbonio, di forma cilindrica, collocati uno dentro l'altro con guide di scorrimento verticali.

Il serbatoio inferiore ha diametro 15 metri e altezza 8 metri, e il volume è di 1413 metri cubi.

Il serbatoio superiore (gasometro) ha diametro 14 metri e altezza 6 metri, con un volume di 1143 metri cubi, di cui 400 metri cubi vengono utilizzati per lo stoccaggio del biogas. La base è un tronco di cono di diametro inferiore ai 2 metri e altezza di 0,5 metri. Questo serbatoio poggia all'interno del secondario e che scorre su guide verticali, è in ferro al carbonio ma non è coibentato.

Anche in questo digestore la massima pressione consentita è di 0,04 barg ed è garantita da valvole di sovrappressione che, in caso di necessità, fanno uscire del gas immettendolo in

atmosfera, e il liquame viene mantenuto in movimento grazie a una pompa trituratrice posta all'esterno del serbatoio.

Il digestato dopo questa fase può essere reinserito all'interno dei digestori primari come substrato utile per le reazioni, oppure può essere inviato, mediante pompa volumetrica alle vasche per il digestato liquido o alla trincea per il digestato solido.

4.6 Sala di controllo e cabina elettrica

Il fabbricato in cui sono alloggiati i comandi è costituito da una cabina coibentata per motivi acustici, suddivisa in tre zone, ognuna delle quali indipendente dall'altra.

Nella prima zona sono alloggiati il quadro elettrico e i dispositivi di comando, nella seconda zona è inserito il trasformatore BT/MT, mentre nella terza zona è presente lo scambiatore di calore.

4.7 Depuratore di biogas

Il depuratore di biogas (Figura 3) è costituito da filtro a cestello, due filtri a graniglia e due filtri a candela. Il filtro a cestello e i filtri a graniglia permettono di togliere l'umidità, mentre i filtri a candela rimuove le particelle di fango. La depurazione del biogas avviene dunque solamente attraverso passaggi fisici.



Figura 3 Depuratore

4.8 Impianto di cogenerazione

Dopo la depurazione, il biogas viene mandato all'impianto di cogenerazione (Figura 4), dove un motore endotermico lo brucia, producendo così calore ed energia termica. Il cogeneratore ha una potenza di 999 kW ed è alloggiato all'interno di un container posto distante dai digestori.



Figura 4 Impianto di cogenerazione

4.9 Aree di stoccaggio del digestato

Il digestato solido viene stoccato in una trincea coperta di 1710 metri cubi in cemento armato (Figura 5), mentre il digestato liquido viene stoccato in due vasche cilindriche in cemento armato di volume 4239 metri cubi l'una.



Figura 5 Trincea coperta

4.10 Torcia

L'impianto di digestione anaerobica dispone di una torcia (Figura 6) che è in grado di bruciare tutto il biogas prodotto in un'ora dall'impianto. Tale torcia avrà una portata al bruciatore di 450 m³/h, questo garantisce la completa combustione di tutto il biogas prodotto in un'ora dall'impianto. La torcia entra in funzione in caso di avaria del motore del cogeneratore o in caso di eccesso di produzione di biogas che produce una sovrappressione; la sua funzione è, quindi, quella di evitare che si verificano sfiati di biogas in atmosfera.



Figura 6 Torcia

4.11 Tubazioni

Il biogas prodotto nei digestori primari si va ad accumulare nella calotta sferica sovrastante i digestori e qui viene ripreso mediante duomo ed inviato, tramite tubazione dedicata, al digestore secondario con gasometro. Tale tubazione entra all'interno del digestore secondario fino a una quota superiore all'altezza della fase liquida stoccate nel digestore secondario. Anche la tubazione dedicata per l'invio del biogas all'impianto di cogenerazione è collocata all'interno del digestore secondario e situata a una quota superiore a quella della fase liquida presente nel digestore secondario.

Le tubazioni in cui si avrà il passaggio del biogas lavoreranno a una pressione massima di esercizio pari 0,04 bar, per tale motivo queste condotte possono essere catalogate come condotte di settima specie (condotte con pressione di esercizio massima di 0,04 bar – da D.M. del 17 aprile 2008). Il materiale utilizzato per realizzare queste condotte è l'acciaio. Le tubazioni sono poste ad una altezza da terra di circa 3,50 metri; pertanto, sono stati effettuati opportuni trattamenti di pitturazione per proteggere le tubazioni dagli agenti atmosferici che potrebbero, a lungo andare, pregiudicarne l'integrità.

Gli spessori minimi delle pareti delle tubazioni che dovranno essere garantiti saranno:

- 1.8 mm per diametri esterni fino a 30 millimetri
- 2.3 mm per diametri esterni oltre 30 e fino a 65 millimetri
- 2,6 mm per diametri esterni oltre 65 e fino a 160 millimetri
- 3,5 mm per diametri esterni oltre 160 e fino a 325 millimetri
- 4,5 mm per diametri esterni oltre 325 e fino a 450 millimetri
- 1% del diametro esterno per diametri esterni oltre 450 millimetri

Per quanto riguarda l'impianto di digestione anaerobica in oggetto i diametri delle tubazioni del biogas varieranno da un minimo di 150 millimetri a un massimo di 250 millimetri; quindi, gli spessori delle pareti saranno di 2,6 millimetri o 3,5 millimetri.

4.12 Schema dell'impianto

Si riporta nella Figura 7 lo schema dell'impianto di produzione di biogas.

5 Processo di produzione del biogas

Il processo di produzione di biogas ed energia segue diversi passaggi:

1. Raccolta e Pretrattamento del Substrato
2. Digestione primaria
3. Digestione secondaria
4. Trattamento del biogas
5. Produzione di energia e calore
6. Utilizzo dei digestati

Nei prossimi paragrafi verranno analizzati nel dettaglio questi passaggi.

5.1 Raccolta e Pretrattamento del Substrato

Il processo inizia con la raccolta di materiale organico, nel caso studiato i liquami provenienti da allevamenti di bestiame. Prima che tali materiali raggiungano l'impianto vengono rimossi tutti gli oggetti indesiderati quali plastiche, metalli e vetro.

Successivamente i liquami vengono sottoposti a un pretrattamento che include la macinazione, per ridurre le dimensioni delle particelle, e l'omogeneizzazione, per ottenere una consistenza uniforme.

Per assicurare che il substrato sia il più miscelato e omogeneo possibile, vengono utilizzate pompe a vite. Queste pompe, grazie a una coclea, facilitano anche il trasferimento dei liquami nei digestori.

Può essere necessario regolare il pH del substrato, operazione ottenuta mediante l'aggiunta di agenti chimici, al fine di ottimizzare le condizioni per la digestione anaerobica.

Questo processo garantisce che solo il materiale organico pulito e adeguato venga inviato ai digestori, massimizzando l'efficienza del processo di digestione anaerobica e la produzione di biogas, ed è cruciale per garantire che il substrato sia idoneo alla digestione e per prevenire danni alle attrezzature.

5.2 Digestione primaria

Il materiale pretrattato viene quindi inviato all'unità di idrolisi e, quindi, ai digestori primari, che sono dei grandi serbatoi in cui avviene la digestione anaerobica, cioè in assenza di ossigeno. I digestori sono configurati come dei reattori a miscelazione continua, che permettono di mantenere una miscela omogenea e costante del substrato; questi operano a temperature controllate per garantire un processo mesofilo 30-40°C con tempo di ritenzione idraulica di 15-30 giorni, e con un pH ottimale tra 6.5 e 7.5.

All'interno l'unità di idrolisi e nei digestori il processo biochimico avviene in diverse fasi in questa sequenza:

1. Idrolisi

La fermentazione inizia con il processo di idrolisi durante il quale le grandi molecole organiche complesse, come i carboidrati, le proteine e i lipidi, vengono scomposte in molecole più piccole. Questo avviene attraverso l'azione di enzimi extracellulari, prodotti da batteri fermentativi, quali: amilasici (per i carboidrati), proteasici (per le proteine) e lipasici (per i lipidi).

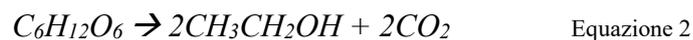
L'Equazione, ad esempio, per l'idrolisi dell'amido in glucosio (Equazione 1) è:



2. Acidogenesi

Le molecole più piccole prodotte durante l'idrolisi vengono quindi fermentate dai batteri acidogeni. Questi batteri convertono gli zuccheri, gli amminoacidi e altri composti organici in acidi grassi volatili (VFA) come l'acido acetico, l'acido butirrico e l'acido propionico, in alcoli, in idrogeno (H_2) ed in anidride carbonica; questi due ultimi sono molto importanti perché possono essere usati dai batteri metanogeni per la produzione di metano. Questa fase è chiamata fermentazione acidogenica poiché gli acidi sono i principali prodotti finali.

L'equazione, ad esempio, per la fermentazione del glucosio in etanolo e anidride carbonica (Equazione 2) è:



3. Acetogenesi

Le molecole di acidi grassi volatili prodotti durante la fermentazione acidogenica vengono ulteriormente decomposte dai batteri acetogeni. Questi batteri convertono gli acidi in acido acetico, idrogeno e anidride carbonica, che possono essere utilizzati come substrati per la produzione di metano dai batteri metanogeni.

L'equazione generale per la produzione dell'acido propionico in acido acetico (Equazione 3) è:



4. Metanogenesi

L'acido acetico e l'idrogeno prodotti vengono convertiti in metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂) dagli archaea metanogeni (batteri metanogeni). Questo è il passaggio finale che produce il biogas, principalmente composto da metano e anidride carbonica.

La metanogenesi avviene mediante due vie principali: la “via dell'idrogeno – anidride carbonica”, e la “via dell'acetato”.

Nella “via dell'idrogeno – anidride carbonica”, l'idrogeno (H₂) e il biossido di carbonio (CO₂) vengono convertiti in metano (CH₄) dai batteri metanogeni. Questo processo avviene attraverso una serie di reazioni biochimiche. Inizialmente, l'idrogeno viene utilizzato dai batteri metanogeni come donatore di elettroni per ridurre il biossido di carbonio a metano. Questa reazione è catalizzata dall'enzima idrogenasi. L'equazione generale per questa conversione (Equazione 4) è:



Nella “via dell'acetato”, l'acido acetico (CH₃COOH), che è uno dei principali prodotti della fermentazione anaerobica, viene convertito in metano (CH₄) e biossido di carbonio (CO₂) dai batteri metanogeni. Questo processo coinvolge una serie di reazioni biochimiche in cui l'acido acetico viene prima convertito in una forma intermedia, come il metilene-tetraidrofolato, che viene quindi utilizzato per ridurre il biossido di carbonio a metano. L'equazione generale per questa conversione (Equazione 5) è:



Ci sono diversi fattori che influenzano la digestione: come azoto, fosforo, potassio, zolfo e oligoelementi (ferro, cobalto, nichel) sono necessari per il metabolismo microbico come nutrienti e micronutrienti; è necessario che i livelli di ammoniaca siano bassi poiché livelli elevati possono essere tossici per i microrganismi metanogeni.

All'interno dei digestori i liquami vengono continuamente miscelati e mantenuti in movimento per mantenere una distribuzione uniforme dei microrganismi e dei nutrienti.

Il biogas viene raccolto mediante cupole a tenuta stagna, dopodiché viene convogliato verso i sistemi di purificazione e successivamente all'impianto di cogenerazione.

Il trasferimento del materiale dai digestori primari a quello secondario avviene tramite duomo, utilizzando condotte sopraelevate, dedicate, in acciaio. Lungo queste condotte sono installate delle valvole di sicurezza. Questo processo deve essere gestito attentamente per evitare intasamenti, mantenere un flusso continuo e prevenire la perdita di gas o contaminazioni.

5.3 Digestione secondaria

Il materiale parzialmente digerito dai digestori primari viene trasferito al digestore secondario, dove la digestione continua. Questo digestore aiuta a completare la decomposizione della materia organica, stabilizzando il digestato (il materiale residuo) e riducendo ulteriormente gli odori. Le condizioni operative sono sempre mesofile ma il tempo di permanenza è generalmente più breve, variando tra i 10 e i 20 giorni.

All'interno del digestore secondario viene continuata la metanogenesi, quindi i microrganismi metanogeni continuano a convertire gli acidi grassi volatili residui, l'acido acetico e l'idrogeno in metano e anidride carbonica.

Viene, inoltre, effettuata un'idrolisi residuale, dove piccole quantità di materiale organico complesso possono ancora subire idrolisi, anche se la maggior parte è già stata scomposta nei digestori primari.

Vengono anche effettuate acidogenesi e acetogenesi residuali: in cui eventuali prodotti intermedi non completamente convertiti nei digestori primari vengono ulteriormente trasformati in acidi grassi volatili e acido acetico.

Il digestore secondario svolge un ruolo importante nel completare la digestione anaerobica, stabilizzando il digestato e massimizzando la produzione di biogas.

5.4 Trattamento del biogas

Il biogas prodotto nei digestori può contenere anche impurità come solfuro di idrogeno, ammoniacale e umidità, viene quindi trattato per migliorarne la qualità, rendendolo adatto per l'uso nell'impianto di cogenerazione. Il processo di trattamento del biogas comprende diverse fasi e tecnologie, ciascuna mirata a rimuovere specifiche impurità.

Il biogas viene raccolto dai digestori primari e secondario attraverso cupole a tenuta stagna. Da qui, viene convogliato tramite tubazioni a un'unità centrale di trattamento del biogas. Qui subisce un trattamento primario in cui vengono rimosse particelle solide, umidità e solfuro di idrogeno, passando attraverso il filtro a cestello, i filtri a graniglia e i filtri a candela.

Una volta purificato il biogas viene inviato all'impianto di cogenerazione.

5.5 Produzione di energia e calore

Il biogas purificato viene inviato all'impianto di cogenerazione, dove viene utilizzato per produrre energia elettrica e termica. L'impianto di cogenerazione, noto anche come CHP (Combined Heat and Power), è un sistema che genera simultaneamente elettricità e calore

utilizzando il biogas come combustibile. Questo processo è altamente efficiente e sfrutta al massimo l'energia contenuta nel biogas.

I motori a gas utilizzano il biogas come combustibile per azionare i pistoni. Questi motori sono simili ai motori a combustione interna dei veicoli ma sono ottimizzati per l'uso di gas combustibili come il biogas. Il movimento dei pistoni è convertito in energia meccanica, che a sua volta aziona un generatore elettrico per produrre elettricità.

L'efficienza complessiva di un impianto di cogenerazione può raggiungere l'85-90%, un valore molto più alto rispetto alla produzione separata di elettricità e calore. Generalmente, il 35-40% dell'energia del biogas viene convertita in elettricità, mentre il restante 50-55% viene recuperato come calore utile. Il calore viene prodotto durante la combustione del biogas e catturato dagli scambiatori di calore. Questo calore può provenire dai gas di scarico del motore o dalle superfici calde del motore stesso. Il calore recuperato viene utilizzato per riscaldare acqua o produrre vapore, che può essere impiegato per il riscaldamento degli edifici, per processi industriali o per mantenere i digestori alla temperatura ottimale.

In genere, la maggior parte del biogas prodotto nei digestori primari e secondari viene utilizzata per alimentare l'impianto di cogenerazione. Circa il 90-95% del biogas prodotto è destinato alla cogenerazione, mentre il restante 5-10% può essere utilizzato per altre applicazioni, come il trattamento del biogas o come combustibile per veicoli.

Un impianto di cogenerazione alimentato a biogas rappresenta una soluzione altamente efficiente per la produzione simultanea di elettricità e calore, massimizzando l'energia recuperata dal biogas.

5.6 Utilizzo dei digestati

Il materiale residuo alla fine del processo di digestione, noto come digestato, è ricco di nutrienti e può essere utilizzato come fertilizzante. Dopo il trattamento nei digestori primari e secondario, i digestati sono separati in una frazione solida e una frazione liquida.

La frazione solida ottenuta contiene principalmente fibre vegetali non digerite e altri materiali solidi. Questa frazione può essere ulteriormente compostata per produrre un fertilizzante solido organico di alta qualità. Durante il compostaggio, la frazione solida viene mescolata con altri materiali organici per favorire la decomposizione aerobica.

In alternativa, può essere applicata direttamente al suolo per migliorare la fertilità e la struttura del terreno.

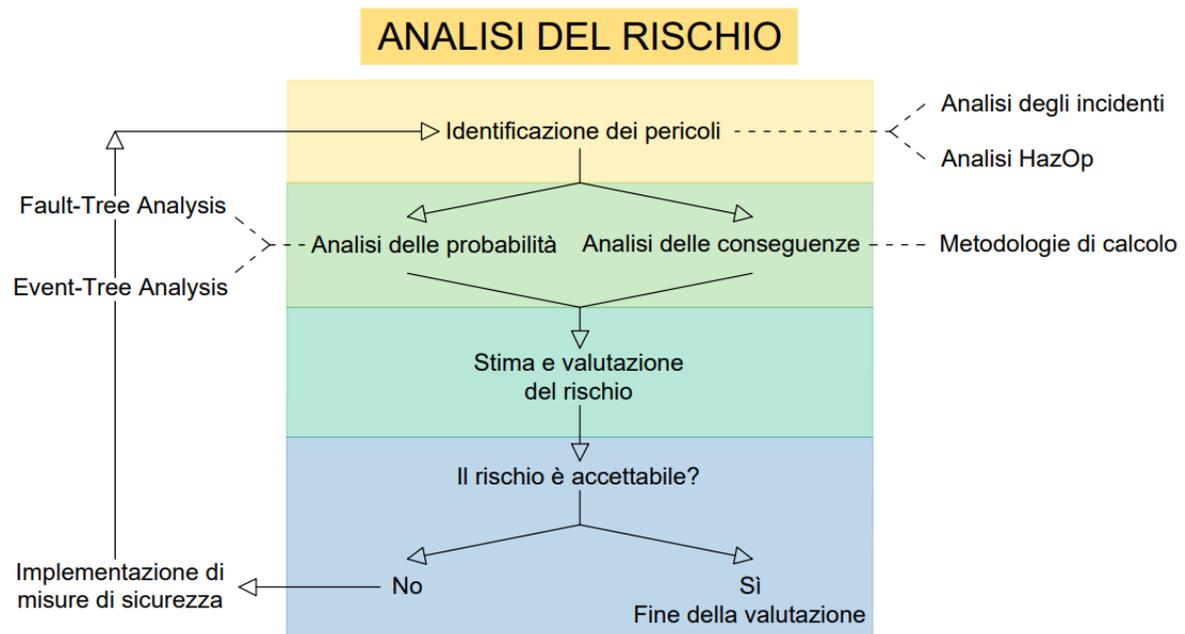
La frazione liquida, che contiene principalmente acqua, sali minerali disciolti e altri nutrienti, è particolarmente ricca di azoto, fosforo, potassio e altri micronutrienti essenziali per la crescita

delle piante. Questa frazione viene generalmente utilizzata per l'irrigazione dei campi, apportando direttamente nutrienti alle colture.

I digestati, prodotti come sottoprodotto del processo di digestione anaerobica nei biodigestori, rappresentano una risorsa preziosa per l'agricoltura e altre applicazioni. L'uso dei digestati come fertilizzante organico aiuta a ristabilire i nutrienti nel terreno, migliorandone la struttura e aumentando la capacità di ritenzione dell'acqua. Inoltre, contribuisce alla salute delle piante, promuovendo una crescita vigorosa e riducendo la necessità di fertilizzanti chimici.

6 Analisi dei rischi

In questo studio l'analisi del rischio viene effettuata seguendo lo schema sottostante, ma ci si ferma all'accettabilità o meno del rischio senza poi reiterare il processo.



La valutazione inizia con l'analisi degli incidenti che consiste in uno studio approfondito di vari incidenti avvenuti negli anni e di articoli scientifici riguardanti i pericoli degli impianti. Si è così ottenuto un quadro completo e dettagliato, consentendo, quindi, di concentrarsi sui problemi più comuni e significativi riscontrati negli impianti di produzione di biogas.

Dopodiché si procede con un'analisi HazOp (Hazard and Operability Study) che rappresenta una metodologia sistematica per identificare e valutare i potenziali rischi associati ai processi industriali. L'obiettivo principale di questa metodologia è quello di individuare le possibili deviazioni operative rispetto alle condizioni progettuali e valutare i rischi associati a tali deviazioni. Per svolgere questa analisi si parte da delle parole guida, come No, More, Less, che vengono interpretate come eventi tipici che potrebbero causare problematiche rispetto agli obiettivi del progetto. Le deviazioni, poi, sono le caratteristiche misurabili più importanti del sistema, come ad esempio: portata, pressione e temperatura; vengono esaminati sistematicamente per ogni sezione dell'impianto. Dopodiché ci si chiede quali sono le cause che potrebbero comportare quelle deviazioni e infine le conseguenze che si otterrebbero.

A seguito dell'individuazione delle deviazioni e identificazione dei possibili Top-Event è stata condotta la Fault-Tree Analysis. La FTA è un metodo sistematico utilizzato per analizzare le cause potenziali di guasti in un sistema e valutare le loro probabilità di accadimento. Questo

metodo è ampiamente impiegato nella gestione del rischio e nell'ingegneria della sicurezza per identificare i punti deboli in un sistema complesso e sviluppare strategie di mitigazione dei rischi.

La FTA inizia identificando l'evento indesiderato principale, chiamato "top event", che nel caso dell'impianto di biogas è lo sversamento di materiale. Successivamente, domandandosi qual è la causa di quell'evento, si crea un diagramma ad albero che rappresenta i vari fenomeni che possono contribuire al verificarsi del top event, fino ad individuare gli eventi base.

Grazie all'utilizzo di banche dati è possibile associare ad ogni evento base un tasso di guasto (μ) dal quale ci si può ricavare l'affidabilità (R) e la probabilità di accadimento di quell'evento (P) usando le formule:

$$R = e^{-\mu t}$$

$$P = 1 - e^{-\mu t}$$

Dove t è il tempo preso in considerazione; nel nostro caso t = 1 anno.

L'albero è costruito utilizzando simboli standardizzati quali porte logiche AND (\square) ed OR (\cap). In funzione della porta logica utilizzata si calcolano l'affidabilità (R) e la probabilità (P) utilizzando le formule:

<p>AND</p> $P = \prod_n P_i$ $R = 1 - \prod_n (1 - R_i)$	<p>OR</p> $P = 1 - \prod_n (1 - P_i)$ $R = \prod_n R_i$
---	--

Dopo la FTA, utilizzando i valori ricavati da questa, è stata condotta la Event-Tree Analysis (ETA). La metodologia ETA è la rappresentazione grafica di una serie di catene di eventi che potrebbero derivare da alcuni eventi iniziatori. Si crea in questo modo una struttura ad albero con diramazioni binarie a cui è possibile associare delle probabilità di accadimento e, quindi, calcolare le frequenze di accadimento degli scenari incidentali finali.

Per trovare i valori delle frequenze di accadimento degli eventi (f) si dovrà, dunque, utilizzare formule diverse a seconda che una condizione sia soddisfatta (SI) o meno (NO):

<p>SI</p> $f = P \times \mu$	<p>NO</p> $f = (1 - P) \times \mu$
-------------------------------------	---

Dopo aver effettuato questa analisi sono state calcolate le conseguenze di un ipotetico scenario di perdita di gas dal gasometro e di un conseguente innesco che comporta un Jet-Fire. Le formule utilizzate per i calcoli sono riportate nel Capitolo 8.

Grazie ai risultati ottenuti dagli alberi degli eventi e dei guasti, e dai calcoli delle conseguenze, è stato possibile valutare il rischio presente in un impianto di produzione di biogas.

7 Analisi degli incidenti

Per comprendere appieno i rischi e i pericoli principali presenti in un impianto di produzione di biogas, è stato condotto uno studio approfondito di vari incidenti e articoli scientifici. Si è così ottenuto un quadro completo e dettagliato, consentendo, quindi, di concentrarsi sui problemi più comuni e significativi riscontrati negli impianti di produzione di biogas.

Di seguito vengono presentati alcuni degli incidenti esaminati, e un'analisi statistica condotta su 208 incidenti, dal 2006 al 2016, e delle cause che li hanno generati.

7.1 Esplosione del locale tecnico dell'impianto

Durante il normale funzionamento dell'impianto si è verificata un'esplosione all'interno dell'edificio tecnico, che ospitava l'attrezzatura di monitoraggio e controllo della produzione di biogas, causando una sospensione della produzione di diversi mesi e una significativa perdita economica.

L'edificio tecnico dove è avvenuta l'esplosione è stato classificato, seguendo la normativa AtEx, come Zona 2 "atmosfera esplosiva non probabile durante il normale funzionamento e, se dovesse verificarsi, esisterà solo per breve tempo", data la sua distanza dalle aree dove sono presenti concentrazioni elevate di biogas.

L'esplosione, come indicato dai dati del sistema di sorveglianza, è avvenuta alle 05:00 del mattino nel prefabbricato dove si trovavano lo spogliatoio e le attrezzature di monitoraggio e controllo.

I vigili del fuoco hanno estinto l'incendio e, per prevenire ulteriori formazioni di biogas, hanno aperto tutti i digestori. Data la presenza di biogas nella rete di tubazioni elettriche, sono state aperte anche tutte le botole.

L'esplosione è avvenuta all'interno dell'edificio, probabilmente a causa di una miscela esplosiva di biogas detonata dalle apparecchiature elettriche.

Il serbatoio delle acque piovane, dove potrebbe essere avvenuta digestione anaerobica per la possibile presenza di percolato e insilato provenienti da una perdita dai silos interrati, non era stato svuotato da almeno un mese. Inoltre, il dimensionamento dei serbatoi non aveva tenuto adeguatamente conto della quantità di pioggia che poteva essere convogliata verso i digestori senza compromettere la produzione complessiva di biogas.

Un altro aspetto rilevante è stato il percorso insolito del percolato dai silos. Le griglie del tombino per il percolato presentano una sporgenza che impedisce la raccolta delle acque di percolato, che possono quindi bypassarlo e fluire direttamente nel tombino delle acque piovane.

Il serbatoio delle acque piovane, insieme a una botola stagna, costituisce un sistema

ermeticamente sigillato, dove si incontrano condizioni anaerobiche e può verificarsi la produzione di metano. Il serbatoio delle acque piovane viene svuotato con una pompa dedicata. Questa è collegata all'edificio danneggiato attraverso un tubo del diametro di 80 mm contenente linee di alimentazione e controllo. Tale tubo potrebbe convogliare il biogas dal serbatoio delle acque piovane all'edificio tecnico, a condizione che non vi siano ostacoli presenti. È stata svolta quindi un'indagine che ha confermato la presenza di metano in tutte e sei le vasche. Queste considerazioni supportano la presenza di un'attività anaerobica all'interno del serbatoio, sviluppata durante il ritardo nello svuotare il serbatoio delle acque piovane.

In conclusione, è probabile che l'esplosione sia correlata allo sviluppo spontaneo e incontrollato di un processo di digestione anaerobica psicrofila nel serbatoio delle acque piovane. Tale biogas, evidentemente convogliato nell'edificio danneggiato attraverso il sistema di tubazioni elettriche, ha prodotto una miscela esplosiva accesa da uno dei vari dispositivi elettrici.

7.2 Esplosione del digestore

Il 24 Agosto 2021, a Ivry-Le-Temple, in Francia, verso le 17:00, durante un'operazione di manutenzione, si è verificata un'esplosione all'interno di un digestore di volume di 3.900 m³. Questo ha causato un incendio alla copertura del digestore, portando alla necessità di isolare il sito scollegando le reti elettriche e del gas. Per mitigare i rischi era stata installata una torcia ma, purtroppo, era fuori uso a causa di un blackout e i tentativi di riavvio sono stati infruttuosi. Di conseguenza, sono state aperte le valvole di sicurezza del secondo digestore, situato a 3 metri di distanza.

Il crollo della cupola, costituita da membrane di materiale plastico, ha contribuito a soffocare parte dell'incendio ma ha anche creato tasche di gas. Fortunatamente, i vigili del fuoco sono intervenuti rapidamente e hanno spento l'incendio in meno di un'ora, utilizzando una lancia per l'estinzione e raffreddando la membrana del digestore secondario per precauzione.

Successivamente, sono state effettuate misurazioni di metano che si sono rivelate negative sul bordo del serbatoio. Per garantire la sicurezza, i vigili del fuoco hanno praticato dei fori sulla membrana per evitare l'accumulo di metano.

Le acque utilizzate per spegnere l'incendio sono state contenute nel digestore, mentre quelle di raffreddamento sono state raccolte e riutilizzate nel processo.

Dopo otto mesi, l'impianto è stato riavviato.

Dalle indagini condotte è emerso che l'esplosione è stata causata da diversi fattori, tra cui caratteristiche incompatibili dell'agitatore con l'ambiente di lavoro, il surriscaldamento dell'agitatore dovuto a numerosi cicli di avvio in breve tempo, e il bypass, già in azione da un

me, della funzione di sicurezza "termistore". Inoltre, le operazioni di manutenzione non erano completamente sicure, e alcuni componenti del digestore presentavano difetti di isolamento. Come risultato di una perizia, sono state raccomandate misure preventive, tra cui la creazione di una zona AtEx 2 all'interno del digestore, la formazione degli operatori, l'utilizzo di rilevatori multi-gas e il miglioramento delle pratiche di manutenzione, come la messa a terra delle installazioni e il collegamento equipotenziale degli elementi metallici. Inoltre, si è scoperto che il sistema di difesa antincendio era fuori uso il giorno dell'incidente.

7.3 Incendio del fermentatore

Il 20 Novembre 2019, in Germania, durante dei lavori di riparazione di un agitatore eseguiti da una ditta esterna, il cavo di collegamento dell'agitatore non è stato correttamente fissato dopo la sostituzione del cavo di trazione. Questo errore ha portato alla recisione del cavo di collegamento da parte dell'elica dell'agitatore, causando un cortocircuito che ha generato scintille. Le scintille sono riuscite ad accendere il biogas grezzo presente nel digestore in quanto la concentrazione di ossigeno nella miscela aria/gas era compresa nei limiti di infiammabilità e, quindi, innescare l'incendio. La quantità stimata di biogas grezzo bruciato è di 2.517 kg.

Successivamente, le autorità competenti, tra cui la squadra dei vigili del fuoco, la polizia e le ambulanze, sono intervenute prontamente. Grazie alla loro tempestiva risposta, l'incendio è stato rapidamente estinto. Fortunatamente, non ci sono stati feriti, ma si sono verificati danni materiali significativi, stimati intorno ai 200.000 euro, ai danni del digestore primario e del digestore secondario.

Questo incidente sottolinea l'importanza del controllo della qualità e delle verifiche finali durante i lavori di manutenzione, specialmente quando si tratta di ditte esterne. Le indagini successive hanno confermato che l'errore umano durante i lavori di riparazione è stato il principale fattore scatenante dell'incidente. È essenziale adottare procedure rigorose e garantire la corretta esecuzione di tutte le fasi delle operazioni di manutenzione per evitare gravi conseguenze come questa.

7.4 Incendio del serbatoio di stoccaggio

Il 13 Maggio 2022, in Germania, i vigili del fuoco sono stati allertati riguardo a un incendio presso l'impianto di biogas dopo la segnalazione di un automobilista. All'arrivo, hanno trovato il serbatoio di stoccaggio completamente avvolto dalle fiamme.

Sono state immediatamente chiuse tutte le valvole del gas collegate ai gasdotti entranti e uscenti, mentre il sistema di allarme ha attivato una notifica sul telefono cellulare degli operatori

addetti alle emergenze dell'impianto, principalmente a causa dello spegnimento automatico delle centrali termoelettriche.

Le indagini hanno rivelato che l'incendio ha avuto origine da un'apertura di 40 centimetri nel tetto di stoccaggio del gas, causata dai danni da tempesta subiti all'inizio di Febbraio. Nonostante i tentativi di procurare una nuova membrana di protezione dalle intemperie, si sono verificati ritardi a causa della scarsità di forniture e dell'alta domanda nell'industria del biogas. Di conseguenza, le operazioni sono proseguite con la membrana compromessa, richiedendo l'adozione di misure di emergenza e un maggiore controllo.

Prima dell'incidente, l'operatore aveva notato un aumento del consumo di gas, erroneamente attribuito ad un incremento della materia in ingresso ai digestori anziché a una possibile perdita nella membrana compromessa. Questo errore ha probabilmente contribuito all'aggravarsi della situazione.

Si ipotizza che la combinazione di pressione interna, inadeguata, nell'impianto di stoccaggio e un aumento dello strisciamento tra le membrane, esterna e interna, a causa dell'apertura abbia portato all'ignizione, dovuto alla scarica elettrica correlata alla carica elettrostatica delle membrane, del gas fuoriuscito. La quantità stimata di gas bruciato è di 6.420 kg

Nonostante la causa esatta della perdita di gas non possa essere definitivamente stabilita, ciò sottolinea l'importanza critica della manutenzione proattiva e della tempestiva sostituzione nelle strutture industriali. Fortunatamente, l'incendio è stato contenuto al serbatoio grazie alla rapida risposta e alle condizioni del vento favorevoli, evitando danni alle strutture circostanti ma si sono verificati danni materiali, stimati intorno ai 80.000 euro, ai danni della membrana protettiva.

Nel caso esaminato gli sforzi di controllo incrementato si sono rivelati inadeguati, evidenziando la necessità di ulteriori misure preventive. La decisione più appropriata avrebbe comportato la messa fuori servizio dell'impianto di stoccaggio del gas.

7.5 Esplosione del digestore a causa di un fulmine

Il 2 Giugno 2023, intorno alle 19:20, a Cassington, nell'Oxfordshire, si è verificato un impatto da fulmine su uno dei digestori di un impianto di produzione di biogas. L'evento ha innescato l'ignizione del gas contenuto all'interno del digestore, provocando un'esplosione e un conseguente incendio di considerevoli dimensioni che ha richiesto l'intervento delle squadre di soccorso fino alle 04:00 per spegnere le fiamme e garantire la sicurezza dell'impianto.

L'incendio ha causato danni significativi a tre dei cinque digestori presenti; tuttavia, fortunatamente ci sono registrati feriti. Questo risultato positivo è da attribuire anche

all'addestramento adeguato del personale dell'impianto, che ha seguito correttamente le procedure di emergenza. È da notare che l'incidente ha altresì causato interruzioni nell'erogazione di corrente elettrica nelle comunità circostanti.

Cinque anni prima, a Benson, sempre nell'Oxfordshire, si era verificato un evento simile in cui un fulmine aveva colpito un digestore presso l'azienda Agrivert, dando luogo a un incendio che aveva bruciato per 20 minuti e distrutto il digestore interessato.

Inquadrando il QR sottostante si può vedere un video dell'incendio scatenato dall'incidente del 2023.



7.6 Incendio nel gasdotto e conseguente effetto domino

Il 17 ottobre 2020, intorno alle 19:30, in Germania, si è verificato uno spegnimento improvviso della centrale termoelettrica a cogenerazione a causa di una pressione negativa nel sistema del gas. Poiché il responsabile della centrale era l'unico presente, ha deciso di posticipare l'operazione di purga necessaria del gasdotto fino al mattino successivo.

In seguito, in collaborazione con un altro membro del personale, è stato predisposto l'utilizzo di un'idropulitrice ad alta pressione per la rimozione di un ostacolo nel gasdotto. Tuttavia, durante questo processo, è stato rilevato il rilascio di metano da parte di un rilevatore di gas indossato dal responsabile, il quale ha tempestivamente interrotto l'operazione.

Nello stesso istante, è stata osservata l'emissione di fiamme dall'idropulitrice verso il gasdotto aperto, determinando il manifestarsi di un incendio.

Il responsabile ha inizialmente tentato di arginare l'incendio con un tubo dell'acqua, mentre un collega ha provveduto a contattare i servizi di emergenza.

L'incendio ha provocato danni significativi alla struttura, compresi i tetti gonfiabili dei reattori biologici e dei gasdotti, oltre ad aver causato il malfunzionamento del sistema di controllo della centrale a causa di un cortocircuito.

A seguito del guasto del sistema di controllo, gli agitatori in uno dei reattori biologici hanno cessato di funzionare, il che ha portato alla mancata miscelazione del substrato biologico.

Questo ha provocato un'elevata attività gassosa all'interno del reattore, superando la capacità della valvola di sicurezza e causando la rottura della membrana del gas.

Nonostante gli sforzi di spegnimento e di riparazione successivi, si è rivelato necessario intervenire con ulteriori misure preventive. In particolare, l'utilizzo di un rilevatore di gas è stato cruciale per rilevare tempestivamente la presenza di metano e interrompere le attività potenzialmente pericolose.

L'incidente ha causato una perdita stimata di metano di 2.236 Kg e di biogas di 4.300 Kg; la perdita economica stimata è di 200.000 euro.

Questo incidente sottolinea l'importanza di adeguati protocolli di sicurezza e di monitoraggio continuo per prevenire e gestire situazioni di emergenza in impianti industriali simili.

7.7 Analisi quantitativa degli incidenti negli impianti di biogas in Europa

Sulla base dello studio condotto nel 2017 da Petr Travníčka, Lubos Kotek, Petr Junga, Tomas Vitez, Karel Drapelac e Jan Chovanec, riguardante l'analisi statica di 208 incidenti avvenuti nel periodo tra il 2006 e il 2016, si propone un'analisi generale delle cause e delle conseguenze degli incidenti verificatisi negli impianti di biogas in Europa.

Fino al 2017, la Germania si è distinta come il paese con il maggior numero di incidenti, rappresentando il 76% dei 208 casi registrati. Questo dato può essere attribuito alla presenza della metà degli impianti di biogas presenti in Europa nel territorio tedesco.

Nella Tabella 1 sono riportati i principali incidenti registrati, con relativo numero e la percentuale di occorrenza, considerando il totale dei 208 casi identificati.

Tipo di evento	Numero di eventi	Frequenza percentuale [%]
Incendio	123	59
Deflagrazione / Esplosione	45	22
Ambientale	23	11

Tabella 1

La categoria degli incendi comprende: incendi di pozza (Pool Fire) e Jet Fire. L'area di collocamento dell'unità di cogenerazione si è dimostrata come il principale punto di innesco degli incendi, con 52 eventi su 123, attribuendo il difetto tecnologico come causa predominante con 28 eventi su 52.

La categoria deflagrazione/esplosione comprende: Flash Fire e Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE). Tali incidenti sono principalmente riscontrati nei digestori o nei serbatoi di stoccaggio del gas e sono spesso dovuti a negligenza dei lavoratori durante le operazioni di

servizio o manutenzione. Le deflagrazioni/esplosioni possono anche essere innescate da fenomeni naturali come scariche atmosferiche.

La categoria ambientale include gli incidenti in cui una perdita di liquidi ha provocato danni ambientali. Tali eventi sono prevalentemente associati ai digestori primari o secondari, con il difetto tecnologico, in particolare il malfunzionamento delle valvole di intercettazione, identificato come la principale causa di tali incidenti. È interessante notare come 13 dei 23 incidenti di questo tipo siano avvenuti nei mesi invernali (Dicembre, Gennaio e Febbraio), denotando un'influenza delle basse temperature sul malfunzionamento delle valvole d'intercettazione.

I danni finanziari derivanti dagli incidenti nelle stazioni di biogas presentano una notevole variabilità. La mediana dei danni si attesta a €150.000, indicando che il valore centrale degli impatti economici è ragionevolmente consistente. Tuttavia, il valore medio dei danni è significativamente più alto, pari a €402.416. Questa discrepanza tra la mediana e la media suggerisce la presenza di alcuni casi di danni molto elevati, che influenzano in modo sostanziale la valutazione complessiva. In particolare, analizzando la natura degli incidenti, si nota che gli incendi causati da guasti tecnici e le deflagrazioni originati da fulmini rappresentano le principali tipologie di eventi correlati a danni economici significativi.

Inoltre, uno degli incidenti più rilevanti è stato registrato a Gottingen nel 2006, caratterizzato da danni stimati fino a €10.000.000.

Nonostante la frequenza degli incidenti possa essere relativamente bassa, è chiaro che gli incidenti nelle stazioni di biogas possono comportare costi significativi quando si verificano. Pertanto, è fondamentale adottare un approccio proattivo nella gestione del rischio e nell'implementazione di misure preventive per salvaguardare non solo la sicurezza delle infrastrutture, ma anche l'integrità economica delle operazioni.

8 Analisi del rischio dell'impianto

Si procede ora con l'analisi del rischio dell'impianto di produzione di biogas.

8.1 Valutazione dell'unità da analizzare

L'analisi degli incidenti svolta ha evidenziato come l'unità più pericolosa all'interno di un impianto di biogas siano i digestori.

Nell'impianto in esame si ritiene più pericoloso il digestore secondario che è, inoltre, il cuore del processo di produzione di biogas, dove i materiali organici vengono ulteriormente decomposti e il gas prodotto viene raccolto. Il gasometro, situato sopra il digestore, è responsabile dello stoccaggio del biogas prodotto, difatti, all'interno di questo si ha la maggior parte del biogas stoccato. Questa combinazione di funzioni rende il digestore secondario con gasometro un punto nevralgico e potenzialmente pericoloso per diversi motivi.

Il biogas è una miscela di metano, anidride carbonica e in piccola parte idrogeno e altri gas, con il metano che è altamente infiammabile. Le perdite di gas, se non gestite correttamente, possono creare atmosfere esplosive, numerosi incidenti in passato hanno dimostrato quanto possano essere devastanti le esplosioni nei digestori.

Oltre al rischio di esplosioni, i digestori possono emettere gas tossici, come l'idrogeno solforato, che è estremamente pericoloso per la salute umana anche a basse concentrazioni. Incidenti di emissioni non controllate possono causare gravi danni sia agli operatori dell'impianto che alla popolazione circostante.

Il gasometro sovrastante il digestore è una struttura che deve essere costantemente monitorata per evitare cedimenti strutturali. Le pressioni interne variabili, dovute al processo di produzione del biogas, possono causare stress e danni alla struttura. Incidenti passati hanno mostrato che cedimenti del gasometro possono avere conseguenze catastrofiche, con fuoriuscite massicce di biogas e incendi conseguenti.

In funzione di queste considerazioni, il digestore secondario con sovrastante gasometro rappresenta l'unità più pericolosa in un impianto di biogas a causa dei molteplici rischi associati alla produzione, stoccaggio e gestione del biogas, e gli incidenti avvenuti in passato lo confermano.

8.2 Analisi HazOp

L'analisi HazOp (Hazard and Operability Study) rappresenta una metodologia sistematica per identificare e valutare i potenziali rischi associati ai processi industriali.

L'obiettivo principale è quello di individuare le possibili deviazioni operative rispetto alle condizioni progettuali e valutare i rischi associati a tali deviazioni.

Per svolgere questa analisi si parte da delle parole guida, come No, More, Less, che vengono interpretate come eventi tipici che potrebbero causare problematiche rispetto agli obiettivi del progetto. Le deviazioni, poi, sono le caratteristiche misurabili più importanti del sistema e vengono esaminate sistematicamente per ogni sezione dell'impianto. Dopodiché ci si chiede quali sono le cause che potrebbero comportare quelle deviazioni e infine le conseguenze che si otterrebbero.

Di seguito, in Tabella 2 e 3, viene illustrata l'analisi condotta.

METANO			
Parola guida	Deviazioni	Cause	Conseguenze
NO	Portata in ingresso	Reazione non riuscita nei digestori Perdita nelle tubazioni Perdita nei digestori primari	Minor rendimento dell'impianto Aree AtEx
	Portata in uscita	Reazione non riuscita nei digestori Perdita nelle tubazioni Perdita nel gasometro	Azzeramento del rendimento dell'impianto Aree AtEx
LESS	Portata in ingresso	Inibizione della reazione nei digestori Perdita nelle tubazioni Perdita nei digestori primari	Minor rendimento dell'impianto Aree AtEx
	Temperatura in ingresso	Rottura dello scambiatore di calore	Calo della pressione
	Pressione in ingresso	Inibizione della reazione nei digestori Perdita nelle tubazioni Perdita nei digestori	Ritorno del metano ai digestori primari
	Portata in uscita	Inibizione della reazione nei digestori Perdita nelle tubazioni Perdita nei digestori primari	Minor rendimento dell'impianto Aree AtEx
	Pressione in uscita	Inibizione della reazione nei digestori Perdita nel digestore secondario o nel gasometro	Minor rendimento dell'impianto Aree AtEx
MORE	Portata in ingresso	Reazione non controllata nei digestori Aumento di pressione nei digestori	Aumento della pressione nel gasometro Spreco di biogas (torcia)

		Aumento di temperatura nei digestori	
	Temperatura in ingresso	Malfunzionamento dello scambiatore di calore	Minor rendimento a causa dell'aumento di volume del gas
	Pressione in ingresso	Aumento di temperatura nei digestori Aumento di portata nei digestori Reazione non controllata nei digestori	Aumento della pressione nel gasometro Spreco di biogas (torcia)
	Portata in uscita	Reazione non controllata nei digestori Aumento di pressione nei digestori Aumento di temperatura nei digestori	Spreco di biogas (torcia)
	Pressione in uscita	Aumento di portata nei digestori Reazione non controllata nei digestori	Spreco di biogas (torcia)

Tabella 2 Risultati valutazione HazOp Metano

LIQUAME			
Parola guida	Deviazioni	Cause	Conseguenze
NO	Portata in ingresso	Rottura della pompa volumetrica Perdite nelle tubazioni Perdite nei digestori Ostruzione nelle tubazioni	Azzeramento della reazione Azzeramento del rendimento dell'impianto
	Portata in uscita	Rottura della pompa volumetrica Perdite nelle tubazioni Perdite nel digestore Ostruzione nelle tubazioni	Aumento della pressione nel digestore Rottura del digestore Sversamento
LESS	Portata in ingresso	Rottura della pompa volumetrica Perdite nelle tubazioni Perdite nei digestori Ostruzione nelle tubazioni	Inibizione della reazione Minor rendimento dell'impianto
	Temperatura in ingresso	Rottura dello scambiatore di calore	Inibizione della reazione Minor rendimento dell'impianto

	Portata in uscita	Rottura della pompa volumetrica Perdite nelle tubazioni Perdite nel digestore Ostruzione nelle tubazioni	Aumento della pressione nel digestore Rottura del digestore Sversamento
MORE	Portata in ingresso	Malfunzionamento della pompa volumetrica Carico di liquami eccessivo pregresso	Aumento della pressione Sversamento Aumento della produzione di idrogeno Reazione non controllata
	Temperatura in ingresso	Malfunzionamento dello scambiatore di calore	Aumento della pressione Aumento della produzione di idrogeno Reazione non controllata
	Pressione in ingresso	Malfunzionamento della pompa volumetrica	Aumento della portata Rottura del digestore
	Portata in uscita	Carico di liquami eccessivo pregresso	Rottura o ostruzione delle tubazioni

Tabella 3 Risultati valutazione HazOp Liquame

In generale la composizione del biogas all'interno del gasometro è:

- Metano (CH₄): 80-90%
- Anidride carbonica (CO₂): 10-15%
- Vapore acqueo (H₂O): 0-5%
- Azoto (N₂): 0-3%
- Ossigeno (O₂): 0-1%
- Idrogeno (H₂): 0-1%
- Solfuro di idrogeno (H₂S): 0-1%
- Ammoniaca (NH₃): tracce

Si vuole, perciò, sottolineare come l'aumento della quantità d'idrogeno nella miscela di biogas possa aumentarne la pericolosità in quanto è un gas altamente infiammabile e ha un ampio intervallo di infiammabilità (dal 4% al 75% in volume nell'aria). Questo significa che anche una piccola quantità di idrogeno può formare una miscela esplosiva se entra in contatto con l'aria e una fonte di innesco. L'idrogeno diffonde molto rapidamente e può fuoriuscire da guarnizioni e valvole con maggiore facilità rispetto ad altri gas, complicando la gestione della sicurezza dell'impianto.

La produzione di idrogeno è favorita da alcuni fattori o condizioni operative dei digestori, quali:

- Alcuni substrati, come i rifiuti organici ricchi di carboidrati semplici;

- Un pH più basso può favorire la crescita di batteri produttori di idrogeno (acetogeni e acidogeni);
- Temperature più elevate (termofile);
- La diminuzione dei batteri metanogeni, poiché consumano idrogeno per produrre metano;
- L'introduzione intenzionale o accidentale di batteri idrogenogeni, i quali producono idrogeno durante la fermentazione;
- Un carico eccessivo di materiale organico;
- Problemi tecnici come guasti nelle pompe di miscelazione o problemi di riscaldamento.

8.3 Fault-Tree Analysis

Dopo aver effettuato l'analisi Hazop, si è identificato come evento più critico il rilascio dal digestore secondario. Per effettuare una valutazione quantitativa di questo evento, si è utilizzata la metodologia della Fault Tree Analysis (FTA).

La FTA è un metodo sistematico utilizzato per analizzare le cause potenziali di guasti in un sistema e valutare le loro probabilità. Questo metodo è ampiamente impiegato nella gestione del rischio e nell'ingegneria della sicurezza per identificare i punti deboli in un sistema complesso e sviluppare strategie di mitigazione dei rischi.

La FTA inizia identificando l'evento indesiderato principale, chiamato "top event", che nel nostro caso è lo sversamento di materiale. Successivamente, domandandosi qual è la causa di quell'evento, si crea un diagramma ad albero che rappresenta i vari fenomeni che possono contribuire al verificarsi del top event.

Ogni evento base viene ha un tasso di guasto (μ), ad esempio per l'errore umano $\mu = 3 \times 10^{-2}$, dal quale ci si può ricavare l'affidabilità (R) e la probabilità di accadimento di quell'evento (P) usando le formule:

$$R = e^{-\mu t}$$

$$P = 1 - e^{-\mu t}$$

Dove t è il tempo preso in considerazione; nel nostro caso t = 1 anno.

L'albero è costruito utilizzando simboli standardizzati quali porte logiche AND (\square) ed OR (\cap). In funzione della porta logica utilizzata si calcolano l'affidabilità (R) e la probabilità (P) utilizzando le formule:

AND

$$P = \prod_n P_i$$

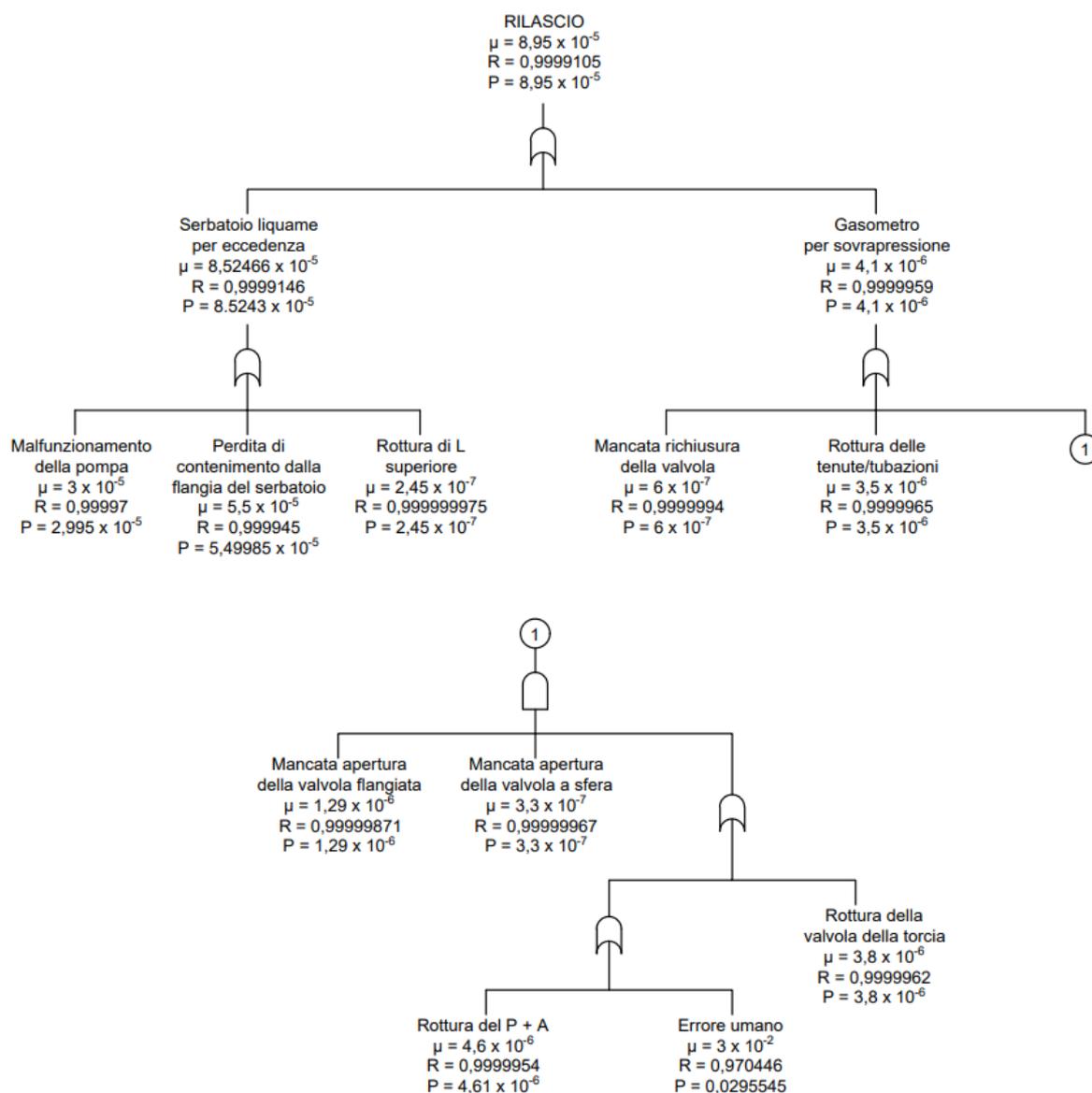
$$R = 1 - \prod_n (1 - R_i)$$

OR

$$P = 1 - \prod_n (1 - P_i)$$

$$R = \prod_n R_i$$

L'albero dei guasti ottenuto utilizzando questo metodo è il seguente.



Dove:

L = sensore di livello con comando di switch

P + A = sensore di pressione con switch, collegato ad allarme.

Dunque, la probabilità che avvenga un rilascio è di:

$$P = 8,95 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{eventi}}{\text{anno}} \right] = 0,00895 [\%]$$

Nonostante la probabilità di accadimento possa essere considerata bassa, è comunque superiore alla soglia di probabilità accettabile (10^{-5} [eventi/anno]).

8.4 Event-Tree Analysis

Si procede ora con l'analisi quantitativa degli eventi conseguenti al rilascio. Per questa analisi è stato utilizzato il metodo dell'Event Tree Analysis (ETA), che impiega il tasso di guasto ricavato per l'evento iniziale (top event) per calcolare le frequenze di accadimento degli scenari incidentali.

Nel nostro caso, si è deciso di analizzare separatamente i due tipi di rilascio, di gas e di liquami, invece di considerarli come un unico evento di rilascio. Questo approccio permette di ottenere un maggior dettaglio delle probabilità di accadimento per ciascun scenario.

Per trovare i valori delle frequenze di accadimento degli eventi (f) si dovrà, dunque, utilizzare formule diverse a seconda che una condizione sia soddisfatta (SI) o meno (NO):

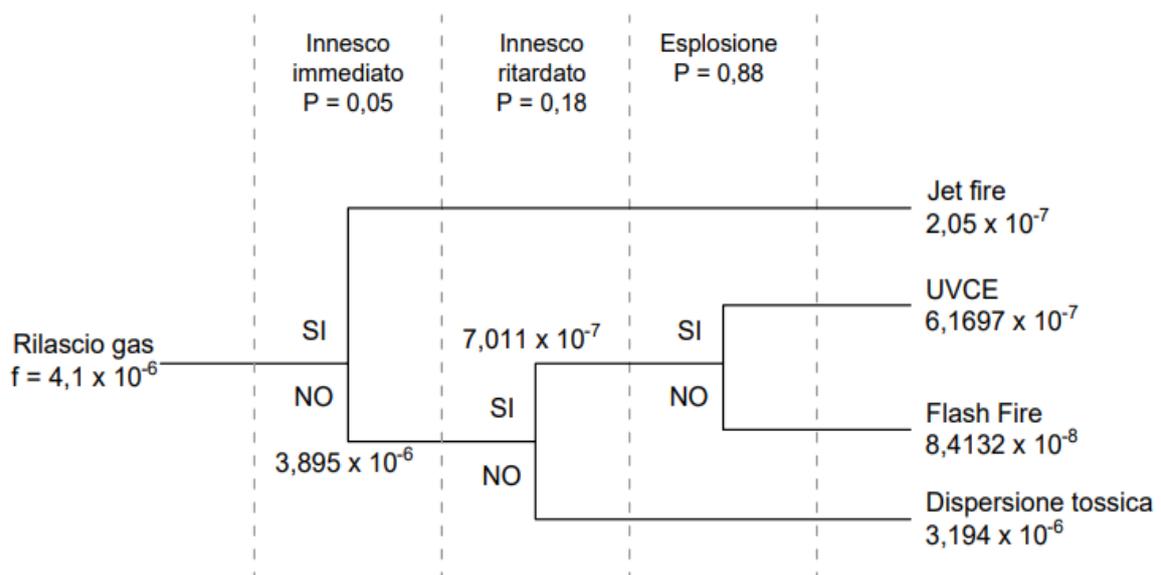
SI

$$f = P \times \mu$$

NO

$$f = (1 - P) \times \mu$$

Otteniamo così i seguenti alberi degli eventi:



Per quanto riguarda il rilascio di liquami, non è stato sviluppato un ETA poiché i liquami non sono infiammabili, essendo composti per il 90-95% da acqua. La conseguenza di un rilascio è esclusivamente la dispersione tossica, con una frequenza di accadimento pari a quella del rilascio di liquame stesso ($f = 8,5247 \times 10^{-5}$).

Dai risultati ottenuti è possibile osservare come l'evento finale con maggior frequenza di accadimento sia la dispersione tossica dovuta al rilascio di liquami ($f = 8,5247 \times 10^{-5}$).

[eventi/anno]). Invece, l'evento con meno probabilità di accadimento è il Flash Fire dovuto al rilascio di gas ($f = 6,1697 \times 10^{-8}$ [eventi/anno]).

8.5 Valutazione quantitativa degli scenari incidentali

Viene ora illustrato lo svolgimento della valutazione di due scenari incidentali che sono stati valutati: il rilascio di liquido e il rilascio di gas con conseguente innesco e Jet Fire.

8.5.1 Rilascio di liquido

Per studiare il rilascio dei liquami dal digestore secondario ($H = 8$ [m]) sono state fatte due ipotesi di rottura di questo: rottura dovuta all'usura con un foro di diametro 3 centimetri (ipotesi 1), e rottura dovuta a un urto accidentale con foro di diametro 10 cm (ipotesi 2), entrambe ad 1 metro di altezza da terra.

I dati disponibili sono i seguenti:

$$\begin{array}{lll} p_s = 105325 \text{ [Pa]} & \rho_L = 1100 \text{ [kg/m}^3\text{]} & RH = 50 \text{ [%]} \text{ (umidità)} \\ p_{amb} = 101325 \text{ [Pa]} & p_{rel} = 4000 \text{ [Pa]} & A_S = 176,7 \text{ [m}^2\text{]} \end{array}$$

Nel caso del foro da 3 centimetri (ipotesi n.1), è possibile stabilire: $D_{f,1} = 0,03$ [m] ; $A_{f1} = 2,83 \times 10^{-3}$ [m²] ; foro circolare $C_D = 1$; , $H_f = 1$ [m] , quindi $H_L = H - H_f = 7$ [m].

Invece, nel caso del foro da 10 centimetri (ipotesi n.2), è possibile stabilire: $D_{f,2} = 0,1$ [m] ; $A_{f2} = 0,0314$ [m²] ; foro circolare $C_D = 1$; $H_f = 1$ [m] , quindi $H_L = 7$ [m].

In funzione di questi dati posso ottenere la durata dell'efflusso del liquido, data dalla formula:

$$t_{efflusso} = \frac{A_s}{A_f C_D g} \left[\sqrt{2 \left(\frac{p_{rel}}{\rho_L} + g H_L \right)} - \sqrt{2 \frac{p_{rel}}{\rho_L}} \right]$$

Quindi:

$$t_{efflusso 1} = 93703 \text{ [s]} \simeq 26 \text{ [h]} \quad t_{efflusso 2} = 16478 \text{ [s]} \simeq 4,5 \text{ [h]}$$

La dispersione tossica sarà data dalla quantità di liquami dispersi, che equivale a:

$$m_1 = m_2 = 1360700 \text{ kg}$$

8.5.2 Rilascio di gas

Per studiare il rilascio del gas dal digestore secondario sono state fatte due ipotesi di rottura di questo: rottura dovuta all'usura con un foro di diametro 3 centimetri (ipotesi 1), e rottura dovuta

a un urto accidentale con foro di diametro 10 cm (ipotesi 2), entrambe nella sommità del gasometro.

I dati disponibili sono i seguenti:

$p_s = 105325 \text{ [Pa]}$	$\rho_L = 1100 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$R = 8314 \text{ [m}^3\text{Pa/Kmol]}$
$p_{amb} = 101325 \text{ [Pa]}$	$A_S = 176,7 \text{ [m}^2\text{]}$	$PM_{CH_4} = 16,04 \text{ [g/mol]}$
$p_{rel} = 4000 \text{ [Pa]}$	$T_{fiamma} = 2200 \text{ [K]}$	$PM_{aria} = 28 \text{ [g/mol]}$
$H_C = 50000 \text{ [kJ/kg]}$	$T_{amb} = 298,15 \text{ [K]} \equiv T_{jet}$	$RH = 50 \text{ [%]}$

Il metano è stato trattato seguendo le ipotesi di gas ideale ed è stato trattato come se fosse metano puro. Basandosi su queste ipotesi ottengo: i valori delle costanti $\alpha = 1$ e $\sigma = 0,095$, e il valore dell'efficienza di conversione (η) che vale $\eta = 0,2$.

Nel caso del foro da 3 centimetri (ipotesi n.1), è possibile stabilire: $D_{f,1} = 0,03 \text{ [m]}$; $A_{f1} = 2,83 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$.

Invece, nel caso del foro da 10 centimetri (ipotesi n.2), è possibile stabilire: $D_{f,2} = 0,1 \text{ [m]}$; $A_{f2} = 0,0314 \text{ [m}^2\text{]}$.

Poiché il metano è un gas biatomico avrò che:

$$\gamma = 1,4 \qquad p_{cr} = 0,528 \times p_{atm} = 191903 \text{ [Pa]}$$

Questo evidenzia che non avrei efflusso critico ma per fini conservativi è stato considerato tale; quindi, si è assunto $C_D = 1$.

Possiamo ora calcolare la portata massica in uscita del foro usando la formula:

$$\dot{m} = A_f C_D p_s \sqrt{\frac{\gamma PM}{RT} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{p_{amb}}{p_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{amb}}{p_s} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

Otteniamo dunque:

$$\dot{m}_1 = 0,119 \left[\frac{kg}{s} \right] \qquad \dot{m}_2 = 1,99 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Quindi, poiché il gasometro contiene 90 kg di metano, avrò che il tempo di efflusso sarà pari a:

$$2 \text{ [s]} \approx 8,5 \text{ [min]} \qquad t_2 = 45,28 \text{ [s]}$$

Supponendo che il gas in uscita trovi un innesco efficace e quindi si trasformi in un Jet Fire vado a calcolare le caratteristiche del getto.

$$\frac{L_{fiamma}}{D_{foro}} = \frac{5,3}{\sigma} \sqrt{\frac{T_{fiamma}}{T_{amb}} \left(\sigma + (1 - \sigma) \frac{PM_{aria}}{PM_{CH_4}} \right)} = 199,98$$

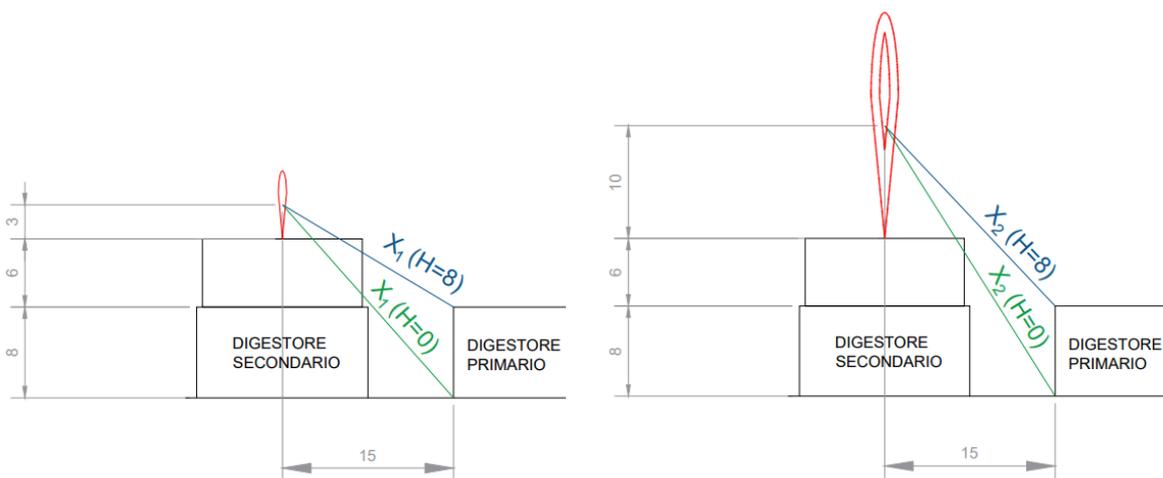
Dunque, avrò che:

$$L_{fiamma 1} = 199,98 \times D_{foro 1} = 5,99 \text{ [m]} \quad L_{fiamma 2} = 199,98 \times D_{foro 2} = 19,97 \text{ [m]}$$

Calcoliamo ora il diametro massimo del Jet Fire:

$$D_{jet,max,1} = 0,12 \times L_{fiamma 1} = 0,72 \text{ [m]} \quad D_{jet,max,2} = 0,12 \times L_{fiamma 2} = 2,4 \text{ [m]}$$

Calcoliamo ora la potenza termica irraggiata, considerando come bersaglio un digestore primario e valutando l'irraggiamento sia alla base del digestore (H = 0 [m]) e alla sommità del digestore (H = 8 [m]).



Otteniamo dunque:

$$\begin{aligned} x_1(H=0) &= \sqrt{15^2 + (14 + 3)^2} \\ &= 22,67 \text{ [m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2(H=0) &= \sqrt{15^2 + (14 + 10)^2} \\ &= 28,3 \text{ [m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_1(H=8) &= \sqrt{15^2 + (14 + 3 - 8)^2} \\ &= 17,49 \text{ [m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2(H=8) &= \sqrt{15^2 + (14 + 10 - 8)^2} \\ &= 21,93 \text{ [m]} \end{aligned}$$

Possiamo ora calcolare la trasmissività termica mediante la formula:

$$\tau_a = 2,02(P_W x)^{-0,09}$$

Ottenendo così:

$$\tau_{a,1}(H = 0) = 0,786$$

$$\tau_{a,2}(H = 0) = 0,771$$

$$\tau_{a,1}(H = 8) = 0,805$$

$$\tau_{a,2}(H = 8) = 0,788$$

Andiamo ora calcolare il fattore di vista utilizzando la formula:

$$F = \frac{1}{4\pi x^2}$$

Ricaviamo perciò:

$$F_1(H = 0) = 1,55 \times 10^{-4}$$

$$F_2(H = 0) = 9,94 \times 10^{-4}$$

$$F_1(H = 8) = 2,60 \times 10^{-4}$$

$$F_2(H = 8) = 1,65 \times 10^{-4}$$

Calcoliamo infine la potenza termica irradiata mediante l'equazione:

$$E_r = \dot{m}H_C F \tau_a \eta$$

Troviamo, quindi, i valori:

$$E_{r,1}(H = 0) = 0,145 \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

$$E_{r,1}(H = 8) = 0,249 \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

$$E_{r,2}(H = 0) = 1,525 \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

$$E_{r,2}(H = 0) = 25,96 \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

8.6 Effetto domino

In questa fase analizziamo il potenziale effetto domino che potrebbe verificarsi nei vari scenari incidentali individuati attraverso l'Event-Tree Analysis (ETA). Questo metodo permette di mappare e comprendere le possibili evoluzioni di un incidente, e le sue conseguenze.

Per effettuare questa valutazione, partiamo dalle frequenze degli eventi ottenute tramite l'ETA. Successivamente, queste frequenze vengono moltiplicate per le probabilità di causare un effetto domino specificate nella Tabella 4 riportata di seguito, così da determinare non solo la frequenza con cui un effetto domino potrebbe verificarsi ma anche la probabilità complessiva di tale avvenimento.

Effetto sorgente	Probabilità
Interessamento da Jet Fire con durata inferiore a 5 min	0
Interessamento da Jet Fire con durata tra 5 e 10 min	0,5

Tabella 4 Probabilità di effetto domino

Utilizzando i valori precedentemente ottenuti notiamo che:

- Il Jet Fire come da ipotesi 1 ha una probabilità del 50% di causare un effetto domino in quanto l'evento dura circa 8,5 minuti. La sua frequenza di accadimento sarà quindi di $1,025 \times 10^{-7}$ [eventi/anno] (al limite del realistico);
- Il Jet Fire come da ipotesi 2 ha una probabilità del 0% di causare un effetto domino, questo perché, sebbene abbia una maggior potenza d'irraggiamento, l'evento dura solo 45 secondi. Ovviamente, se la fiamma fosse con direzione verso il bersaglio la probabilità di causare un effetto domino aumenterebbe.

9 Analisi NaTech

Gli impianti di biogas sono esposti a diversi rischi naturali e tecnologici (NaTech), che possono compromettere la sicurezza delle operazioni e la continuità della produzione energetica. Tra questi rischi il fulmine rappresenta una minaccia significativa data la natura stessa degli impianti e la presenza di materiali infiammabili e apparecchiature sensibili.

Il rischio di fulmine per un impianto di biogas non è solo una questione di protezione delle strutture fisiche ma coinvolge anche la prevenzione di incidenti, i quali potrebbero avere gravi conseguenze ambientali ed economiche. Un colpo di fulmine può causare incendi, esplosioni e il rilascio incontrollato di gas metano, mettendo a rischio la vita delle persone, l'integrità dell'impianto e l'ambiente circostante.

È stata condotta un'analisi approfondita del rischio di fulmine per l'impianto di biogas trattato e per un ipotetico impianto avente le caratteristiche degli impianti di ultima generazione, esplorando i diversi aspetti della valutazione del rischio, le tecniche di mitigazione e le misure di sicurezza da adottare. L'obiettivo è di offrire un quadro chiaro e dettagliato delle strategie efficaci per ridurre al minimo il rischio di fulmine, garantendo la sicurezza e l'efficienza degli impianti di biogas.

9.1 Possibili effetti di un fulmine

Il fulmine che colpisce una struttura può avere i seguenti effetti:

- causare danni a persone per elettrocuzione, dovuta alle tensioni generate dal fulmine quando entra in contatto con il suolo o con superfici metalliche (componente di rischio R_A);
- provocare danni immediati come incendi, esplosioni e danni meccanici a causa del calore intenso del fulmine, del surriscaldamento dei conduttori, o della fusione del metallo. Questi danni possono anche derivare dalle sovratensioni e dalle correnti indotte dal fulmine stesso (componente di rischio R_B);
- causare guasti o malfunzionamenti agli impianti interni a causa dell'impulso elettromagnetico generato dal fulmine (LEMP - Lightning Electromagnetic Pulse) (componente di rischio R_C).

9.2 Metodo di valutazione del rischio fulmine

Andremo ora a descrivere il metodo utilizzato per la valutazione delle probabilità, del danno e del rischio fulmine, come da linea guida *Impianti di protezione contro le scariche atmosferiche, Valutazione del rischio e verifiche*, in “Inail”.

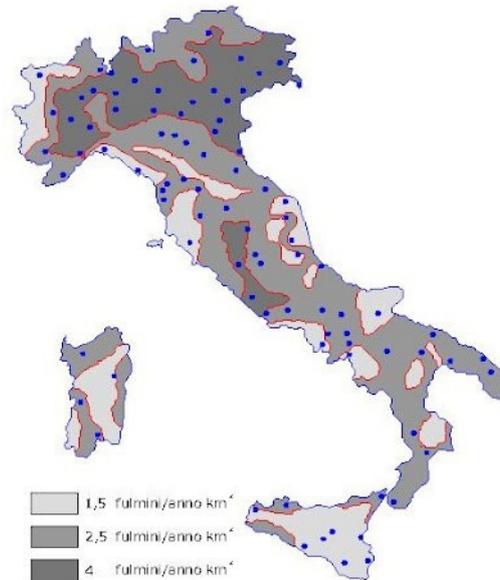
9.2.1 Calcolo delle probabilità

Il numero di eventi pericolosi N_D causati da fulminazione diretta della struttura può essere calcolato come il prodotto:

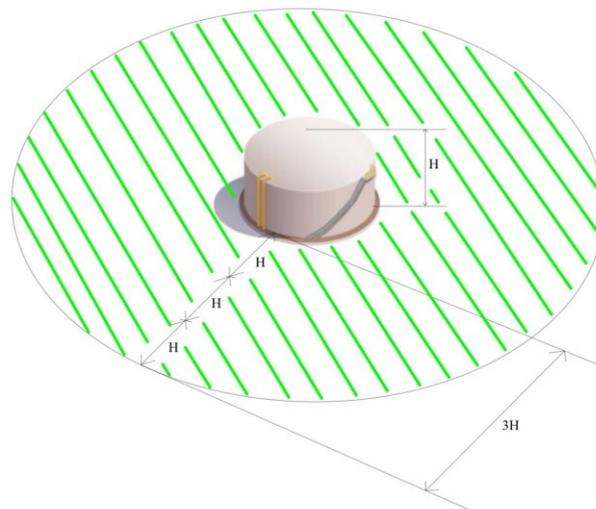
$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$$

dove

- N_G è la densità di fulmini al suolo [fulmini/($\text{km}^2 \times \text{anno}$)], ed è stato assunto il valore 4, preso da mappa Inail della densità dei fulmini al suolo;



- A_D è l'area di raccolta della struttura isolata [m^2], considerata come indicata in verde;



C_D è il coefficiente di posizione della struttura i cui valori vengono definiti nella Tabella 5.

Ubicazione relativa	C_D
Oggetto circondato da oggetto di altezza più elevata	0,25
Oggetto circondato da oggetto di altezza uguale o inferiore	0,5
Oggetto isolato: nessun altro oggetto nelle vicinanze	1
Oggetto isolato sulla cima di una collina o di una montagna	2

Tabella 5

È possibile valutare l'influenza degli oggetti circostanti considerando l'altezza relativa della struttura rispetto a questi oggetti o al suolo, entro una distanza pari a 3 volte l'altezza della struttura ($3H$) e assumendo $C_D = 1$.

La probabilità di danno agli esseri viventi (P_A) causata dalle tensioni di contatto e di passo per un fulmine che colpisce la struttura dipende dal Sistema di protezione dai fulmini (LPS) installato e dalle misure di protezione aggiuntive adottate:

$$P_A = P_{TA} \times P_B$$

dove

- P_{TA} dipende dalle misure di protezione aggiuntive contro le tensioni di passo e di contatto, elencate nella Tabella 6 (alla quale si rimanda per i valori di P_{TA}). Se vengono adottate più misure di protezione, il valore di P_{TA} è il prodotto dei corrispondenti valori. Queste misure di protezione sono efficaci nella riduzione di P_A solo se la struttura è protetta da un LPS o se le calate naturali dell'LPS utilizzano le strutture portanti metalliche continue o i ferri di armatura del calcestruzzo, e se sono soddisfatte le prescrizioni relative all'equipotenzializzazione e alla messa a terra.

Misure di protezione	P_{TA}
Nessuna misura di protezione	1
Cartelli ammonitori	10^{-1}
Isolamento elettrico delle parti accessibili	10^{-2}
Efficace equipotenzializzazione del suolo	10^{-2}
Barriere o strutture portanti dell'edificio utilizzate come calate	0

Tabella 6

- P_B dipende dal livello di protezione (LPL) con cui è progettato l'LPS e assume i valori come da Tabella 7.

Caratteristiche della struttura	Classe dell'LPS	P_B
Struttura non protetta con LPS		1
Struttura protetta con LPS	I	0,2
	II	0,1
	III	0,05
	IV	0,02
Struttura con organi di captazione conformi ad un LPS di Classe I e con organi naturali di discesa costituiti da un elemento metallico continuo o dai ferri dell'armatura del calcestruzzo		0,01
Struttura con copertura metallica o organi di captazione, comprendenti eventuali componenti naturali e con organi naturali di discesa costituiti da uno schermo metallico continuo o da ferri dell'armatura del calcestruzzo		0,001

Tabella 7

La probabilità P_C che un fulmine su una struttura causi guasti negli impianti interni è data dalla relazione:

$$P_C = P_{SPD} \times C_{LD}$$

dove

- La dipendenza di P_{SPD} riguarda il sistema di SPD (Dispositivi di Protezione contro le Sovratensioni) e il livello di protezione (LPL) scelto per il progetto degli SPD, con i valori riportati nella Tabella 8. Un sistema di SPD coordinato serve a ridurre P_C , ma la protezione offerta è efficace solo in strutture con un LPS o uno schermo metallico continuo, oppure con ferri di armatura del calcestruzzo che svolgono la funzione di LPS naturale, e solo se vengono rispettati i requisiti di equipotenzializzazione e messa a terra. Inoltre, i valori di P_{SPD} possono essere abbassati se gli SPD utilizzati hanno caratteristiche migliori rispetto ai requisiti LPL, come una corrente nominale (I_n) più alta o un livello di protezione (U_p) più basso.

LPL	P _{SPD}
Sistema di SPD assente	1
III – IV	0,05
II	0,02
I	0,01
SPD con caratteristiche migliori rispetto ai requisiti richiesti per l'LPL-I	0,005 – 0,001

Tabella 8

- C_{LD} è un coefficiente che varia in base alle condizioni di schermatura, messa a terra e separazione della linea a cui è collegato l'impianto interno; i relativi valori sono indicati nella Tabella 9. Nel calcolo della probabilità P_C, i valori di C_{LD} riportati si riferiscono a sistemi con impianti interni schermati. Per i sistemi con impianti interni non schermati, si dovrebbe assumere C_{LD} = 1.

Tipo di linea esterna	Connessione all'ingresso	C _{LD}
Area non schermata	Non definita	1
Interrata non schermata	Non definita	1
Linea di energia con neutro a terra in più punti lungo il percorso	Nessuna	1
Linea schermata interrata (energia o TLC)	Schermo non connesso alla stessa barra equipotenziale degli apparati	1
Linea schermata aerea (energia o TLC)	Schermo non connesso alla stessa barra equipotenziale degli apparati	1
Linea schermata interrata (energia o TLC)	Schermo connesso alla stessa barra equipotenziale degli apparati	1
Linea schermata aerea (energia o TLC)	Schermo connesso alla stessa barra equipotenziale degli apparati	1
Cavo di protezione contro il fulmine o posa in condotto per la protezione di cavi contro il fulmine	Schermo connesso alla stessa barra equipotenziale degli apparati	0
(Nessuna linea esterna)	Nessuna connessione a linee esterne	0
Qualsiasi tipo	Interfacce di separazione secondo la CEI 81-10/4	0

Tabella 9

9.2.2 Valutazione delle perdite

La perdita di vite umane dipende dalle caratteristiche della zona, che sono tenute in conto mediante fattori di incremento (h_z) e di riduzione (r_t, r_p, r_f). Le formule che si usano per calcolare le perdite sono in Tabella 10.

Tipo di danno	Perdita tipica
D1, vittime per elettrocuzione	$L_A = r_t \times L_T \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$
D2, vittime per danno materiale	$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$
D3, vittime per guasto degli impianti interni	$L_C = L_O \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$

Tabella 10

Il massimo valore di perdita in ciascuna zona va moltiplicato per il rapporto tra il numero di persone nella zona (n_z) e il numero totale di persone (n_t) nell'intera struttura e per il rapporto tra il tempo di permanenza nella zona espresso in ore all'anno (t_z) (nel nostro caso $t_z = 8 \text{ ore} \times 223 \text{ giorni lavorativi annui} = 1784$), e il numero totale di ore in un anno (8760).

L_T è il tipico numero medio di vittime per elettrocuzione (D1), L_F è il tipico numero medio di vittime per danno materiale (D2), infine, L_O è il tipico numero medio di vittime per guasto degli impianti interni (D3); i loro valori vengono riportati nella Tabella 11.

Danno	Tipo di danno	Valori tipici delle perdite	Tipo di struttura
D1	Danno a esseri viventi	$L_T = 10^{-2}$	Tutti i tipi
D2	Danno materiale	$L_F = 10^{-2}$	Rischio di esplosione
		$L_F = 10^{-2}$	Ospedali, alberghi, civile abitazione, scuole
		$L_F = 5 \times 10^{-3}$	Pubblico spettacolo, chiese, musei
		$L_F = 2 \times 10^{-3}$	Industriale, commerciale
D3	Guasto di impianti interni	$L_O = 10^{-2}$	Rischio di esplosione
		$L_O = 10^{-3}$	Blocchi operatori e reparti di rianimazione
		$L_O = 10^{-4}$	Altre parti di ospedali

Tabella 11

r_t è un coefficiente di riduzione per la perdita di vite umane dipendente dal tipo di terreno o pavimentazione, i suoi valori sono mostrati in Tabella 12.

Tipo di superficie	Resistenza di contatto	r_t
Agricolo, cemento	≤ 1	10^{-2}
Marmo, ceramica	1 -10	10^{-3}
Pietrisco, moquette, tappeto	10 -100	10^{-4}
Asfalto, linoleum, legno	≥ 100	10^{-5}

Tabella 12

r_p è un coefficiente di riduzione per la perdita dovuta a danno materiale dipendente dai provvedimenti utili a ridurre le conseguenze dell'incendio, i suoi valori sono indicati nella Tabella 13. Se sono adottate più misure il valore di r_p dovrebbe essere quello minore tra quelli considerati.

Nelle strutture con rischio di esplosione $r_p = 1$ in tutti i casi.

Misure adottate	r_p
Nessuna misura	1
Una delle seguenti misure: estintori, impianto fisso di estinzione operato manualmente; impianto di allarme manuale; idranti; compartimentazione antincendio; vie di fuga	0,5
Una delle seguenti misure: impianto fisso di estinzione operato automaticamente; impianto di allarme automatico	0,2

Tabella 13

r_f è un coefficiente di riduzione per la perdita dovuta a danno materiale dipendente dal rischio di incendio o dal rischio di esplosione della struttura, i suoi valori vengono riportati in Tabella 14.

Rischio d'incendio	Entità del rischio	r_f
Esplosione	Zone 0, 20 ed esplosivi solidi	1
	Zone 1, 21	10^{-1}
	Zone 2, 22	10^{-3}
Incendio	Elevato	10^{-1}
	Ordinario	10^{-2}
	Ridotto	10^{-3}
Esplosione o incendio	Nulla	0

Tabella 14

h_z è un coefficiente di incremento della perdita dovuto al danno materiale nel caso sia presente un pericolo particolare, i suoi valori vengono indicati in Tabella 15.

Misure adottate	h_z
Nessuno	1
Livello ridotto di panico (struttura limitata a due piani e numero di persone inferiore a 100)	2
Livello medio di panico (strutture per eventi culturali o sportivi con numero di partecipanti tra 100 e 1000)	5
Difficoltà di evacuazione (strutture con presenza di persone impossibilitate a muoversi, ospedali)	5
Livello elevato di panico (strutture per eventi culturali o sportivi con numero di partecipanti maggiore a 1000)	10

Tabella 15

n_z è il numero delle persone nella zona considerata; n_t è il numero totale di persone nella struttura; infine, t_z è il tempo in ore all'anno per cui le persone sono presenti nella zona considerata.

Il valore della perdita economica zona può essere determinato considerando che la perdita economica dipende dalle caratteristiche della zona in cui è situata la struttura, che sono tenute in conto con i coefficienti di riduzione r_t , r_p ed r_f .

Il valore relativo alla zona dipende dal tipo di danno:

- D1 (danno ad animali per elettrocuzione): c_a (solo il valore degli animali);
- D2 (danno materiale): $c_a + c_b + c_c + c_s$ (valore di tutti i beni);
- D3 (guasto degli impianti interni): c_s (valore impianti interni e attività a loro connesse).

Le formule per calcolarli sono riportate nella Tabella 16.

Tipo di danno	Perdita tipica
D1	$L_U = r_t \times L_T \times (c_a/c_t)$
D2	$L_V = r_p \times r_f \times L_F \times (c_a + c_b + c_c + c_s)/c_t$
D3	$L_W = L_O \times (c_s/c_t)$

Tabella 16

L_T è il tipico valore medio relativo di tutti i beni danneggiati per elettrocuzione (D1) causato da un evento pericoloso; L_F è il tipico valore medio relativo di tutti i beni danneggiati per danno materiale (D2) causato da un evento pericoloso; infine, L_O è il tipico valore medio relativo di tutti i beni danneggiati per guasto degli impianti interni (D3) causato da un evento pericoloso; i loro valori sono indicati in Tabella 17.

r_t è un coefficiente di riduzione per la perdita di animali dipendente dal tipo di terreno o pavimentazione; r_p è un coefficiente di riduzione per la perdita dovuta a danno materiale dipendente dai provvedimenti atti a ridurre le conseguenze dell'incendio; r_f è un coefficiente di riduzione per la perdita dovuta a danno materiale dipendente dal rischio di incendio o dal rischio di esplosione della struttura; c_a è il valore degli animali nella zona c_b è il valore dell'edificio relativo alla zona; c_c è il valore del contenuto della zona; c_s è il valore degli impianti interni comprese le loro attività nella zona; infine, c_t è il valore complessivo della struttura (somma comprensiva di tutte le zone per animali, edificio, contenuto ed impianti interni incluse le loro attività).

Danno	Tipo di danno	Valori tipici delle perdite	Tipo di struttura
D1	Danno per elettrocuzione	$L_T = 10^{-2}$	Tutti i tipi solo se sono presenti animali
D2	Danno materiale	$L_F = 1$	Rischio di esplosione
		$L_F = 0,5$	Ospedale, industriale, museo, agricola
		$L_F = 0,2$	Albergo, scuola, ufficio, chiesa, pubblico spettacolo, commerciale
		$L_F = 10^{-1}$	Altro
D3	Guasto di impianti interni	$L_O = 10^{-1}$	Rischio di esplosione
		$L_O = 10^{-2}$	Ospedale, industriale, ufficio, albergo, commerciale
		$L_O = 10^{-3}$	Museo, agricola, scuola, chiesa, pubblico spettacolo
		$L_O = 10^{-3}$	Altro

Tabella 17

Le informazioni relative al valore degli animali (c_a) (nel nostro caso $c_a = 0$), dell'edificio (c_b), del contenuto (c_c) e degli impianti interni comprese le loro attività (c_s) sono state fornite dal proprietario della struttura. Le frazioni sono state divise secondo il seguente criterio.

9.2.3 Valutazione del rischio

I fattori che influenzano le componenti di rischio di una struttura sono:

- Area di raccolta
- Resistività superficiale del suolo
- Resistività della pavimentazione
- Barriere, isolamento, cartelli ammonitori, equipotenzializzazione del suolo
- LPS
- Equipotenzializzazione con SPD
- Sistema di SPD
- Interfacce di separazione
- Schermatura locale o delle linee interne
- Cablaggio degli impianti interni

Il rischio può essere considerato come una somma di componenti rilevanti. Il valore di ogni componente può essere calcolato utilizzando la seguente espressione:

$$R = N_D \times P_X \times L_y$$

Ciascuna delle componenti del rischio, R dipende:

- dal numero annuo di fulmini pericolosi che possono influenzare la struttura (N);
- dalla probabilità di danno dovuta al fulmine (P_X , con $X = A, C$);
- dall'entità del danno ad esso relativo (L_y , con $y = A, B, C, V, W$).

La protezione dai fulmini (LP) è necessaria se il rischio (R) è superiore al livello di rischio tollerabile (R_T) ($R > R_T$), il cui valore è indicato in Tabella 18. In questo caso, deve essere adottata un'opportuna protezione dai fulmini (LP) al fine di ridurre il rischio al di sotto del valore di rischio tollerabile ($R \leq R_T$).

Perdita	Tipo di perdita	Significato	Rischio tollerabile R_T [anni⁻¹]
L1	Perdita di vite umane	Numero di morti all'anno, riferiti al numero totale di persone esposte	10^{-5}
L2	Perdita di servizio pubblico	Numero di utenti non serviti per durata annua del disservizio, riferiti al numero totale di utenti serviti all'anno	10^{-3}
L3	Perdita di patrimonio culturale	Valore annuo dei beni perduti riferiti al valore totale dei beni esposti al rischio	10^{-4}

Tabella 18

Se è possibile che si verifichino uno o più tipi di perdita, la condizione $R \leq R_T$ deve essere rispettata per ciascun tipo di perdita (L_y). I valori di rischio tollerabile R_T relativi alle perdite di valore sociale sono determinati dai competenti comitati tecnici nazionali.

Per quanto riguarda il rischio di perdite economiche, il committente può scegliere se accettarlo, proteggerlo con un'assicurazione o implementare una protezione adeguata contro i fulmini (LP) in base ai risultati della valutazione e ai consigli del professionista incaricato.

9.3 Valutazione senza protezioni

Verrà ora fatta la valutazione del rischio fulmine senza l'utilizzo di protezioni contro le scariche atmosferiche, poiché i dati raccolti riguardanti le protezioni non ne evidenziano la presenza.

9.3.1 Calcolo delle probabilità

La densità dei fulmini al suolo (N_G) è stata considerata pari a 4 [fulmini/km²×anno], mentre l'area di raccolta (A) della struttura è pari a 3768,2 \approx 3770 [m²].

Per sicurezza è stata considerata l'influenza delle strutture vicine, ottenendo il valore del coefficiente di posizione $C_D = 1$.

Il numero di eventi pericolosi N_D causati da fulminazione diretta della struttura è dunque uguale a:

$$N_D = 4 \times 3770 \times 1 \times 10^{-6} = 0,01508$$

Poiché sono assenti misure di protezione aggiuntive contro le tensioni di passo e di contatto, e sistemi LPS, i valori di probabilità di danno agli esseri viventi (P_A) sono pari a:

$$P_A = 1 \times 1 = 1$$

Il valore della probabilità di danno alle strutture (P_B) dipende dal livello di protezione (LPL) con cui è progettato l'LPL, ma nel nostro caso non presente, dunque:

$$P_B = 1$$

Dato che il sistema non ha SPD e la linea è interrata non è schermata, la probabilità P_C che un fulmine su una struttura causi guasti negli impianti interni è pari a:

$$P_C = 1 \times 1 = 1$$

9.3.2 Valutazione delle perdite

Si vanno ora a calcolare i valori delle perdite di vite umane e di perdite economiche, seguendo il metodo precedentemente scritto.

9.3.2.1 Perdita di vite umane

Il valore del coefficiente di riduzione dovuto al tipo di terreno (r_t) è pari a 1.

L_T è il tipico numero medio di vittime per elettrocuzione e vale $L_T = 10^{-2}$.

n_z è il numero delle persone nella zona considerata ed è uguale a 3, invece n_t è il numero totale di persone nella struttura ed è pari a 1.

Infine, t_z è il tempo in ore all'anno per cui le persone sono presenti nella zona considerata e vale $t_z = 1784$ [ore].

Dunque, la perdita tipica di vite umane dovuta all'elettrocuzione ($L_A = r_t \times L_T \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$) vale:

$$L_A = 1 \times 10^{-2} \times \left(\frac{3}{1}\right) \times \left(\frac{1784}{8760}\right) = 6,11 \times 10^{-3} \text{ [vittime]}$$

Il coefficiente di riduzione (r_p) dovuta a danno materiale dipendente dai provvedimenti atti a ridurre le conseguenze dell'incendio è uguale a 1, questo perché, sebbene la struttura abbia diversi dispositivi e misure antincendio, l'attività è considerata a rischio esplosione.

Il coefficiente di riduzione (r_f) dovuta a danno materiale dipendente dal rischio di incendio o dal rischio di esplosione della struttura vale $r_f = 1$, poiché le zone AtEx presenti sono considerate AtEx 0.

Si è considerato che non ci sono pericoli particolari all'interno dell'impianto; quindi, coefficiente di incremento della perdita dovuto al danno materiale nel caso sia presente un pericolo particolare (h_z) è stato valutato pari a 1.

L_F è il tipico numero medio di vittime per danno materiale e, poiché la struttura è a rischio esplosione, vale 10^{-2} .

Perciò, il valore delle perdite per danno materiale ($L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$) vale:

$$L_B = 1 \times 1 \times 1 \times 10^{-2} \times \left(\frac{3}{1}\right) \times \left(\frac{1784}{8760}\right) = 6,11 \times 10^{-3} \text{ [vittime]}$$

Dato che il tipico numero medio di vittime per guasto degli impianti interni (L_O) è uguale a 1, in quanto la struttura è a rischio di esplosione, il valore delle vittime per guasto degli impianti interni ($L_C = L_O \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$) è pari a:

$$L_C = 1 \times \left(\frac{3}{1}\right) \times \left(\frac{1784}{8760}\right) = 6,11 \times 10^{-3} \text{ [vittime]}$$

9.3.2.2 Perdita economica

Il coefficiente di riduzione dovuta a danno materiale dipendente dai provvedimenti atti a ridurre le conseguenze dell'incendio (r_p) è uguale a 1, questo perché, sebbene la struttura abbia diversi dispositivi e misure antincendio, l'attività è considerata a rischio esplosione.

Il coefficiente di riduzione dovuta a danno materiale dipendente dal rischio di incendio o dal rischio di esplosione della struttura (r_f) vale $r_f = 1$, poiché le zone AtEx presenti sono considerate AtEx 0.

L_F è il tipico valore medio relativo di tutti i beni danneggiati per danno materiale, e per strutture a rischio esplosione è pari a 1.

Dato che non c'è presenza di animali $c_a = 0$, il costo della struttura del digestore è di circa $c_b = 1125000$ [€], il costo del contenuto è di circa $c_c = 75000$ [€] e il costo degli impianti a servizio del digestore è di circa $c_s = 300000$ [€].

La perdita economica dovuta al danno materiale ($L_V = r_p \times r_f \times L_F \times (c_a + c_b + c_c + c_s)/c_t$) sarà, dunque, uguale a:

$$L_V = 1 \times 1 \times 1 \times \frac{(0 + 1125000 + 75000 + 300000)}{150000} = 1$$

Dato che il valore medio relativo di tutti i beni danneggiati per guasto degli impianti interni (L_O) è uguale a 10^{-1} , in quanto la struttura è a rischio di esplosione, il valore delle perdite economiche per guasto degli impianti interni ($L_W = L_O \times (c_s/c_t)$) è pari a:

$$L_2 = 10^{-1} \times \left(\frac{300000}{1500000} \right) = 0,02$$

9.3.3 Rischio fulmine

Il rischio che ci siano perdite di vite umane per elettrocuzione, per danno materiale o per guasto degli impianti interni è uguale in quanto $P_A = P_B = P_C = 1$, e $L_A = L_B = L_C = 6,11 \times 10^{-3}$; dunque:

$$R_{A,B,C} = N_D \times P_{A,B,C} \times L_{A,B,C} = 0,01508 \times 1 \times 6,11 \times 10^{-3} = 9,214 \times 10^{-5}$$

Dunque, vediamo che:

$$R_{A,B,C} = 9,214 \times 10^{-5} \approx 10^{-4} \geq 10^{-5} R_T$$

Quindi, il rischio di perdite di vite umane è maggiore del rischio considerato tollerabile.

Il rischio che ci siano perdite economiche dovute al danno materiale è uguale a:

$$R_V = N_D \times P_B \times L_V = 0,01508 \times 1 \times 1 = 0,01508$$

Il rischio che ci siano perdite economiche dovute al guasto degli impianti è pari a:

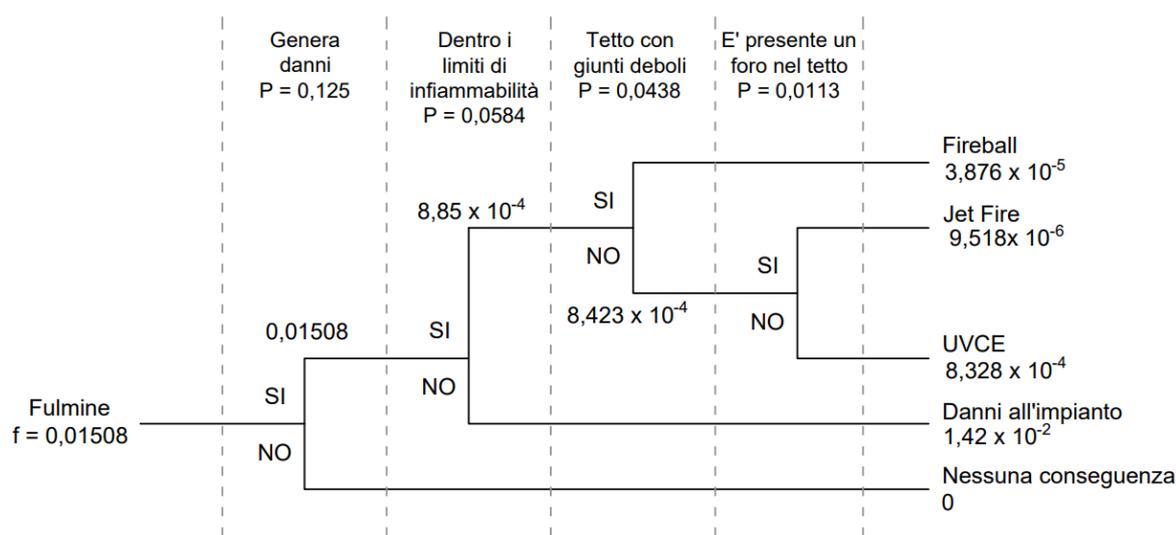
$$R_W = N_D \times P_C \times L_W = 0,01508 \times 1 \times 0,02 = 3,016 \times 10^{-4}$$

Anche il rischio di avere perdite economiche non è trascurabile poiché maggiore di 10^{-4} .

In funzione dei risultati ottenuti si ritiene ragionevole l'installazione di una o più misure di sicurezza contro le scariche atmosferiche, al fine di diminuire il rischio di avere vittime e di avere perdite economiche ingenti.

9.3.4 Event-Tree Analysis

Ora si procede con l'analisi quantitativa degli eventi conseguenti all'impatto di un fulmine sull'impianto senza protezioni utilizzando il metodo dell'Event Tree Analysis (ETA), precedentemente illustrato.



Dai risultati ottenuti è possibile osservare come l'evento finale con maggior frequenza di accadimento siano i danni all'impianto ($f = 1,42 \times 10^{-2}$ [eventi/anno]; $P = 94,15776\%$). Invece, l'evento con meno probabilità di accadimento è il Jet Fire ($f = 9,518 \times 10^{-6}$ [eventi/anno]; $P = 0,06311\%$). Al fine di rendere più rappresentative le probabilità di accadimento degli eventi finali sono state calcolate le probabilità totali i cui valori sono mostrati in Tabella 19.

Scenario finale	Frequenza [eventi/anno]	Probabilità [%]
Nessuna conseguenza	0	0
Danni all'impianto	$1,42 \times 10^{-2}$	94,15776
UVCE	$8,328 \times 10^{-4}$	5,52215
Jet Fire	$9,518 \times 10^{-6}$	0,06311
Fireball	$3,876 \times 10^{-5}$	0,25104

Tabella 19

9.4 Valutazione con protezioni

Si desidera ora evidenziare la differenza nel rischio associato all'uso di protezioni, seppur minime, contro le scariche atmosferiche. Il procedimento impiegato per il calcolo delle probabilità, dei danni e del rischio rimane invariato rispetto a quello utilizzato in precedenza.

9.4.1 Calcolo delle probabilità

Il numero di eventi pericolosi N_D causati da fulminazione diretta della struttura è:

$$N_D = 4 \times 3770 \times 1 \times 10^{-6} = 0,01508 \text{ [eventi/anno]}$$

Poiché sono assenti misure di protezione aggiuntive contro le tensioni di passo e di contatto ma è presente un sistema LPS di livello I, i valori di probabilità di danno agli esseri viventi (P_A) sono pari a:

$$P_A = 1 \times 0,2 = 0,2$$

Il valore della probabilità di danno alle strutture (P_B) dipende dal livello di protezione (LPL) con cui è progettato l'LPL che viene considerato di livello I, dunque:

$$P_B = 0,2$$

Dato che il sistema ha SPD di livello IV e la linea è interrata e schermata, la probabilità P_C che un fulmine su una struttura causi guasti negli impianti interni è pari a:

$$P_C = 0,05 \times 1 = 0,05$$

9.4.2 Valutazione delle perdite

Si vanno ora a calcolare i valori delle perdite di vite umane e di perdite economiche, seguendo il metodo precedentemente scritto.

9.4.2.1 Perdita di vite umane

I valori delle perdite di vite umane, nonostante l'integrazione delle protezioni, rimangono gli stessi calcolati precedentemente.

Dunque, la perdita tipica di vite umane dovuta all'elettrocuzione ($L_A = r_t \times L_T \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$) vale:

$$L_A = 1 \times 10^{-2} \times \left(\frac{3}{1}\right) \times \left(\frac{1784}{8760}\right) = 6,11 \times 10^{-3} \text{ [vittime]}$$

Il valore delle perdite per danno materiale ($L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$) vale:

$$L_B = 1 \times 1 \times 1 \times 10^{-2} \times \left(\frac{3}{1}\right) \times \left(\frac{1784}{8760}\right) = 6,11 \times 10^{-3} \text{ [vittime]}$$

E il valore delle vittime per guasto degli impianti interni ($L_C = L_O \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$) è pari a:

$$L_C = 1 \times \left(\frac{3}{1}\right) \times \left(\frac{1784}{8760}\right) = 6,11 \times 10^{-3} \text{ [vittime]}$$

9.4.2.2 Perdita economica

Anche valori delle perdite economiche, nonostante l'integrazione delle protezioni, rimangono gli stessi calcolati precedentemente.

La perdita economica dovuta al danno materiale ($L_V = r_p \times r_f \times L_F \times (c_a + c_b + c_c + c_s)/c_t$) sarà, dunque, uguale a:

$$L_V = 1 \times 1 \times 1 \times \frac{(0 + 1125000 + 75000 + 300000)}{150000} = 1$$

E il valore delle perdite economiche per guasto degli impianti interni ($L_C = L_O \times (c_s/c_t)$) è pari a:

$$L_2 = 10^{-1} \times \left(\frac{300000}{1500000}\right) = 0,02$$

9.4.3 Rischio fulmine

I rischi che ci siano perdite di vite umane per elettrocuzione, per danno materiale o per guasto degli impianti saranno uguali a:

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A = 0,01508 \times 0,2 \times 6,11 \times 10^{-3} = 1,843 \times 10^{-5}$$

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B = 0,01508 \times 0,2 \times 6,11 \times 10^{-3} = 1,843 \times 10^{-5}$$

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C = 0,01508 \times 0,05 \times 6,11 \times 10^{-3} = 4,607 \times 10^{-6}$$

Dunque, vediamo che:

$$R_{A,B} \approx 10^{-5} \geq 10^{-5} R_T$$

$$R_C = 4,607 \times 10^{-6} \geq 10^{-5} R_T$$

Quindi, il rischio di perdite di vite umane è minore o uguale al rischio considerato tollerabile.

Il rischio che ci siano perdite economiche dovute al danno materiale è uguale a:

$$R_V = N_D \times P_B \times L_V = 0,01508 \times 0,2 \times 1 = 3,016 \times 10^{-3}$$

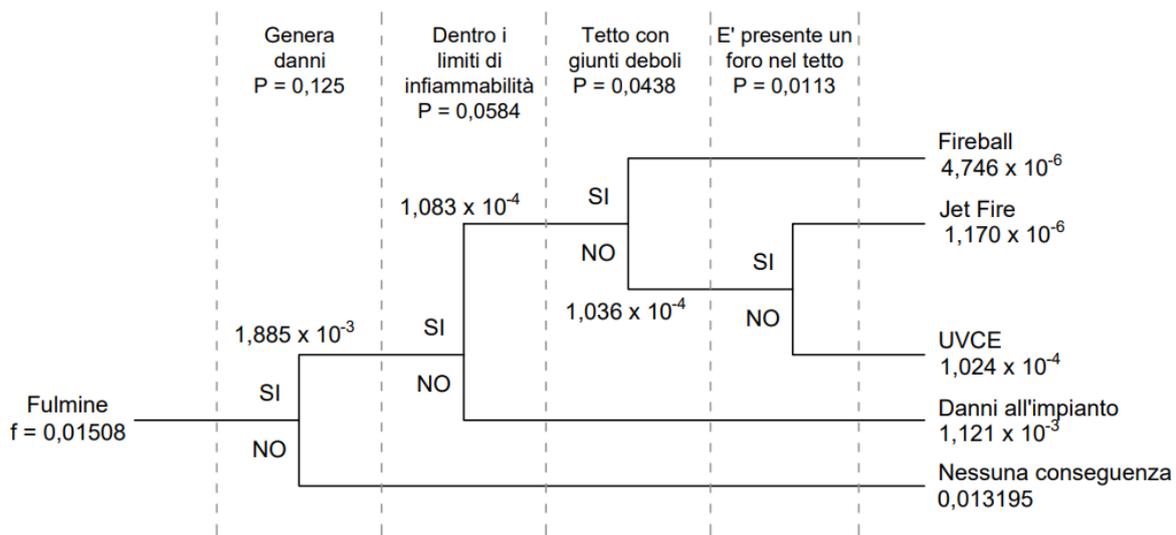
Il rischio che ci siano perdite economiche dovute al guasto degli impianti è pari a:

$$R_W = N_D \times P_C \times L_W = 0,01508 \times 0,05 \times 0,02 = 1,508 \times 10^{-5}$$

Vediamo come il rischio di avere perdite economiche dovute al danno materiale rimane ugualmente non è trascurabile, sebbene più vicino alla soglia di trascurabilità, mentre il rischio di avere perdite economiche dovute al guasto degli impianti diventa trascurabile.

9.4.4 Event-Tree Analysis

Ora si procede con l'analisi quantitativa degli eventi conseguenti all'impatto di un fulmine sull'impianto con delle protezioni utilizzando il metodo dell'Event Tree Analysis (ETA), precedentemente illustrato.



Dai risultati ottenuti è possibile osservare come l'evento finale con maggior frequenza di accadimento sia il non avere conseguenze ($f = 0,013195$; $P = 91,477\%$). Invece, l'evento con meno probabilità di accadimento è il Jet Fire ($f = 1,170 \times 10^{-6}$; $P = 0,008\%$). Al fine di rendere più rappresentative le probabilità di accadimento degli eventi finali, sono state calcolate le probabilità totali i cui valori sono indicati in Tabella 20.

Scenario finale	Frequenza [eventi/anno]	Probabilità [%]
Nessuna conseguenza	0,013195	91,47747
Danni all'impianto	$1,121 \times 10^{-3}$	8,31886
UVCE	$1,024 \times 10^{-4}$	0,70991
Jet Fire	$1,170 \times 10^{-6}$	0,00811
Fireball	$4,746 \times 10^{-6}$	0,03290

Tabella 20

9.5 Valutazione delle conseguenze

Andiamo ora a valutare le conseguenze di un ipotetico impatto di un fulmine con innesco del gas contenuto nel gasometro.

9.5.1 Fireball

Supponiamo che un fulmine impatti sul gasometro causando un Fireball, scaturito a causa dei giunti del tetto usurati e dalla creazione di una miscela infiammabile.

La massa (m) di metano, supposto puro, è di 90 chili e la frazione che viene irraggiata attraverso la superficie (R) vale $R = 0,4$.

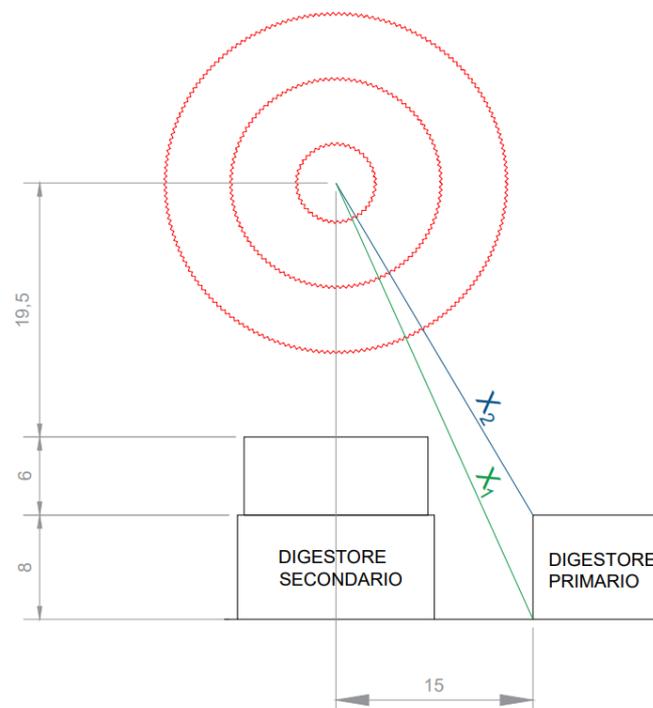
Possiamo ora calcolare il diametro massimo della Fireball, la durata dell'evento e l'altezza che raggiunge il centro della sfera di fuoco:

$$D_{max} = 5,8 \times m^{\frac{1}{3}} = 26 \text{ [m]}$$

$$t = 0,45 \times m^{\frac{1}{3}} = 2,02 \text{ [s]}$$

$$H = 0,75 \times D_{max} = 19,5 \text{ [m]}$$

Calcoliamo ora la potenza termica irraggiata, considerando come bersaglio un digestore primario e valutando l'irraggiamento sia alla base del digestore ($H = 0 \text{ [m]}$) e alla sommità del digestore ($H = 8 \text{ [m]}$).



Ottengo dunque:

$$x_1(H = 0) = \sqrt{33,5^2 + 15^2} = 36,7 [m] \quad x_2(H = 8) = \sqrt{25,5^2 + 15^2} = 29,6 [m]$$

Possiamo calcolare la trasmissività atmosferica usando la formula:

$$\tau_a = 2,02(P_w x)^{-0,09}$$

Ricaviamo così:

$$\tau_{a,1}(H = 0) = 0,753 \quad \tau_{a,2}(H = 8) = 0,767$$

Infine, calcoliamo la potenza termica irraggiata mediante la formula:

$$E_r = \frac{2,2\tau_a R H_C m^{\frac{2}{3}}}{4\pi x^2}$$

Otteniamo quindi:

$$E_{r,1} = 39,3 \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad E_{r,2} = 61,6 \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

9.5.2 Unconfined Vapour Cloud Explosion

Valutiamo ora gli effetti di un eventuale scoppio del gasometro, che potrebbe causare una Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE) a seguito dell'impatto di un fulmine su una miscela infiammabile presente al suo interno.

La massa (m) di metano contenuta dal gasometro è $m = 90 [kg]$ e il suo calore di combustione vale $H_C = 50000 [kJ/kg]$. Per le nubi di idrocarburi, come il metano, il fattore empirico di efficienza vale: $\mu = 0,05$.

Possiamo, dunque, ricavare la massa di tritolo equivalente partendo dalla formula:

$$m_{TNT} E_{TNT} = m \mu H_C$$

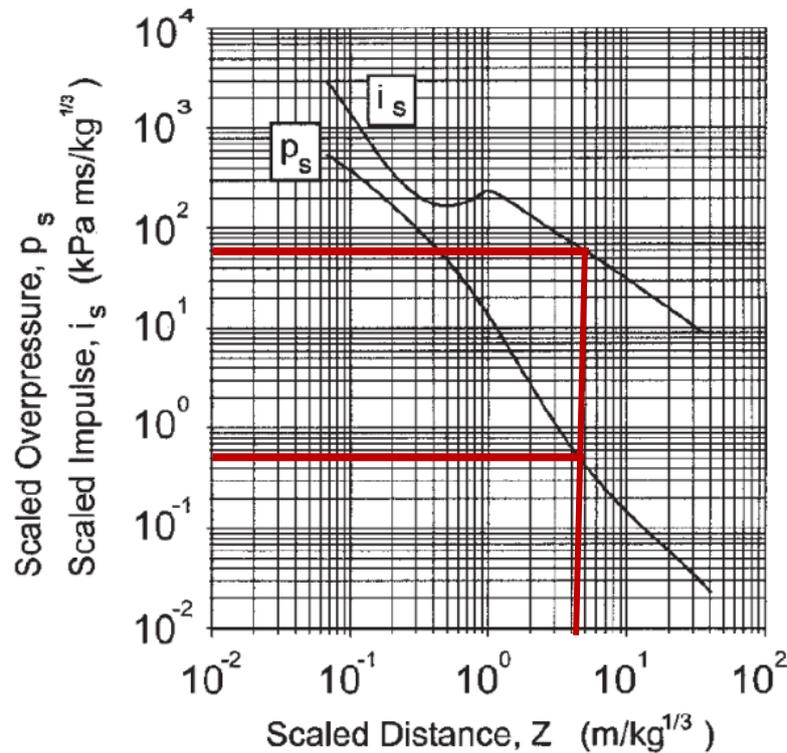
Quindi, ottengo:

$$m_{TNT} = \frac{m \mu H_C}{E_{TNT}} = 48,02 [kg]$$

Calcoliamo ora la distanza scalata:

$$Z = \frac{x}{\sqrt[3]{m_{TNT}}} = 4,12 \left[\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}} \right]$$

Utilizzando il grafico sottostante ricaviamo la sovrappressione scalata (p_s) e l'impulso scalato (i_s):



E ricaviamo:

$$p_s \approx 0,5 \qquad i_s \approx 60 \left[\frac{kPa \, ms}{kg^{1/3}} \right]$$

Possiamo ora ricavarci e valori del picco di sovrappressione relativa (p_o) e dell'impulso (i):

$$p_o = p_s \times p_{amb} = 50662 [Pa] = 50,662[kPa] \approx 0,5 [bar]$$

$$i = i_s \sqrt[3]{m_{TNT}} = 218,08 [kPa \, ms] \approx 2,18 [bar \, ms]$$

9.6 Effetto Domino

Analizziamo ora il potenziale effetto domino che potrebbe verificarsi nei vari scenari incidentali individuati attraverso l'Event-Tree Analysis (ETA).

Per effettuare questa valutazione, partiamo dalle frequenze degli eventi ottenute tramite l'ETA. Successivamente, queste frequenze vengono moltiplicate per le probabilità specificate nella Tabella 21, così da determinare non solo la frequenza con cui un effetto domino potrebbe verificarsi, ma anche la probabilità complessiva di tale avvenimento.

Effetto sorgente	Probabilità
Irraggiamento superiore a 37.5 kW/m ² con durata inferiore a 10 min o interessamento da Pool Fire con durata inferiore a 10 min (per obiettivi tipo serbatoi e apparecchiature)	0
Irraggiamento superiore a 37.5 kW/m ² con durata superiore a 10 min o interessamento da Pool Fire con durata superiore a 10 min (per obiettivi tipo serbatoi e apparecchiature)	1
Sovrapressione tra 0,3 e 0,6 bar (per obiettivo serbatoi e apparecchiature)	0,7
Sovrapressione superiore 0,6 bar (per obiettivo serbatoi e apparecchiature)	1

Tabella 21

Utilizzando questi valori notiamo che:

- Nel caso dell'impianto privo di protezioni, il Fireball ha una probabilità dello 0% di causare un effetto domino, analogamente a quanto avviene con le protezioni. Questo è dovuto alla breve durata dell'evento, che è di soli 2 secondi.
- Lo scoppio del gasometro, se si considera il picco di sovrappressione relativo, ha una probabilità del 70% di causare un effetto domino, poiché la sovrappressione è di circa 0,5 bar. La frequenza di accadimento di questo effetto se non sono presenti protezioni è di $5,8296 \times 10^{-4}$ [eventi/anno], invece se sono presenti le protezioni è di $7,168 \times 10^{-5}$ [eventi/anno].

10 Conclusioni

Il lavoro di tesi si è focalizzato sulla valutazione del rischio di un impianto di biogas andando a sono stati identificare i principali rischi, come esplosioni e incendi, e analizzare le cause di tali incidenti. L'analisi ha evidenziato le problematiche più comuni e significative, fornendo un quadro utile per migliorare la sicurezza operativa degli impianti. È stata condotta un'analisi dettagliata dei rischi identificati utilizzando metodologie quali l'analisi HazOp, la Fault-Tree Analysis e l'Event-Tree Analysis, che hanno permesso di valutare sistematicamente i potenziali scenari incidentali e le loro probabilità di accadimento. Successivamente, è stata effettuata una valutazione quantitativa degli scenari, evidenziando le potenziali conseguenze di eventi critici, come il Jet-Fire. Infine, sono stati affrontati specificamente gli eventi NaTech, analizzando come fenomeni naturali, come i fulmini, possano interagire con le tecnologie degli impianti di biogas. È stata presentata una valutazione del rischio associato a tali eventi, con un focus sulle misure di protezione da implementare per ridurre i danni potenziali. L'analisi ha incluso scenari sia con che senza protezioni, evidenziando l'importanza di un'adeguata progettazione e gestione del rischio.

In conclusione, si vuole ora mettere a confronto i dati ritenuti più rilevanti. In Tabella 22 sono riportate le probabilità di accadimento degli eventi più probabili.

Ipotesi	Evento	Frequenza di accadimento
Rilascio di liquame	Dispersione tossica	$f = 8,524 \times 10^{-5}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto senza protezioni	Danni all'impianto	$f = 1,42 \times 10^{-2}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto con protezioni	Nessun danno	$f = 1,32 \times 10^{-2}$ [eventi/anno]

Tabella 22 Probabilità di accadimento

Mentre gli scenari incidentali studiati quantitativamente hanno frequenze di accadimento pari a quelle indicate in Tabella 23.

Ipotesi	Evento	Frequenza di accadimento
Rilascio di gas	Jet Fire	$f = 2,050 \times 10^{-7}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto senza protezioni	Fireball	$f = 3,876 \times 10^{-7}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto senza protezioni	UVCE	$f = 8,328 \times 10^{-4}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto con protezioni	Fireball	$f = 4,746 \times 10^{-6}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto con protezioni	UVCE	$f = 1,024 \times 10^{-4}$ [eventi/anno]

Tabella 23 Frequenze di accadimento

Alcuni di questi hanno la probabilità di causare un effetto domino, con una frequenza di accadimento come da Tabella 24.

Ipotesi	Evento	Frequenza di accadimento dell'effetto domino
Rilascio di gas (Hp: foro D = 3 cm)	Jet Fire	$f = 1,025 \times 10^{-7}$ [eventi/anno]
Rilascio di gas (Hp: foro D = 10 cm)	Jet Fire	$f = 0$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto senza protezioni	Fireball	$f = 0$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto senza protezioni	UVCE	$f = 5,830 \times 10^{-4}$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto con protezioni	Fireball	$f = 0$ [eventi/anno]
Fulmine su impianto con protezioni	UVCE	$f = 7,168 \times 10^{-5}$ [eventi/anno]

Tabella 24 Frequenza dell'effetto domino

In base a questi dati, possiamo osservare che gli incidenti causati dall'impatto di fulmini sono più probabili e, come dimostrato dagli studi quantitativi precedenti, anche più rilevanti rispetto a quelli legati a carenze di sicurezza nel funzionamento dell'impianto qualora non siano presenti adeguate protezioni. Inoltre, è maggiormente probabile avere l'effetto domino a seguito di un impatto di un fulmine piuttosto che a causa di mancanze di sicurezza dell'impianto stesso.

Per questo motivo è cruciale che il rischio NaTech venga attentamente valutato durante la fase di progettazione degli impianti. Tale valutazione risulta particolarmente importante nell'attuale contesto di crescente imprevedibilità delle condizioni meteorologiche e dell'aumento della frequenza delle tempeste di fulmini.

Sebbene i rischi dovuti alle carenze di sicurezza nel funzionamento dell'impianto siano bassi, non possono comunque essere trascurati. L'armonizzazione delle normative europee, come la Direttiva Seveso III, e l'adozione di standard internazionali di sicurezza possono contribuire a elevare il livello di sicurezza degli impianti di biogas.

Sulla base del lavoro condotto si consiglia di effettuare degli studi approfonditi in fase di progettazione sul rischio di incidente rilevante comportato dall'impianto, così da ridurre la probabilità di accadimento di incidenti, e di implementare le protezioni contro le scariche atmosferiche gli impianti che ne sono sprovvisti in quanto la perdita probabile è maggiore della spesa per l'integrazione di queste.

11 Bibliografia – Sitografia

Bigliografia

Boscolo M, Bregant L, Miani S, Padoano E, Piller M. *An enquiry into the causes of an explosion accident occurred in a biogas plant*, in “Process Safety Progress” a. MMXX, n. **39**, 30 Maggio 2019

Petr Travníček, Lubos Kotek, Petr Junga, Tomas Víteza, Karel Drapelac, Jan Chovanec *Quantitative analyses of biogas plant accidents in Europe*, in “Renewable Energy” a. MMXVIII, n. **122**,1 Febbraio 2018

Luboš Kotek, Petr Travníček, Petr Blech *Accident Analysis of European Biogas Stations* in “Chemical Engineering Transaction” a. MMXV, n. **43**, 20 Maggio 2015

Sven-Erik Enno, Jacqueline Sugier, Regina Alber, Mark Seltzer *Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data*, in “Atmospheric Research” a. MMXX, n. **235**, 20 Novembre 2019

Valeria Casson Moreno, Salvatore Papisidero, Giordano Emrys Scarponi, Daniele Guglielmi, Valerio Cozzani *Analysis of accidents in biogas production and upgrading*, in “Renewable Energy” a. MMXVI, n. **96**, 21 Ottobre 2015

Ahmad Soltanzadeh, Mohsen Mahdinia, Hamedeh Golmohammadpour, Reza Pourbabaki, Mostafa Mohammad-Ghasemi & Mohsen Sadeghi-Yarandi *Evaluating the potential severity of biogas toxic release, fire and explosion: consequence modeling of biogas dispersion in a large urban treatment plant*, in “International Journal of Occupational Safety and Ergonomics” a. MMXXII, n. **29**, 11 Marzo 2022

Amos Necci, Giacomo Antonioni, Sarah Bonvicini, Valerio Cozzani *Quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning*, in “Reliability Engineering and System Safety” a. MMXVI, n. **154**, 20 Maggio 2016.

Giordano Emrys Scarponi, Daniele Guglielmi, Valeria Casson Moreno, Valerio Cozzani *Risk Assessment of a Biogas Production and Upgrading Plant*, in “Chemical Engineering Transaction” a. MMXV, n. **43**, 20 Maggio 2015

Giovanni Luca Amicucci Fabio Fiamingo Maria Teresa Settino *Impianti di protezione contro le scariche atmosferiche, Valutazione del rischio e verifiche*, in “Inail” a. MMXVI, ISBN 978-88-7484-514-9

Sergio Bellagamba, Paolo Angelo Bragatto, Paolo De Santis, Luciano Di Donato, Adolfo Faletra, Liliana Frusteri, Roberto Lauri, Sergio Malinconico, Francesco Marra, Biancamaria Pietrangeli, Annalisa Pirone, Angelica Schneider Graziosi, Maria Rosaria Vallerotonda, Marcella Battaglia, Roberto Bonfiglio, Michelangelo Borino, Michele Castore, Roberta Lala, Michele Mazzaro, Ivan Procaccini *RISCHIO INCENDIO ED ESPLOSIONE IN AGRICOLTURA Prevenzione e procedure di emergenza* in “INAIL” a. MMXX, ISBN 978-88-7484-656-6

Linea guida: Metodologie per l'elaborazione dell'analisi dei rischi di incidente rilevante, a. MMXVII

Riccardo Campagna, Carlo Coletta, Massimo Crespi, Alberto De Gaetano, Filippo Emanuelli, Stefano Ferri, Marco Finco, Sergio Ginocchietti, Marco Valle *White Paper: L'assicurazione delle calamità naturali e delle pandemie* in “Cineas” a MMXXIII

Sitografia

www.thefpa.co.uk

www.emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search ID **001210**, ID **001262**, ID **001322**

www.aria.developpement-durable.gouv.fr

www.onlinelibrary.wiley.com

www.sciencedirect.com

www.researchgate.net