



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in ingegneria elettrica

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea luglio 2026

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Valutazione dinamica del rischio legato ai fulmini per i lavoratori

Relatori:

Prof. Enrico Pons

Prof. Pietro Colella

Candidato:

Emanuele Candela

Ringraziamenti

Ringrazio il professor Pons e il professor Colella per avermi seguito nello sviluppo di questo lavoro di tesi.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che mi ha sostenuto lungo tutto il percorso universitario e non solo. In particolare, ci tengo a ringraziare mia mamma che mi ha sempre permesso di seguire i miei sogni.

Grazie a Diletta, per aver creduto in me anche quando io stesso facevo fatica a farlo e per avermi sostenuto con il suo amore, la sua pazienza e la sua dolcezza.

Grazie a tutti i compagni di corso, con cui ho condiviso tante ore sui banchi e momenti che porterò sempre con me.

Infine, grazie a tutti gli amici che durante tutto questo percorso sono stati la mia valvola di sfogo e che anche nei momenti più complicati sono sempre riusciti a strapparmi un sorriso.

Indice

Introduzione	4
1. Fenomenologia dei fulmini	6
1.1 Generalità del fulmine	6
1.2 Meccanismo di formazione del fulmine	7
1.3 Forme d'onda tipiche.....	11
1.4 Sovratensioni atmosferiche	14
2. La norma CEI EN 62305	16
2.1 Introduzione alla norma	16
2.1.1 CEI EN 62305-1 – Principi generali	16
2.1.2 CEI EN 62305-2 – Valutazione del rischio	16
2.1.3 CEI EN 62305-3 – Protezione delle strutture e delle persone.....	17
2.1.4 CEI EN 62305-4 – Protezione degli impianti elettrici ed elettronici ...	18
2.2 Sezione 2 della norma CEI 62305.....	18
2.2.1 Definizione dei termini utili per la classificazione del rischio	19
2.3 Valutazione del rischio.....	22
2.4 Componenti di rischio.....	25
2.4.1 Componente di rischio R_A	25
2.4.2 Componente di rischio R_B	25
2.4.3 Componente di rischio R_C	26
2.4.4 Componente di rischio R_M	27
2.4.5 Componente di rischio R_U	27
2.4.6 Componente di rischio R_V	28
2.4.7 Componente di rischio R_W	28
2.4.8 Componente di rischio R_Z	29

2.5	Determinazione del rischio di perdita di vite umane (R_1)	30
2.6	Esito della valutazione	31
3.	Modelli dinamici per la determinazione del rischio.....	32
3.1	Introduzione ai modelli.....	32
3.2	Modelli analizzati.....	35
3.2.1	Metodo LISHAE	35
3.2.2	Metodo NN	37
3.2.3	Metodo SET	38
3.3	Confronto tra i modelli analizzati.....	40
3.4	Sistema di allerta in base alla posizione dei fulmini caduti.....	43
4.	Modello dinamico utilizzato	44
4.1	Introduzione al modello utilizzato	44
4.2	Modello di regressione logistica multipla	44
4.2.1	Spiegazione matematica del modello	45
4.3	Variabili per il modello	47
4.3.1	Precipitazione al suolo in un'ora di tempo (SRI)	47
4.3.2	Riflettività meteorologica (VMI).....	48
4.3.3	Posizione degli ultimi fulmini caduti	50
4.4	Modello applicato al caso studio	51
4.4.1	Equazione del modello.....	51
4.4.2	Definizione dei parametri β	51
4.4.3	Indice di Poisson	53
4.4.4	Numero di fulmini attesi nei 15 minuti.....	53
4.5	Calcolo dei numeri di eventi pericolosi.....	54
4.5.1	Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_D).....	54
4.5.2	Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_M)	55
4.5.3	Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_{DJ}).....	56
4.5.4	Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_L)	56
4.5.5	Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_I).....	57

Indice

4.6 Calcolo delle probabilità di danno.....	57
4.6.1 Calcolo della probabilità di danno (P_A)	58
4.6.2 Calcolo della probabilità di danno (P_B)	58
4.6.3 Calcolo della probabilità di danno (P_C)	59
4.6.4 Calcolo della probabilità di danno (P_M).....	60
4.6.5 Calcolo della probabilità di danno (P_U)	60
4.6.6 Calcolo della probabilità di danno (P_V)	61
4.6.7 Calcolo della probabilità di danno (P_W).....	62
4.6.8 Calcolo della probabilità di danno (P_Z).....	62
4.7 Rischio tollerabile sui 15 minuti (R_{T15}).....	63
5. Codice Python per il calcolo del rischio	65
5.1 Analisi codice Python.....	65
5.1.1 Parte 1: Scaricamento dati radar	65
5.1.2 Parte 2: Scaricamento dati fulminazione	67
5.1.3 Parte 3: Conversione dei dati SRI e VMI	67
5.1.4 Parte 4: Conversione dei dati di fulminazione.....	68
5.1.5 Parte 5: Valutazione del rischio	70
6. Risultati	74
6.2 Esempi di calcolo	74
6.1.1 Esempio di calcolo del rischio annuo	77
6.1.2 Esempio di calcolo del rischio dinamico (valido su 15 minuti)	79
6.2 Analisi dei risultati del codice Python.....	83
6.2.1 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Monza.....	84
6.2.2 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Brescia.....	87
6.2.3 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Venezia.....	90
6.2.4 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Bologna	93
7. Considerazioni finali	97
8. Bibliografia	100

Introduzione

Questa tesi è parte di un progetto legato alla sicurezza per i lavoratori sul quale il Politecnico di Torino sta lavorando su commissione dell'INAIL.

L'obiettivo di questa tesi è il calcolo del rischio fulmini dinamico per gli esseri umani, e l'invio di un messaggio di allerta nel caso quest'ultimo risulti essere superiore al valore di rischio tollerabile. L'attenzione è rivolta in particolare ai lavoratori la cui mansione risulta essere pericolosa nel caso in cui si abbia la formazione di fulmini.

In Italia la norma che si occupa di delineare il processo di calcolo del rischio fulmini, che definisce tutte le componenti di rischio fulmine e che mette a disposizione il valore di rischio tollerabile per la perdita di vite umane ($R_T = 10^{-5}$), utile per determinare se si è in presenza di una situazione di rischio o meno, è la CEI EN 62305. Secondo tale norma il rischio fulmini per gli esseri umani deve essere calcolato come somma di più componenti. Queste componenti sono rispettivamente il risultato del prodotto tra il valore della frequenza di fulminazione (N), probabilità di danno (P) e la perdita (L). Questo procedimento non è coerente con la volontà di creare un modello dinamico di calcolo del rischio fulmini, in quanto le variabili descritte precedentemente sono definite fisse o variano di anno in anno come ad esempio la frequenza di danno, che dipende dal numero di fulmini per km^2 all'anno.

Per il calcolo del rischio fulmini dinamico è stato utilizzato un modello di regressione logistica multipla che utilizza come dati in ingresso variabili meteorologiche che mutano nel tempo. Per questo modello sono state utilizzate tre variabili in ingresso:

- Stima della quantità di pioggia che cade al suolo in millimetri all'ora (SRI);
- Misura della riflettività meteorologica (VMI);
- Posizione degli ultimi fulmini caduti.

Tramite l'equazione di questo modello è stato possibile calcolare la probabilità di caduta fulmini in un km^2 . Il passo successivo è stato quello di ricollegarsi alla norma attraverso il calcolo del numero di fulmini per km^2 in quindici minuti (N_{g15}). Successivamente è stato fatto il calcolo delle varie componenti di rischio utili per la determinazione del rischio fulmini per la perdita di vite umane. Questo rischio dinamico calcolato, con tempo di validità di quindici minuti (R_{15}), è stato

confrontato con il rischio tollerabile definito come il valore che la norma propone a livello annuale, riportato ad un valore valido su quindici minuti.

È stato creato un codice Python in grado di fare questo processo in modo automatico e continuativo, eseguendo i processi di calcolo prima descritti utilizzando gli ultimi dati disponibili allo scaricamento sulla Piattaforma Radar del Dipartimento della Protezione Civile e sul sito EUMETSAT. Inserendo le coordinate della posizione in cui si trova il lavoratore da allertare in caso di rischio troppo elevato, il codice calcola il rischio a cui la persona è sottoposta ogni quindici minuti, e nel caso questo sia superiore alla soglia tollerata, invia un messaggio di allerta.

Con questo progetto di tesi si è cercato di fare un passo oltre ciò che è definito all'interno della norma CEI EN 62305, slegandosi da un rischio definito su base annua, utilizzando un modello che integra variabili che cambiano nel tempo in base allo stato di instabilità dell'atmosfera.

Capitolo 1

1. Fenomenologia dei fulmini

1.1 Generalità del fulmine

Il fulmine è una scarica elettrica di elevata intensità che si sviluppa all'interno delle nubi temporalesche, tra nubi differenti oppure tra nube e suolo. Tale fenomeno rappresenta una delle principali manifestazioni dell'elettricità atmosferica e può causare danni alle persone, alle strutture e agli impianti tecnologici.

Nonostante la sua apparente occasionalità, l'attività elettrica atmosferica è estremamente diffusa su scala globale. Secondo le stime riportate in letteratura, sulla Terra si verificano mediamente circa 100 fulmini al secondo, corrispondenti a oltre 3 miliardi di scariche ogni anno. La distribuzione dei fulmini non è uniforme, ma dipende dalle condizioni climatiche e meteorologiche delle diverse aree geografiche.

Negli ultimi decenni numerosi studi hanno evidenziato una possibile correlazione tra il cambiamento climatico e l'incremento della frequenza delle scariche atmosferiche. In particolare, Price e Rind hanno osservato che un aumento della temperatura media globale può determinare una maggiore attività temporalesca e, di conseguenza, un incremento del numero di fulmini [1]. Studi più recenti hanno inoltre stimato che, in alcuni scenari climatici, la frequenza delle scariche potrebbe aumentare di circa il 12% per ogni incremento di 1 °C della temperatura media globale [2].

La crescente diffusione di apparecchiature elettroniche sensibili e la possibile intensificazione dell'attività elettrica atmosferica rendono sempre più importante l'adozione di adeguate misure di protezione contro gli effetti diretti e indiretti dei fulmini.

1.2 Meccanismo di formazione del fulmine

Per parlare di come avviene la formazione del fulmine, è necessario analizzare il contesto atmosferico in cui esso si sviluppa, ovvero il temporale. La formazione di un temporale è legata a una combinazione di condizioni atmosferiche che favoriscono lo sviluppo di nubi intense e instabili, chiamate cumulonembi. Esistono diversi tipi di temporale:

- *Temporale di calore*

Sono i più comuni in estate. Si formano quando il sole riscalda intensamente il suolo durante il giorno. Nello specifico, l'aria vicino al terreno diventa più leggera e sale. Salendo si raffredda e forma nubi temporalesche. Questi temporali solitamente si sviluppano nel pomeriggio e si esauriscono rapidamente.

- *Temporale orografico*

Questi temporali sono legati alla presenza di rilievi. L'aria umida viene forzata a salire lungo i versanti. Salendo si raffredda e condensa formando nubi. Rispetto ai temporali di calore possono essere più persistenti.

- *Temporale frontale*

Questi temporali sono associati al passaggio di un fronte meteorologico, cioè alla zona di contatto tra masse d'aria diverse. Possono verificarsi due situazioni differenti. Nel caso di un fronte freddo, l'aria fredda spinge verso l'alto quella calda dando origine a temporali intensi e spesso violenti. In presenza invece di un fronte caldo, l'aria calda scivola sopra quella fredda, questi sono i fenomeni generalmente più diffusi ma meno violenti.

I fulmini sono scariche elettriche di origine atmosferica che si sviluppano tipicamente in associazione ai fenomeni temporaleschi. In base alla direzione di propagazione del canale di scarica, è possibile distinguere due principali categorie. Da un lato si hanno i fulmini discendenti, che si originano all'interno della nube e si propagano verso la superficie terrestre; dall'altro si riscontrano i fulmini ascendenti, che invece prendono avvio da strutture presenti al suolo e si sviluppano verso l'alto, fino a collegarsi con il canale proveniente dalla nube.

I fulmini ascendenti sono fenomeni che si manifestano principalmente in presenza di strutture particolarmente elevate e snelle, tipicamente con altezze superiori a circa 80 m. Al contrario, edifici di dimensioni ordinarie, come ad esempio stazioni

elettriche o infrastrutture industriali, risultano generalmente interessati quasi esclusivamente da scariche di tipo discendente.

Il processo di fulminazione, con riferimento al caso di scarica nube-suolo, può essere descritto attraverso una successione di fasi fisiche distinte che coinvolgono l'interazione tra la nube temporalesca e il terreno.

La prima fase riguarda la formazione del canale di scarica all'interno della nube. In condizioni di forte intensificazione del campo elettrico nella regione inferiore del cumulonembo e in presenza di aria rarefatta, si innescano processi di ionizzazione che danno origine a un canale conduttivo. Questo canale, costituito da plasma altamente ionizzato, si sviluppa progressivamente verso il suolo seguendo un andamento non lineare e fortemente ramificato. La propagazione avviene per tratti successivi, con una tipica struttura "a scatti" che determina il caratteristico percorso a zig-zag osservabile nella *Figura 1.1(a)*. Il canale presenta un nucleo conduttivo di dimensioni dell'ordine del centimetro ed è circondato da una regione di carica spaziale generata dall'effetto corona. L'avanzamento prosegue fino a quando il campo elettrico locale non scende al di sotto della rigidità dielettrica dell'aria, con successive riprese del processo dovute al continuo rinnovarsi delle condizioni elettriche favorevoli. Le velocità di propagazione risultano estremamente elevate, mentre le correnti associate al trasporto di carica raggiungono tipicamente valori dell'ordine delle centinaia di ampere.

Quando il fronte della scarica si avvicina al suolo, generalmente a distanze comprese tra 10 e 100 m, l'intensità del campo elettrico diventa sufficiente a generare fenomeni di ionizzazione anche sulle superfici terrestri o sulle strutture emergenti. In questa fase si sviluppa un canale ascendente, detto controscarica, che si propaga dal suolo verso l'alto con l'obiettivo di intercettare il canale discendente proveniente dalla nube, come descritto nella *Figura 1.1(b)*. Il contatto tra i due canali determina la chiusura del percorso conduttivo tra nube e terra e segna l'inizio della fase finale del fenomeno. In questo momento avviene una rapida neutralizzazione delle cariche accumulate lungo il canale principale, con flusso di cariche di segno opposto provenienti dal suolo verso la nube. La corrente che si instaura nel canale prende il nome di corrente di fulmine e può assumere valori estremamente elevati. Contestualmente si sviluppa la cosiddetta scarica di ritorno, che si propaga verso l'alto lungo il canale ionizzato con velocità pari a una frazione significativa di quella della luce. Questa fase è quella che produce la luminosità più intensa del fenomeno ed evidenzia le ramificazioni del canale (*Figura 1.1(c)(d)*). L'intensità della corrente risulta generalmente molto superiore rispetto alla fase di avanzamento della scarica, potendo raggiungere valori dell'ordine delle centinaia di migliaia di ampere.

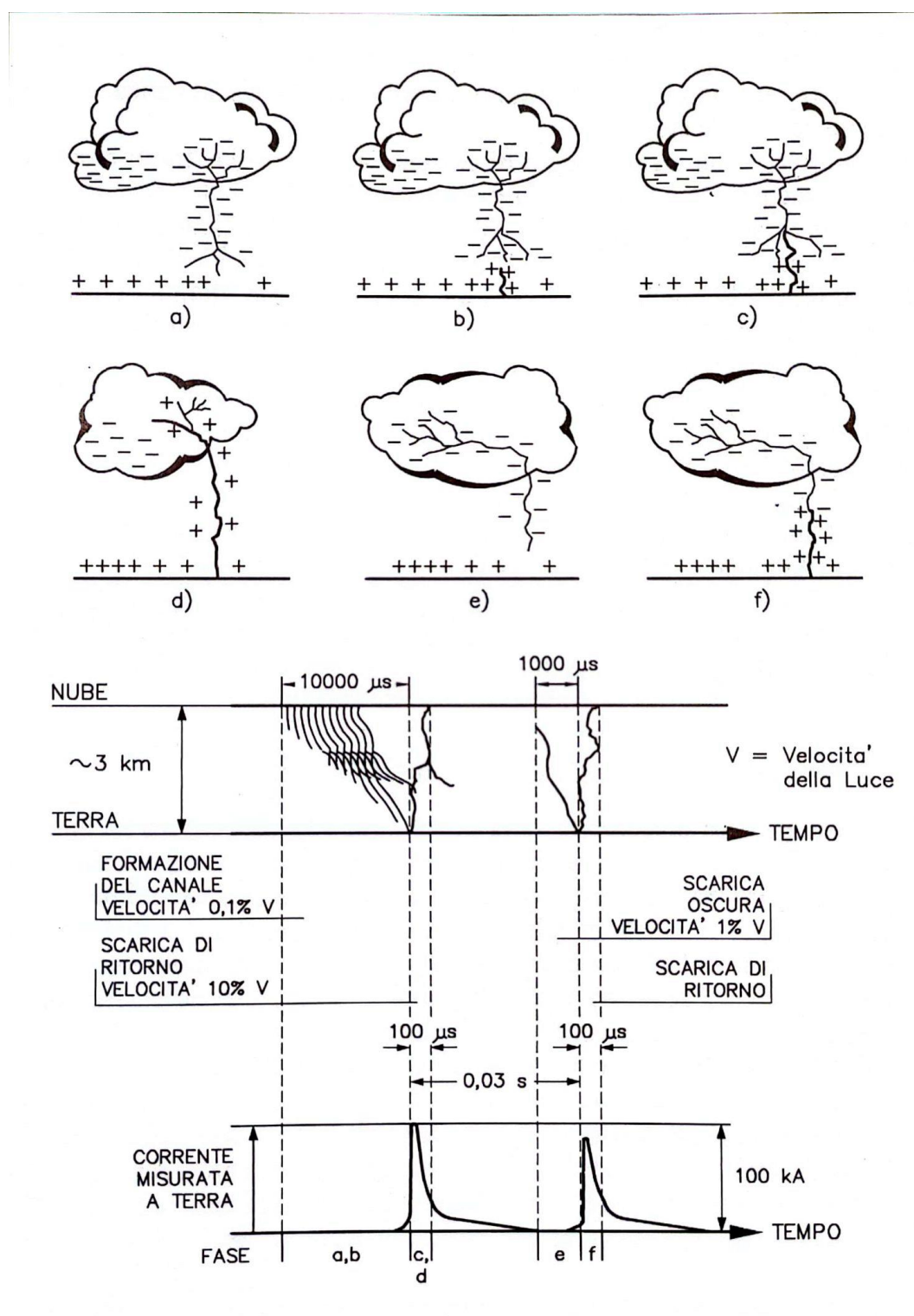


Figura 1.1: Le fasi della scarica del fulmine discendente [3]

Un'ulteriore modalità di classificazione dei fulmini si basa sulla loro polarità, come illustrato in *Figura 1.2*. Con tale termine si intende il segno della carica elettrica prevalente nella regione della nube coinvolta nello scambio di carica con il suolo o con altre parti dell'atmosfera. Adottando questa definizione, si osserva che la maggior parte degli eventi di fulminazione, circa il 90%, è associata a scariche di polarità negativa. Una differenza significativa tra fulmini positivi e negativi riguarda la loro struttura temporale: le scariche di polarità negativa sono frequentemente composte da più impulsi successivi lungo lo stesso canale, mentre quelle di polarità positiva si presentano in genere come eventi singoli.

Tale comportamento è legato alla distribuzione delle cariche all'interno della nube temporalesca: le regioni a carica positiva si trovano prevalentemente nelle parti superiori, rendendo il percorso della scarica positiva più esteso. Di conseguenza, il canale di propagazione risulta più lungo e il processo di neutralizzazione richiede tempi maggiori. Questo comporta una maggiore probabilità che le porzioni più vecchie del canale subiscano raffreddamento e perdita di ionizzazione, interrompendo così le condizioni necessarie per successive riattivazioni della scarica [3].

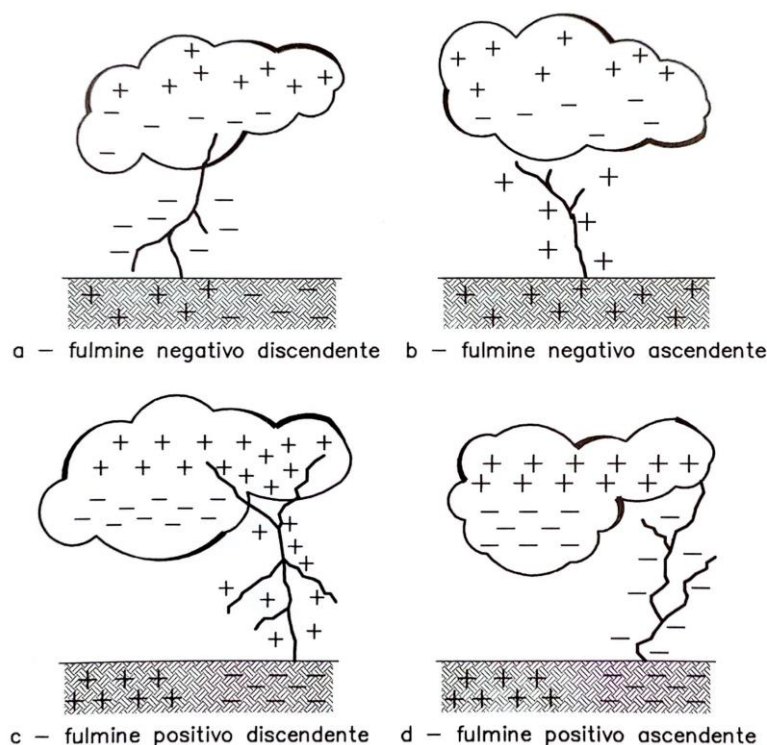


Figura 1.2: Tipi di fulmine [4]

1.3 Forme d'onda tipiche

Per capire l'effetto distruttivo di un fulmine, in termini di effetti fisici, viene valutata la forma d'onda di tale fulmine. A tal proposito la norma CEI EN 62305 definisce quelle che sono le principali forme d'onda che un fulmine può assumere. Considerando l'andamento della corrente che caratterizza un fulmine, viene fatta una distinzione di questo tipo:

Corrente ad impulso

La corrente ad impulso è la parte più caratteristica e distruttiva della scarica di fulmine. Dal punto di vista fisico è una corrente impulsiva ad altissima intensità che cresce in tempi estremamente brevi e poi decade rapidamente, come si vede dalla *Figura 1.3*. La normativa per tale corrente definisce una forma d'onda caratterizzata da un impulso di corrente con fronte ripido ($0.5 - 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$), una durata relativamente breve ($100 - 1000 \mu\text{s}$) e ampiezza dell'ordine di $2 - 200 \text{ kA}$.

La sua importanza deriva non solo dal valore della corrente, ma soprattutto dalla rapidità con cui varia nel tempo.

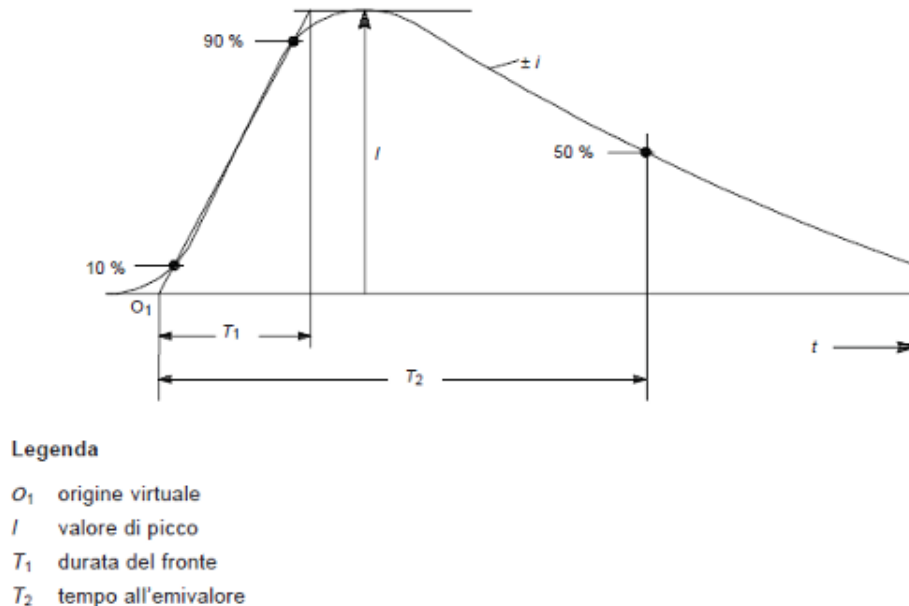


Figura 1.3: Definizione dei parametri di un impulso (tipicamente $T_2 < 2 \text{ ms}$) [5]

Per la corrente a impulso i rischi maggiori sono dovuti a formazione di sovratensioni, forti campi elettromagnetici, sollecitazioni elettrodinamiche, archi e perforazione degli isolanti.

Corrente continuativa

La corrente continuativa del fulmine è una componente molto diversa dalla corrente impulsiva, sia come fenomeno fisico sia come effetti prodotti. Se la corrente impulsiva è dominata dalla rapidità e dai fenomeni elettromagnetici, la corrente continuativa è dominata soprattutto dal trasferimento di energia nel tempo, come si può notare dalla *Figura 1.4*. La norma CEI EN 62305 definisce la corrente continuativa come una corrente con andamento irregolarmente piatto con almeno alcuni millisecondi (ms) di durata, potrebbe seguire un impulso di corrente oppure formarsi con un lento incremento di corrente e durare fino a qualche decimo di secondo. Questa corrente generalmente ha un'ampiezza di 10 – 500 A, può arrivare fino a qualche kA per i fulmini negativi e a qualche decina di kA per i fulmini positivi (questa tipologia di fulmini però è molto rara).

L'effetto della corrente continuativa è spesso meno “spettacolare” nei valori di picco, ma può essere estremamente pericolosa per gli effetti termici.

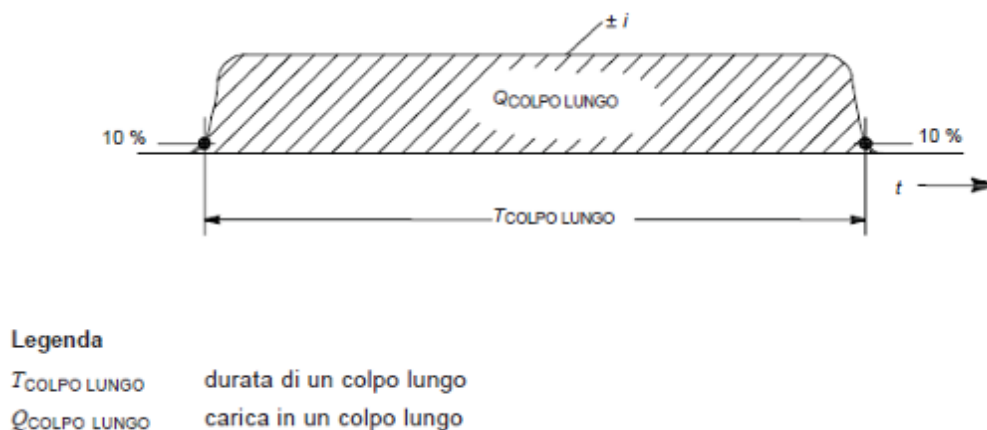


Figura 1.4: Definizione dei parametri di un colpo lungo
(tipicamente $2\ ms < T_{COLPO\ LUNGO} < 1\ s$) [5]

Per la corrente continuativa i rischi maggiori sono dovuti agli effetti termici che possono portare ad un semplice riscaldamento, o in casi più estremi anche a fusione di componenti fisici o addirittura a incendi.

La corrente continuativa è importante anche se “piccola” in termini di ampiezza perchè l’energia è anche funzione del tempo.

La potenza Joule dissipata è:

$$P = R * I^2$$

E l’energia totale dipende dalla durata:

$$W = \int R I^2 dt$$

Quindi una corrente più piccola ma lunga può trasferire moltissima energia termica.

La scarica di un fulmine libera in un intervallo di tempo estremamente ridotto una quantità di energia molto elevata (fino a valori dell’ordine di 15000 kJ/Ω), capace di provocare effetti devastanti sugli esseri viventi, inclusi casi di lesioni gravi o decessi, oltre a determinare danni significativi alle strutture e agli impianti interni, con conseguenti ripercussioni anche di tipo economico [4][6]. Non esistono tecnologie in grado di intervenire sui processi meteorologici fino al punto di impedire la formazione dei fulmini; tuttavia, è possibile ridurre il livello di rischio mediante l’adozione di adeguati sistemi e misure di protezione contro le scariche atmosferiche.

In questo studio l’obiettivo è calcolare il rischio fulmini per i lavoratori, a partire da una probabilità di caduta fulmini dinamica calcolata sulla base di un modello che al suo interno considera alcune delle principali variabili meteorologiche dal cui valore dipende la formazione di fulmini.

1.4 Sovratensioni atmosferiche

Le fulminazioni possono essere:

- Dirette, quando colpiscono direttamente un componente dell'impianto. Sono quelle più pericolose e possono provocare correnti di fulmine di valore elevatissimo. Se ad esempio si considera un'abitazione, una fulminazione diretta di quest'ultima si presenta come è visibile nella *Figura 1.5*.

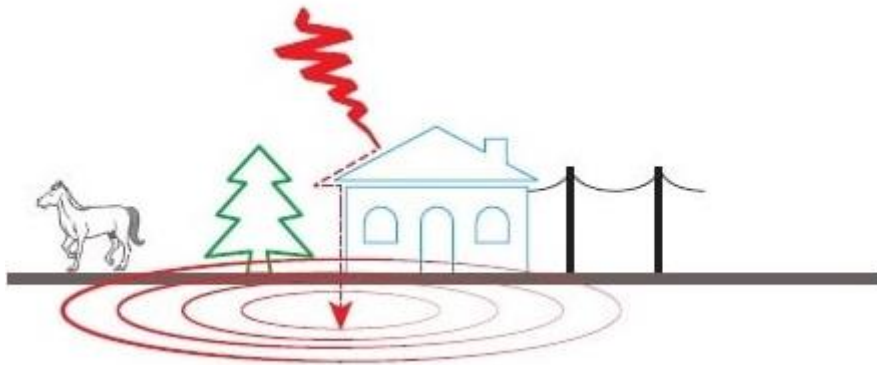


Figura 1.5: Fulminazione diretta abitazione

- Indirette, quando colpiscono un oggetto vicino al sistema elettrico e generano sovratensioni per accoppiamento elettromagnetico. Se, come per il caso precedente, si considera un'abitazione, una fulminazione indiretta di quest'ultima si presenta come è visibile nella *Figura 1.6*.



Figura 1.6: Fulminazione indiretta abitazione

Alla corrente di scarica corrisponde una sovratensione, il cui calcolo è piuttosto difficile, a meno di introdurre robuste semplificazioni. In caso di fulminazione diretta, in modo approssimato si può porre:

$$v_f(t) = Z_f * i_f(t)$$

dove:

- $v_f(t)$ è la sovratensione
- $i_f(t)$ è la corrente di scarica
- Z_f è l'impedenza caratteristica della linea

Più in generale, ad ogni onda di corrente $i_f(t)$ corrisponde un'onda di tensione $v_f(t)$, secondo le note equazioni dei telegrafisti.

L'impedenza caratteristica è definita come segue:

$$Z_f = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$$

Dove:

- r è la resistenza della linea per unità di lunghezza (Ω/m)
- l è l'induttanza per unità di lunghezza (H/m)
- g è la conduttanza per unità di lunghezza (S/m)
- c è la capacità per unità di lunghezza (F/m)

Occorre però prestare attenzione ai valori di l e c , che non sono quelli corrispondenti al normale funzionamento a regime sinusoidale a 50 Hz. Nello specifico, l'induttanza l , non è l'usuale induttanza di servizio del funzionamento a 50 Hz a regime sinusoidale, in questo caso si ha a che fare con tensioni di forma assai irregolare e con variazioni enormemente più rapide, cui corrispondono distribuzioni di corrente nel conduttore ben lontane dall'uniformità. Analogamente la capacità c non è la capacità di servizio, infatti per effetto dell'intensa ionizzazione provocata dall'effetto corona, il raggio di ogni conduttore risulta aumentato per la presenza di un ulteriore (equivalente) manicotto conduttore.

Capitolo 2

2. La norma CEI EN 62305

2.1 Introduzione alla norma

La protezione delle strutture e degli impianti dagli effetti delle scariche atmosferiche è disciplinata dalla serie normativa CEI EN 62305, che costituisce il principale riferimento tecnico per la valutazione dei rischi associati ai fulmini e per la definizione delle relative misure di protezione. La versione attualmente in vigore è la terza edizione pubblicata nell'anno 2025. La norma fornisce criteri e metodologie riguardanti l'analisi del rischio, la salvaguardia delle persone, la protezione delle strutture e la tutela dei sistemi elettrici ed elettronici contro gli effetti diretti e indiretti delle scariche atmosferiche.

La norma CEI EN 62305 è articolata in quattro parti, ciascuna dedicata a uno specifico aspetto della protezione contro il fulmine.

2.1.1 CEI EN 62305-1 – Principi generali

La prima parte della norma definisce i concetti fondamentali relativi alla protezione contro i fulmini e descrive i fenomeni fisici associati alle scariche atmosferiche. Vengono introdotti i parametri caratteristici della corrente di fulmine, le tipologie di danno che possono verificarsi e i principi generali utilizzati per la progettazione dei sistemi di protezione. La norma stabilisce inoltre le basi per la classificazione dei livelli di protezione e per la valutazione degli effetti che il fulmine può produrre sulle strutture e sugli impianti ad esse collegati [6];

2.1.2 CEI EN 62305-2 – Valutazione del rischio

La seconda parte della norma fornisce la metodologia per la determinazione del rischio derivante dalle scariche atmosferiche. Attraverso una procedura di calcolo standardizzata è possibile valutare la probabilità che un evento di fulminazione provochi danni a persone, strutture o servizi e verificare se il rischio risultante sia accettabile oppure richieda l'adozione di specifiche misure di protezione. L'analisi consente inoltre di individuare le soluzioni più efficaci per ridurre il rischio entro i

limiti stabiliti dalla norma. Resta comunque possibile adottare sistemi di protezione anche in assenza di una specifica valutazione o quando il rischio risulti inferiore ai valori limite previsti [7];

2.1.3 CEI EN 62305-3 – Protezione delle strutture e delle persone

La terza parte della norma è dedicata agli aspetti di sicurezza relativi all'impatto diretto del fulmine sulle strutture e alla tutela delle persone esposte agli effetti della corrente di fulminazione. L'obiettivo principale è quello di limitare i danni fisici agli edifici e ridurre il rischio per gli individui attraverso la corretta progettazione e realizzazione dei sistemi di protezione.

In questo contesto viene definito il sistema di protezione contro il fulmine (LPS), inteso come insieme coordinato di elementi che lavorano sia all'esterno sia all'interno della struttura. La sua funzione non si limita all'intercettazione della scarica atmosferica, ma comprende anche la gestione sicura della corrente verso terra e la riduzione delle differenze di potenziale pericolose all'interno dell'edificio. La componente esterna del sistema è responsabile dell'interazione diretta con il fulmine. Essa deve garantire l'intercettazione della scarica, la conduzione controllata della corrente lungo un percorso prestabilito e la sua successiva dispersione nel terreno in condizioni tali da evitare danni strutturali o pericoli per le persone. Questo risultato viene ottenuto attraverso una configurazione che integra elementi di captazione, vie di discesa della corrente e un adeguato sistema di dispersione a terra.

Parallelamente, la parte interna dell'LPS ha il compito di ridurre le sollecitazioni elettriche che potrebbero generarsi all'interno della struttura in seguito alla fulminazione. Ciò avviene principalmente mediante il collegamento equipotenziale delle masse metalliche e il controllo delle distanze di isolamento tra gli elementi dell'impianto di protezione e le altre parti conduttrici presenti nell'edificio.

Un ulteriore aspetto trattato dalla norma riguarda la sicurezza delle persone in relazione alle tensioni indotte dalla corrente di fulmine, in particolare quelle di contatto e di passo. Per ridurre il rischio associato a tali fenomeni, possono essere adottate soluzioni che comprendono l'isolamento delle superfici accessibili, il miglioramento delle caratteristiche elettriche del terreno e l'utilizzo di misure fisiche o informative che limitino l'accesso alle aree potenzialmente pericolose [8].

2.1.4 CEI EN 62305-4 – Protezione degli impianti elettrici ed elettronici

La quarta parte della norma riguarda la protezione degli impianti elettrici ed elettronici installati all'interno delle strutture dagli effetti dell'impulso elettromagnetico generato dal fulmine (LEMP – Lightning Electromagnetic Impulse). Essa fornisce indicazioni per la progettazione, l'installazione e la verifica delle misure di protezione necessarie a garantire il corretto funzionamento delle apparecchiature e a ridurre il rischio di guasti permanenti.

I danni ai sistemi elettrici ed elettronici possono essere causati sia dalle sovratensioni che si propagano lungo le linee di alimentazione e di segnale, sia dall'azione diretta dei campi elettromagnetici associati alla scarica atmosferica. Tali effetti assumono particolare rilevanza negli impianti complessi o caratterizzati da elevato valore economico, nei quali eventuali interruzioni di servizio possono comportare significative conseguenze operative e finanziarie. Per mitigare tali fenomeni, la norma prevede l'impiego di un Sistema di Misure di Protezione (SPM – Surge Protection Measures), che può comprendere schermature elettromagnetiche, collegamenti equipotenziali, corrette configurazioni di messa a terra e dispositivi di protezione contro le sovratensioni (SPD). Questi ultimi limitano l'ampiezza delle sovratensioni transitorie a valori compatibili con la capacità di tenuta delle apparecchiature, contribuendo in modo significativo alla loro salvaguardia [9].

2.2 Sezione 2 della norma CEI 62305

Per l'esecuzione dei calcoli e per la valutazione del rischio si fa riferimento alla seconda parte della norma CEI EN 62305. Tale sezione normativa definisce una metodologia strutturata per l'analisi del rischio associato ai fenomeni di fulminazione e indica, qualora necessario, le relative misure di protezione da adottare. L'obiettivo è quello di ridurre il rischio a livelli non superiori ai valori considerati tollerabili dalla norma stessa.

2.2.1 Definizione dei termini utili per la classificazione del rischio

Le scariche atmosferiche che raggiungono il suolo rappresentano un fattore di rischio significativo sia per le strutture sia per i servizi ad esse collegati. In generale, gli eventi di fulminazione che possono interessare un edificio si distinguono in diverse tipologie: da un lato i fulmini che colpiscono direttamente la struttura, dall'altro quelli che si verificano in prossimità dell'edificio oppure che interessano direttamente le linee ad esso connesse, come quelle di alimentazione elettrica o di telecomunicazione, includendo anche le scariche che si sviluppano nelle immediate vicinanze di tali infrastrutture.

I possibili effetti associati a questi fenomeni sono molteplici e comprendono principalmente il danneggiamento della struttura e del suo contenuto, il malfunzionamento o la compromissione degli impianti elettrici ed elettronici e, soprattutto, il potenziale rischio per la sicurezza delle persone presenti all'interno o nelle aree circostanti. In particolare, le scariche che impattano direttamente sulla struttura o sulle linee ad essa collegate possono generare sia danni materiali sia situazioni di pericolo per gli individui. Anche i fulmini che non colpiscono direttamente l'edificio, ma che si verificano nelle sue vicinanze o lungo le linee di collegamento, possono comunque provocare sovratensioni indotte e accoppiamenti di tipo resistivo e induttivo, con conseguenti guasti agli impianti elettrici ed elettronici. Gli effetti di tali eventi possono propagarsi oltre il perimetro della struttura, estendendosi anche all'ambiente circostante.

Nel presente lavoro l'attenzione è rivolta in particolare alla valutazione del rischio per le persone che operano nei pressi della struttura. Tra le diverse conseguenze possibili della fulminazione, viene quindi considerato prioritariamente il pericolo associato ai danni agli esseri viventi presenti all'interno o nelle immediate vicinanze dell'edificio.

La norma CEI EN 62305-2 individua e classifica le principali sorgenti di danno associate al fenomeno della fulminazione, considerando la corrente di fulmine come il fattore primario responsabile degli effetti dannosi. La suddivisione delle sorgenti viene effettuata in funzione della zona di impatto della scarica atmosferica:

- S1: Fulmine sulla struttura.
- S2: Fulmine in prossimità della struttura.
- S3: Fulmine su una linea.
- S4: Fulmine in prossimità di una linea.

La norma CEI EN 62305-2 identifica e classifica le principali tipologie di danno che possono essere causate da un fulmine, in relazione alle caratteristiche della struttura oggetto di protezione. Nelle applicazioni pratiche della valutazione del rischio risulta utile distinguere tra i principali meccanismi di danno che possono derivare da un evento di fulminazione. In particolare, si possono individuare tre categorie fondamentali di danno:

- D1: Danno ad esseri viventi per elettrocuzione.
- D2: Danno materiale.
- D3: Guasto di impianti elettrici ed elettronici.

La norma CEI EN 62305-2 definisce una classificazione delle possibili tipologie di perdita, partendo dal principio che ogni forma di danno, singolarmente o in combinazione con altre, può generare conseguenze differenti alla struttura da proteggere. La natura della perdita risultante è strettamente legata alle caratteristiche intrinseche dell'edificio e alla tipologia di contenuti o attività in esso presenti. In questo contesto, vengono individuate le seguenti categorie di perdita:

- L1: Perdita di vite umane (compreso danno permanente).
- L2: Perdita di servizio pubblico.
- L3: Perdita di patrimonio culturale insostituibile.
- L4: Perdita economica (struttura, contenuto e perdita di attività).

Infine, la norma CEI EN 62305-2 introduce una classificazione delle diverse tipologie di rischio associabili agli eventi di fulminazione. In tale contesto, il rischio *R* viene definito come la stima della perdita media annua attesa. Per ogni categoria di perdita potenzialmente riscontrabile in una struttura è possibile determinare il corrispondente livello di rischio, al fine di valutarne l'entità complessiva. Viene proposta una classificazione dei tipi di rischio di questo tipo:

- R1: Rischio di perdita di vite umane (inclusi danni permanenti).
- R2: Rischio di perdita di servizio pubblico.
- R3: Rischio di perdita di patrimonio culturale insostituibile.
- R4: Rischio di perdita economica (struttura, contenuto e perdita di attività).

I rischi che vengono calcolati devono essere valutati tramite un confronto con il relativo valore di rischio tollerabile R_T .

I valori di rischio tollerabile R_T , riferiti alle diverse tipologie di perdita di natura sociale, sono definiti all'interno della norma CEI EN 62305-2. In particolare, la normativa stabilisce soglie differenti in funzione delle conseguenze considerate.

Tra queste si distinguono:

- il rischio tollerabile associato alla perdita di vite umane o a danni permanenti alle persone;
- il rischio tollerabile relativo all'interruzione di un servizio pubblico;
- il rischio tollerabile connesso alla perdita di beni culturali di valore insostituibile.

I valori definiti dalla norma CEI EN 62305-2 per ogni tipologia di rischio sono riassunti nella tabella 2.1. Le principali relazioni di causa-effetto che descrivono le modalità attraverso cui un fulmine può provocare danni a una struttura nel suo insieme sono sintetizzate nella *Tabella 2.2*.

Tabella 2.1: Tipici valori di rischio tollerabile

Tipo di perdita	R_T
L1: Perdita di vite umane	10^{-5}
L2: Perdita di servizio pubblico	10^{-3}
L3: Perdita di patrimonio culturale insostituibile	10^{-4}

2.3 Valutazione del rischio

Ai fini della valutazione del rischio (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) si deve provvedere a:

- determinare le componenti R_A , R_B , R_C , R_M , R_U , R_V , R_W e R_Z che lo compongono;
- determinare il corrispondente valore del rischio R_X ;
- confrontare il rischio R_X con quello tollerabile R_T (tranne per il rischio R_4).

Tabella 2.2: Modalità attraverso le quali una scarica atmosferica può provocare un danno a una struttura.

Sorgente di danno	Tipo di danno	Tipo di perdita
S1	D1	L1, L4*
	D1	L1, L2, L3, L4
	D2	L1**, L2, L4
S2	D3	L1**, L2, L4
S3	D1	L1, L4*
	D2	L1, L2, L3, L4
	D3	L1**, L2, L4
S4	D3	L1**, L2, L4
(*) Soltanto in strutture in cui può verificarsi perdita di animali (**) Solo nel caso di strutture con rischio di esplosione, di ospedali o di altre strutture in cui guasti di impianti interni provocano immediato pericolo per la vita umana		

La Tabella 2.3 riporta tutti gli elementi da valutare.

Tabella 2.3: Componenti di rischio da considerare relativamente al tipo di perdita in una struttura

Sorgente	S1			S2	S3			S4
Danno	D1	D2	D3	D3	D1	D2	D3	D3
Comp. di rischio	R _A	R _B	R _C	R _M	R _U	R _V	R _W	R _Z
R1	SI	SI	SI*	SI*	SI	SI	SI*	SI*
R2	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI
R3	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO
R4	SI**	SI	SI	SI	SI**	SI	SI	SI
(*) Nel caso di strutture con rischio di esplosione, di ospedali o di altre strutture in cui i guasti di impianti interni provocano immediato pericolo per la vita umana (**) Soltanto in strutture in cui può verificarsi perdita di animali								

Per ogni tipologia di rischio analizzata è possibile seguire una procedura metodologica articolata in più fasi, come illustrato in *Figura 2.1*. In primo luogo si individuano le singole componenti di rischio R_X che contribuiscono al rischio complessivo. Successivamente si procede al loro calcolo, al fine di ottenere il valore quantitativo del rischio associato. In parallelo viene identificato il corrispondente valore di rischio tollerabile R_T , definito dalla normativa di riferimento. Infine si effettua il confronto tra il rischio calcolato R (o R_X) e il relativo valore soglia R_T .

Nel caso in cui il valore di R_X risulti minore o uguale a R_T , la struttura può essere considerata adeguatamente protetta e non si rende necessario alcun ulteriore intervento. Al contrario, qualora R_X superi R_T , diventa indispensabile l'adozione di misure di mitigazione, finalizzate a ridurre il rischio fino a riportarlo entro i limiti accettabili per tutte le condizioni considerate.

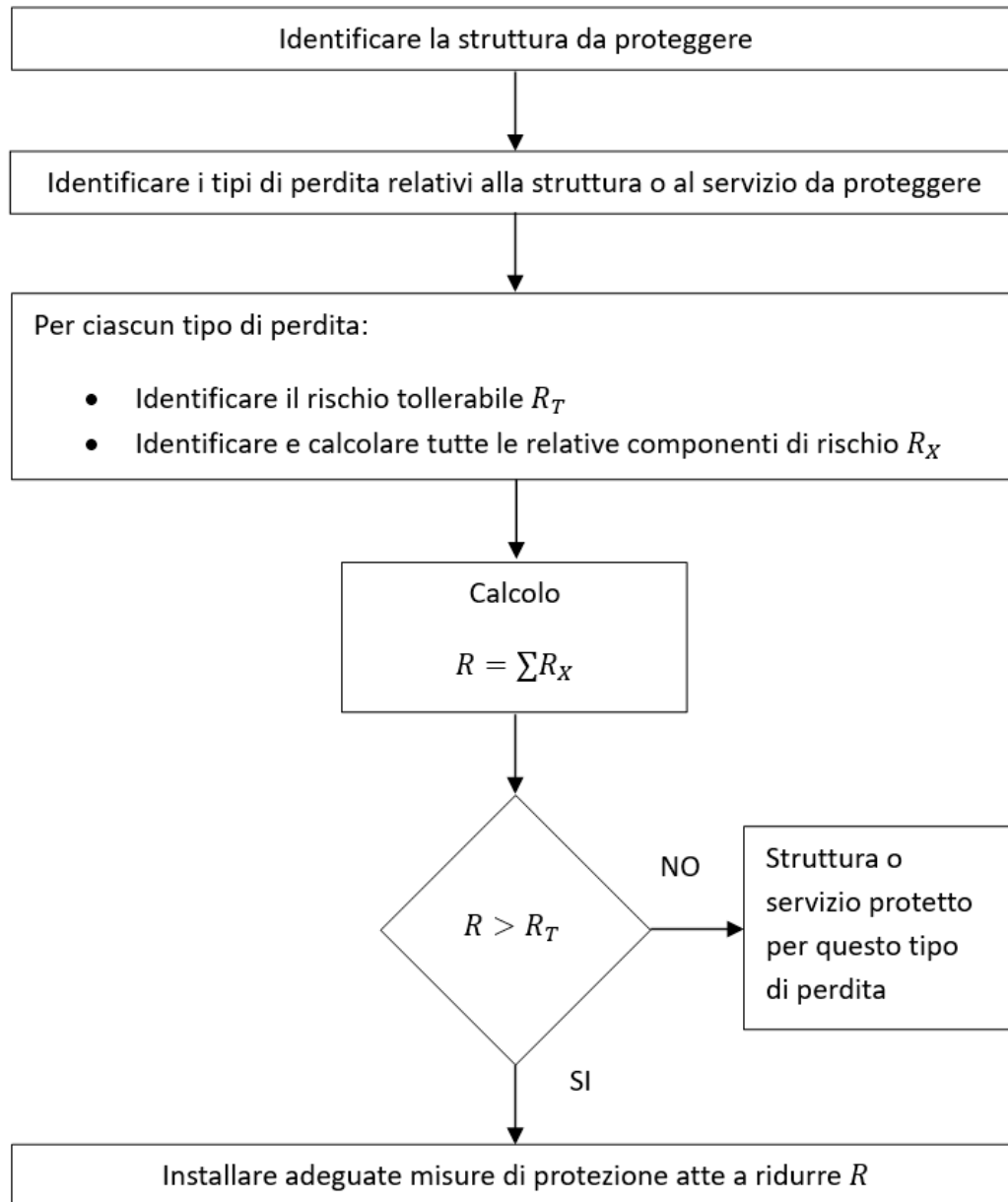


Figura 2.1: Procedura da seguire per il calcolo del rischio R

2.4 Componenti di rischio

Le diverse componenti di rischio vengono classificate in funzione della sorgente del danno e della tipologia di effetto considerato. Ognuna di queste componenti può essere determinata attraverso l'applicazione della seguente espressione generale:

$$R_X = N_X * P_X * L_X$$

dove:

- N_X è il numero di eventi pericolosi [Allegato A, CEI EN 62305-2];
- P_X è la probabilità di danno alla struttura [Allegato B, CEI EN 62305-2];
- L_X è la perdita conseguente [Allegato C, CEI EN 62305-2].

2.4.1 Componente di rischio R_A

La componente di rischio R_A , associata ai danni alle persone, è legata alla presenza di tensioni di contatto e di passo che possono manifestarsi nelle aree situate fino a 3 m all'esterno della struttura. Tale componente può determinare perdite di tipo L1, relative alla perdita di vite umane, e, nel caso di strutture adibite ad attività agricole, anche perdite di tipo L4, con conseguenti danni economici e possibile coinvolgimento di animali.

$$R_A = N_D * P_A * L_A$$

dove:

- R_A : Componente di rischio (danno ad esseri viventi-fulmine sulla struttura);
- N_D : Numero di eventi pericolosi per la fulminazione diretta della struttura [Allegato A.2, CEI EN 62305-2];
- P_A : Probabilità di danno ad esseri viventi (fulmine sulla struttura)[Allegato B.2, CEI EN 62305-2];
- L_A : Perdita di danno ad esseri viventi [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.2 Componente di rischio R_B

La componente di rischio R_B è associata ai danni materiali provocati da scariche pericolose che si sviluppano all'interno della struttura e che possono innescare incendi o esplosioni, con potenziali conseguenze anche per l'ambiente circostante. In questo caso possono verificarsi tutte le tipologie di perdita considerate dalla

norma, ovvero L1 (perdita di vite umane), L2 (interruzione di un servizio pubblico), L3 (perdita di beni di valore culturale insostituibile) e L4 (danno economico).

$$R_B = N_D * P_B * L_B$$

dove:

- R_B : Componente di rischio (danno materiale alla struttura-fulmine sulla struttura);
- N_D : Numero di eventi pericolosi per la fulminazione diretta della struttura [Allegato A.2, CEI EN 62305-2];
- P_B : Probabilità di danno materiale in una struttura (fulmine sulla struttura) [Allegato B.3, CEI EN 62305-2];
- L_B : Perdita per danno materiale in una struttura (fulmine sulla struttura) [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.3 Componente di rischio R_C

La componente di rischio R_C riguarda i guasti agli impianti interni causati dal LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse), ovvero l'impulso elettromagnetico conseguente ad un fulmine che cade sulla struttura. In tali situazioni possono manifestarsi perdite di tipo L2 (interruzione di un servizio pubblico) e L4 (danno economico), mentre la perdita L1 (vite umane) è possibile nei casi di strutture a rischio di esplosione oppure in edifici come ospedali e altre installazioni in cui il malfunzionamento dei sistemi interni può comportare un pericolo immediato per la sicurezza delle persone.

$$R_C = N_D * P_C * L_C$$

dove:

- R_C : Componente di rischio (guasto di apparati del servizio-fulmine sulla struttura);
- N_D : Numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta della struttura [Allegato A.2, CEI EN 62305-2];
- P_C : Probabilità di guasto di un impianto interno (fulmine sulla struttura) [Allegato B.4, CEI EN 62305-2];
- L_C : Perdita per guasto di un impianto interno (fulmine sulla struttura) [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.4 Componente di rischio R_M

La componente di rischio R_M è associata ai guasti degli impianti interni provocati dal LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse), ovvero l'impulso elettromagnetico conseguente ad un fulmine che cade in prossimità della struttura. In tali condizioni possono verificarsi perdite di tipo L2 (interruzione di un servizio pubblico) e L4 (danno economico). La perdita L1 (vite umane) può inoltre presentarsi in strutture a rischio di esplosione oppure in edifici quali ospedali o altre installazioni in cui un guasto dei sistemi interni possa determinare un pericolo immediato per l'incolumità delle persone.

$$R_M = N_M * P_M * L_M$$

dove:

- R_M : Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmini in prossimità della struttura);
- N_M : Numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità della struttura) [Allegato A.3, CEI EN 62305-2];
- P_M : Probabilità di guasto di un impianto interno (fulmine in prossimità della struttura) [Allegato B.5, CEI EN 62305-2];
- L_M : Perdita per guasto di un impianto interno (fulmine in prossimità della struttura) [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.5 Componente di rischio R_U

La componente di rischio R_U è associata ai danni alle persone causati dalle tensioni di contatto che possono generarsi all'interno della struttura a seguito dell'immissione della corrente di fulmine nelle linee entranti. In tali condizioni possono verificarsi perdite di tipo L1 (perdita di vite umane) e, nel caso di edifici adibiti ad attività agricole, anche perdite di tipo L4 (danno economico), con possibile coinvolgimento di animali.

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) * P_U * L_U$$

dove:

- R_U : Componente di rischio (danno ad esseri viventi-fulmine sul servizio);
- N_L : Numero di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio [Allegato A.4, CEI EN 62305-2];

- N_{DJ} : Numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura all'estremità lontana della linea [Allegato A.2, CEI EN 62305-2];
- P_U : Probabilità di danno ad esseri viventi (fulmine sul servizio connesso) [Allegato B.6, CEI EN 62305-2];
- L_U : Perdita per danni ad esseri viventi (fulmine sul servizio) [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.6 Componente di rischio R_V

La componente di rischio R_V riguarda i danni materiali, quali incendi o esplosioni, causati da scariche pericolose tra le installazioni esterne e le parti metalliche della struttura, generalmente in corrispondenza del punto di ingresso delle linee. Tali effetti sono dovuti alla corrente di fulmine trasmessa attraverso il servizio entrante. In questo caso possono verificarsi tutte le tipologie di perdita previste, ovvero L1 (perdita di vite umane), L2 (interruzione di un servizio pubblico), L3 (perdita di beni di valore culturale insostituibile) e L4 (danno economico).

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) * P_V * L_V$$

dove:

- R_V : Componente di rischio (danno materiale alla struttura-fulmine sul servizio connesso);
- N_L : Numero di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio [Allegato A.4, CEI EN 62305-2];
- N_{DJ} : Numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura all'estremità lontana della linea [Allegato A.2, CEI EN 62305-2];
- P_V : Probabilità di danno materiale nella struttura (fulmine sul servizio connesso)[Allegato B.7, CEI EN 62305-2];
- L_V : Perdita per danno materiale in una struttura (fulmine sul servizio) [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.7 Componente di rischio R_W

La componente di rischio R_W è associata ai guasti degli impianti interni provocati da sovratensioni che si propagano attraverso le linee collegate alla struttura, in seguito all'impatto di un fulmine sulla linea stessa. In queste condizioni possono verificarsi perdite di tipo L2 (interruzione di un servizio pubblico) e L4 (danno economico). La perdita L1 (vite umane) è inoltre possibile nel caso di strutture a

rischio di esplosione oppure in edifici come ospedali e altre installazioni in cui il malfunzionamento dei sistemi interni possa determinare un pericolo immediato per la sicurezza delle persone.

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) * P_W * L_W$$

dove:

- R_W : Componente di rischio (danno agli apparati-fulmine sul servizio connesso);
- N_L : Numero di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio [Allegato A.4, CEI EN 62305-2];
- N_{DJ} : Numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura all'estremità lontana della linea [Allegato A.2, CEI EN 62305-2];
- P_W : Probabilità di guasto di un impianto interno (fulmine sul servizio connesso) [Allegato B.8, CEI EN 62305-2];
- L_W : Perdita per guasto di un impianto interno (fulmine sul servizio) [Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.4.8 Componente di rischio R_Z

La componente di rischio R_Z riguarda i danni agli impianti interni dovuti a sovratensioni indotte sulle linee esterne quando un fulmine si abbatte nelle immediate vicinanze del collegamento. In questa situazione, le conseguenze possono includere perdite di tipo L2 (interruzione di un servizio pubblico) e L4 (danno economico). Inoltre, in contesti particolarmente critici, come strutture con presenza di atmosfere esplosive, ospedali o altri edifici in cui il malfunzionamento degli impianti può comportare un rischio immediato per la sicurezza delle persone, può manifestarsi anche la perdita di tipo L1 (perdita di vite umane).

$$R_Z = N_I * P_Z * L_Z$$

dove:

- R_Z : Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità del servizio);
- N_I : Numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità del servizio [Allegato A.4, CEI EN 62305-2];
- P_Z : Probabilità di guasto di un impianto interno (fulmine in prossimità del servizio) [Allegato B.9, CEI EN 62305-2];

- L_Z : Perdita per guasto di un impianto interno (fulmine in prossimità del servizio)[Allegato C.3, CEI EN 62305-2].

2.5 Determinazione del rischio di perdita di vite umane (R_1)

Il rischio complessivo associato alla possibile perdita di vite umane viene ottenuto attraverso la combinazione delle singole componenti di rischio definite in precedenza, che concorrono nel loro insieme a determinare il valore finale del rischio, nelle modalità sotto riportate.

$$R_1 = R_A + R_B + R_C^* + R_M^* + R_U + R_V + R_W^* + R_Z^*$$

(*) Nel caso di strutture con rischio di esplosione, di ospedali o di altre strutture, in cui i guasti di impianti interni provocano immediato pericolo per la vita umana. dove:

- R_A : Componente di rischio (danno ad esseri viventi-fulmine sulla struttura);
- R_B : Componente di rischio (danno materiale della struttura-fulmine sulla struttura);
- R_C : Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine sulla struttura);
- R_M : Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità della struttura);
- R_U : Componente di rischio (danno ad esseri viventi-fulmine sul servizio connesso);
- R_V : Componente di rischio (danno materiale alla struttura- fulmine sul servizio connesso);
- R_W : Componente di rischio (danno agli impianti-fulmine sul servizio connesso);
- R_Z : Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità di un servizio connesso).

Nella norma CEI EN 62305, oltre alla relazione per il calcolo del rischio di perdita di vite umane (R_1), sono definite anche le equazioni per la determinazione del rischio di perdita del servizio pubblico (R_2), del rischio di perdita di patrimonio culturale insostituibile (R_3) e del rischio di perdita economica (R_4).

L'obiettivo di questo progetto è quello di calcolare il rischio per i lavoratori che si trovano ad operare in condizioni generiche, pertanto è solamente di interesse il calcolo del rischio di perdita di vite umane (R_1).

2.6 Esito della valutazione

Una volta determinato il valore di rischio di perdita di vite umane relativo alla struttura, è necessario procedere con la sua valutazione rispetto al corrispondente livello di rischio tollerabile (R_T), al fine di verificare la conformità della situazione analizzata ai criteri di sicurezza previsti.

In base all'esito di tale confronto, si possono distinguere tre scenari principali.

Nel primo caso, la struttura può essere considerata autoprotetta quando il valore di rischio di perdita di vite umane, risulta inferiore al rispettivo valore di soglia ($R_1 < R_T$) e non sono stati predisposti sistemi o interventi di protezione specifici.

Nel secondo caso, la struttura rientra nella categoria delle strutture protette quando il livello di rischio calcolato risulta comunque inferiore al limite ammesso ($R_1 < R_T$), ma sono state implementate misure di protezione finalizzate alla riduzione ulteriore dell'esposizione al rischio.

Infine, si configura una condizione di non conformità quando la componente di rischio di perdita di vite umane relativo alla struttura, supera il corrispondente valore di rischio tollerabile ($R_1 > R_T$); in tale situazione è obbligatorio introdurre adeguate misure di protezione, con l'obiettivo di riportare i livelli di rischio entro i limiti accettabili.

Capitolo 3

3. Modelli dinamici per la determinazione del rischio

3.1 Introduzione ai modelli

La previsione della fulminazione rappresenta una problematica particolarmente complessa nell'ambito della meteorologia operativa e della gestione del rischio atmosferico. Lo sviluppo dei fulmini dipende infatti dall'interazione non lineare di numerosi fenomeni fisici, tra cui instabilità convettiva, distribuzione verticale dell'umidità, dinamiche delle correnti ascensionali e processi di elettrificazione all'interno delle nubi temporalesche.

Per migliorare la capacità predittiva dei modelli meteorologici numerici (Numerical Weather Prediction, NWP), sono stati sviluppati diversi strumenti di supporto alla previsione del rischio di fulminazione. Tra questi assumono particolare rilevanza il metodo Lightning Strike Hazard Estimation (LISHAE), il metodo Neural Network (NN) e il metodo Soft ELECTRE TRI (SET), analizzati comparativamente nell'ambito della previsione a breve termine del rischio di fulminazione per applicazioni aeronautiche [10]. Tutti questi metodi utilizzano come input gli stessi parametri meteorologici derivati dal modello numerico Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle (ARPEGE) di Météo-France in collaborazione con il Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECMWF).

ARPEGE è un modello di circolazione generale globale e spettrale esteso con un intervallo di risoluzione orizzontale da 7,5 km sull'Europa a 36 km sul lato opposto del globo (vicino a 60° S; 180° E) nella sua versione del 2015 (Pailleux et al. 2015) [10].

Le variabili utilizzate dai tre modelli non derivano direttamente da misure sperimentali, ma sono il risultato di simulazioni effettuate da ARPEGE a partire dalle osservazioni meteorologiche reali provenienti da stazioni al suolo, radiosondaggi, radar, satelliti e altre reti di monitoraggio. Attraverso la risoluzione delle equazioni fisiche che governano l'atmosfera, ARPEGE stima l'evoluzione futura delle condizioni meteorologiche e fornisce in uscita parametri previsionali,

quali temperatura, umidità, instabilità atmosferica ed energia convettiva disponibile. Questi parametri costituiscono gli input utilizzati dai tre algoritmi per la previsione del rischio di fulminazione.

Nella Tabella 3.1 vengono definiti i 12 parametri calcolati dal modello ARPAGE.

Tabella 3.1: Parametri calcolati dal modello ARPAGE [10]

Predittore meteorologico	Acronimo
Nebulosità convettiva	NEBCON
Accumulo di precipitazione convettiva	PCONV
Contenuto totale di acqua	TWC
Contenuto totale di acqua ghiacciata	TIWC
Velocità verticale alla quota dell'isoterma 0 °C	WISO
Massimo dell'umidità relativa	Max RH
Indice di sollevamento (Lifted Index)	LI
Energia potenziale convettiva disponibile	CAPE
Temperatura alla sommità della nube convettiva	CTT
Differenza di quota tra base nube convettiva e livello 0 °C	ALTB
Divergenza del vento alla base della nube convettiva	DIV B
Divergenza del vento in prossimità della sommità della nube convettiva	DIV T

Ognuno di questi 12 parametri è utile per descrivere la struttura o la dinamica della nube, per fornire informazioni sulle precipitazioni, sull'instabilità atmosferica o sulla circolazione dei venti. In base alla tipologia di informazione fornita e al relativo impiego nell'analisi meteorologica, i dodici parametri possono essere classificati nelle seguenti categorie.

Parametri di Struttura e Dinamica della Nube

- **NEBCON** (Nebulosità convettiva): Percentuale di cielo coperta da nubi a sviluppo verticale (cumulonembi). Indica l'estensione e la presenza di tempeste convettive in corso.

- **WISO** (Velocità verticale alla quota dell'isoterma 0 °C): Velocità dei moti ascendenti d'aria dove l'acqua congela. Forti correnti verticali favoriscono la collisione dei cristalli di ghiaccio e la successiva elettrizzazione della nube.
- **CTT** (Temperatura alla sommità della nube convettiva): Temperatura misurata nel punto più alto della nube. Più è bassa (sotto lo zero), più la nube è alta, energetica e ricca di ghiaccio.
- **ALTB** (Differenza di quota tra base nube convettiva e livello 0 °C): Spessore della parte "calda" della nube. Un valore ridotto significa che l'aria entra rapidamente nella zona di congelamento, accelerando la formazione di fulmini.

Idrometeore e Precipitazioni

- **PCONV** (Accumulo di precipitazione convettiva): Quantità di pioggia generata esclusivamente da rovesci e temporali. È un indicatore diretto dell'intensità del sistema temporalesco.
- **TWC** (Contenuto totale di acqua): Quantità complessiva di acqua (liquida, vapore e solida) presente in una colonna d'aria. Misura l'umidità totale disponibile per alimentare il temporale.
- **TIWC** (Contenuto totale di acqua ghiacciata): Massa totale di ghiaccio (graupel, grandine, cristalli) nella nube. È il parametro fondamentale per la generazione dei fulmini, che nascono proprio dagli urti tra particelle ghiacciate.

Instabilità e Termodinamica

- **Max RH** (Massimo dell'umidità relativa): Il valore massimo di saturazione dell'aria nella colonna atmosferica. Alti livelli di umidità garantiscono il combustibile necessario alla formazione delle nubi convettive.
- **LI** (Lifted Index): Differenza di temperatura tra l'aria circostante e una massa d'aria sollevata idealmente da terra. Più il valore è negativo, più l'atmosfera è instabile e incline a temporali violenti.
- **CAPE** (Energia potenziale convettiva disponibile): Quantità di energia cinetica che una massa d'aria può accumulare salendo verso l'alto. Valori elevati indicano correnti ascensionali violentissime, tipiche dei temporali con fulmini.

Circolazione dei Venti

DIV B (Divergenza del vento alla base della nube convettiva): Comportamento del vento sotto la nube. Una divergenza negativa (ovvero *convergenza*) indica che l'aria viene aspirata e spinta verso l'alto, alimentando il temporale.

DIV T (Divergenza del vento in prossimità della sommità della nube): Comportamento del vento in cima alla nube. Una forte divergenza positiva indica che l'aria giunta in quota si disperde rapidamente all'esterno, permettendo al temporale di continuare ad aspirare aria dal basso.

3.2 Modelli analizzati

In questa parte vengono analizzati i tre modelli citati precedentemente [9]:

- metodo Lightning Strike Hazard Estimation (LISHAE);
- metodo Neural Network (NN);
- metodo Soft ELECTRE TRI (SET).

L'obiettivo è porre l'attenzione sul funzionamento di questi modelli, spiegando per ognuno: il processo operativo, il metodo di calcolo, i dati utilizzati in ingresso, l'interpretazione dei risultati.

3.2.1 Metodo LISHAE

Il metodo LISHAE è stato sviluppato presso l'ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales) con l'obiettivo di fornire una valutazione rapida del rischio di fulminazione attraverso un approccio deterministico basato su soglie e funzioni di ponderazione. L'idea fondamentale consiste nel trasformare diversi parametri meteorologici in indicatori elementari di rischio che vengono successivamente combinati in un unico indice sintetico. Il metodo non richiede una fase di apprendimento né l'utilizzo di dati storici per l'addestramento, rendendolo facilmente adattabile a differenti aree geografiche. Lo studio considera dodici predittori meteorologici estratti dal modello numerico ARPEGE, definite nella *Tabella 3.1*.

La procedura di calcolo per il metodo LISHAE si articola in tre fasi principali:

1. Confronto con valori di riferimento

Per ciascun parametro meteorologico viene definito un valore di riferimento rappresentativo della soglia di transizione tra condizioni non favorevoli e favorevoli allo sviluppo della convezione. La differenza tra il valore osservato e il valore di riferimento non viene utilizzata direttamente, ma trasformata mediante una funzione di scoring che associa a ciascun parametro un valore intero compreso tra 1 e 10 ($RISK_i$), in funzione della sua vicinanza alla soglia fisica di riferimento che discrimina tra condizioni non favorevoli e favorevoli allo sviluppo della convezione. Tale approccio consente di rappresentare il contributo del singolo parametro al rischio di fulminazione mediante una scala discreta dipendente dalla distanza dalla soglia.

2. Ponderazione

Nella fase di ponderazione, a ciascun parametro meteorologico normalizzato viene associato un coefficiente di importanza ω_i , che rappresenta il contributo relativo della variabile nella formazione dei fenomeni temporaleschi e nella generazione delle scariche elettriche atmosferiche. Tale coefficiente consente di differenziare il peso fisico dei vari predittori, attribuendo maggiore rilevanza alle grandezze direttamente correlate ai processi convettivi, come l'energia potenziale disponibile, rispetto a variabili secondarie o indirettamente correlate. I pesi vengono successivamente utilizzati nella combinazione lineare che porta alla costruzione dell'indice aggregato di rischio.

3. Calcolo del rischio

Il rischio totale viene ottenuto tramite una combinazione pesata dei contributi dei singoli parametri.

$$RISK_{TOT} = \sum_{i=1}^n \omega_i * RISK_i$$

dove:

- ω_i è il peso associato ad ogni predittore
- $RISK_i$ punteggio di rischio associato al parametro;

Una volta determinato il rischio totale, è possibile fare un confronto con soglie calibrate sui dati del caso studio. Nello studio Aurélie Bouchard, nell'analisi del metodo LISHAE, vengono scelte cinque classi di rischio. Questi livelli di rischio sono definiti nella *Tabella 3.2*.

Tabella 3.2: *Classi di rischio*

Livello di rischio	Gravità
0	Nessun rischio
1	Rischio molto basso
3	Rischio basso
4	Rischio moderato
5	Rischio elevato

3.2.2 Metodo NN

Il metodo Neural Network (NN) utilizza una rete neurale artificiale, ossia un algoritmo di apprendimento automatico capace di modellare relazioni altamente non lineari tra variabili meteorologiche e probabilità di fulminazione. Diversamente da LISHAE, la rete neurale apprende automaticamente dai dati storici senza richiedere soglie o regole predefinite.

In questo studio, le informazioni relative alla formazione dei fulmini sono rappresentate in forma binaria, come si vede dalla *Figura 3.1*, distinguendo tra la presenza e l'assenza dell'evento. Il metodo basato su rete neurale (NN) si articola in due fasi principali. La prima è la fase di addestramento, nella quale un insieme di dati meteorologici storici di ingresso è associato a osservazioni di fulminazione. Durante questa fase, la rete apprende la relazione tra le variabili atmosferiche e l'evento mediante l'ottimizzazione dei pesi sinaptici, attraverso la minimizzazione di una funzione di costo. La funzione di costo più comune è l'errore quadratico medio:

$$E = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n (y_{oi} - y_{pi})^2$$

dove:

- y_{oi} è il valore osservato;
- y_{pi} è il valore presvisto.

La seconda fase è la fase di test, nella quale il modello viene valutato su dati non utilizzati in addestramento. Le prestazioni del classificatore vengono analizzate mediante metriche di valutazione, tra cui la matrice di confusione, che consente di quantificare correttamente le capacità predittive del modello.

		Electrical activity detected by the lightning location system	
			NO
Electrical activity predicted by a method		Correct detection (BD)	False Alarm (FA)
	NO	MISS	Correct rejection (OK)

Figura 3.1: Risultati ottenibili con il metodo NN [10]

3.2.3 Metodo SET

Il metodo SET nasce dall'idea che nessun singolo classificatore sia in grado di fornire previsioni ottimali in tutte le condizioni atmosferiche. Per questo motivo, anziché utilizzare un unico modello predittivo, vengono costruiti più classificatori indipendenti e successivamente combinati tra loro per ottenere una previsione finale più robusta. L'approccio appartiene alla categoria degli ensemble methods, cioè metodi che aggregano le decisioni di più modelli elementari. Il termine *Selective Ensemble* deriva dal fatto che non tutti i modelli addestrati vengono utilizzati nella

previsione finale: viene selezionato soltanto un sottoinsieme dei classificatori che mostra le migliori prestazioni.

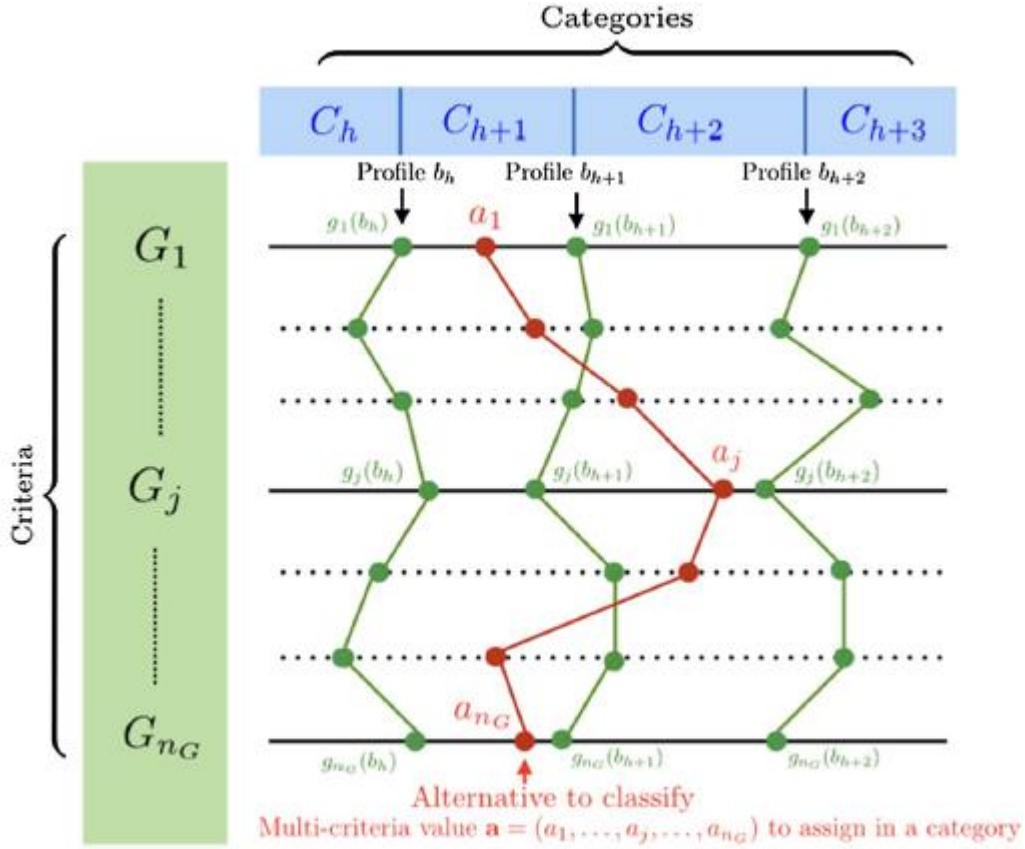


Figura 3.2: Logica del metodo SET [10]

La Figura 3.2 è utile per capire come funziona la logica decisionale del metodo SET. Questo metodo può essere interpretato come una tecnica di classificazione multicriterio, in cui un insieme di criteri G_j viene utilizzato per valutare la compatibilità di un'osservazione con differenti classi di rischio C_h . La classificazione finale è ottenuta mediante il confronto tra il profilo dell'osservazione e i profili di riferimento delle classi.

Analizzando nello specifico la Figura 3.2, si può definire quanto segue:

- La colonna verde a sinistra formata dagli elementi $G_1, G_2, \dots, G_{n_G}$ rappresenta i criteri utilizzati. Nel contesto SET questi possono essere: reti neurali diverse, modelli diversi o versioni dello stesso modello.

- In alto si trovano gli elementi $C_h, C_{h+1}, C_{h+2}, C_{h+3}$ che sono le classi finali del rischio. Nel caso in esame:
 - C1 = nessun rischio;
 - C2 = rischio basso;
 - C3 = rischio moderato;
 - C4 = rischio alto.
- Sotto le classi finali del rischio si trovano i *profile*. Ogni categoria ha un profile b_h il quale rappresenta il “profilo ideale” della classe, è una descrizione matematica della classe e serve come riferimento per confrontare le alternative.
- I punti verdi con etichetta $g_j(b_h), g_j(b_{h+1}), \dots$ rappresentano il valore del criterio j -esimo applicato alla classe h -esima ossia quanto il criterio G_j è compatibile con la categoria C_h . Quindi ogni criterio valuta ogni categoria creando una “mappa di compatibilità”.
- La linea rossa include i punti $a = (a_1, a_2, \dots, a_{nG})$ ossia il fenomeno reale da classificare (il caso meteorologico osservato). Ogni punto rosso è il valore reale del criterio G_j .

Il metodo SET funziona in questo modo: considera un evento reale (rosso), lo confronta con i profili delle classi (verde), misura la distanza/compatibilità tra l'evento reale e i profili delle classi e infine decide la classe migliore.

3.3 Confronto tra i modelli analizzati

I tre metodi analizzati presentano approcci profondamente differenti alla previsione del rischio di fulminazione. Il metodo (LISHAE) si basa su una valutazione deterministica fondata su soglie meteorologiche e regole fisiche, il metodo (NN) Neural Network (NN) utilizza tecniche di apprendimento automatico per individuare relazioni non lineari tra le variabili atmosferiche e l'occorrenza dei fulmini, mentre il metodo Selective Ensemble Technique (SET) combina più classificatori al fine di migliorare l'affidabilità della previsione.

Metodo LISHAE

Il principale vantaggio del metodo risiede nella sua elevata trasparenza. Ogni contributo al rischio finale è direttamente riconducibile a una specifica variabile meteorologica e può essere facilmente interpretato dal previsore. Inoltre, il metodo non richiede alcuna fase di addestramento né l'utilizzo di grandi quantità di dati storici, risultando quindi facilmente implementabile anche in contesti caratterizzati da una limitata disponibilità di dati osservativi. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dal ridotto costo computazionale, che consente di ottenere rapidamente una stima del rischio. D'altra parte, il metodo LISHAE presenta una capacità limitata nel descrivere le complesse relazioni non lineari che caratterizzano i fenomeni convettivi responsabili della generazione dei fulmini. Le prestazioni dipendono inoltre dalla corretta definizione delle soglie e dei pesi associati ai predittori, i quali vengono generalmente determinati in modo empirico. Di conseguenza, il modello può risultare meno accurato rispetto a tecniche basate sull'apprendimento automatico quando viene applicato a scenari meteorologici particolarmente complessi.

Metodo NN

Il principale vantaggio di questo approccio consiste nella capacità di modellare relazioni altamente non lineari tra i parametri meteorologici. Le reti neurali sono infatti in grado di individuare correlazioni difficilmente descrivibili mediante regole fisiche esplicite, consentendo generalmente di ottenere prestazioni superiori rispetto ai modelli deterministici tradizionali. Inoltre, il modello può essere aggiornato e migliorato nel tempo mediante l'utilizzo di nuovi dati di addestramento. Lo svantaggio principale è rappresentato dalla necessità di disporre di un ampio database storico di eventi di fulminazione e delle corrispondenti condizioni atmosferiche. Le prestazioni del modello dipendono fortemente dalla qualità e dalla rappresentatività dei dati utilizzati durante l'addestramento. Inoltre, le reti neurali sono spesso considerate modelli "black-box", poiché il processo decisionale interno risulta difficilmente interpretabile. Infine, il rischio di overfitting può compromettere la capacità di generalizzazione del modello qualora la fase di addestramento non venga opportunamente controllata.

Metodo SET

Il principale vantaggio del metodo SET è la maggiore robustezza delle previsioni. Poiché la decisione finale deriva dalla combinazione di più modelli, gli errori commessi da un singolo classificatore tendono a compensarsi reciprocamente, riducendo la sensibilità a condizioni particolari o a errori di addestramento. Tale approccio consente generalmente di ottenere una migliore capacità di generalizzazione e una maggiore stabilità delle prestazioni rispetto a una singola rete neurale. Tuttavia, il metodo SET presenta una maggiore complessità sia nella fase di sviluppo sia nella fase operativa. È infatti necessario addestrare, validare e selezionare più classificatori, con conseguente aumento dei tempi di calcolo e delle risorse computazionali richieste. Inoltre, la struttura complessiva del sistema risulta meno immediata da interpretare rispetto al metodo LISHAE e più difficile da implementare rispetto a una singola rete neurale.

In conclusione, il metodo LISHAE privilegia semplicità e interpretabilità, risultando particolarmente adatto quando si dispone di una limitata quantità di dati storici. Il metodo NN offre una maggiore capacità predittiva grazie all'apprendimento automatico, ma richiede un'adeguata base dati e presenta una minore trasparenza. Il metodo SET, infine, rappresenta la soluzione più sofisticata e generalmente più robusta, poiché combina le previsioni di più classificatori, a fronte però di una maggiore complessità computazionale e implementativa.

3.4 Sistema di allerta in base alla posizione dei fulmini caduti

Per ogni edificio/situazione, la procedura da adottare nel caso di pericolo di fulmini è differente, in quanto cambia il tipo di esposizione delle persone che lavorano o si trovano comunque all'interno o nelle circostanze di tale edificio. In molte industrie di grandi dimensioni a livello strutturale, viene previsto un sistema di allerta fulmini molto basilare quanto funzionale. Esso prevede come unica variabile in ingresso la posizione degli ultimi fulmini rilevati. In questo modo si può valutare la velocità e la direzione del temporale e prevedere l'azione più congrua al livello di rischio in cui ci si trova [11].

Nella *Tabella 3.3* di seguito, vengono riportate delle procedure che sono state adottate nel tempo da strutture come industrie di grandi dimensioni e aeroporti (anche se in questo caso, data l'alta pericolosità esistono delle procedure ancora più restrittive) [11].

Tabella 3.3: Azioni di adottare in base alla distanza dell'ultimo fulmine rilevato

Distanza del fulmine	Livello di rischio	Azione
> 20 km	Verde	Nessuna restrizione
15 – 20 km	Giallo (preallerta)	Limitare attività esposte
10 – 15 km	Arancione	Sospendere lavori esterni non essenziali
< 10 km	Rosso	Evacuare personale in area sicura
0 – 30 min dopo l'ultimo fulmine	Rosso	Mantenere soospensione attività

Capitolo 4

4. Modello dinamico utilizzato

4.1 Introduzione al modello utilizzato

I modelli che sono stati analizzati nel capitolo precedente sono utili per la determinazione del rischio fulmini, tuttavia essi non sono stati utilizzati per varie motivazioni. Innanzitutto si è riscontrato un problema di disponibilità dei parametri richiesti in ingresso da questi modelli. Infatti le variabili necessarie ai modelli per il funzionamento corretto sono 12. L'ostacolo principale è stato quello di trovare un sito certificato che desse la possibilità di avviare uno scaricamento automatico e continuativo di tutti questi 12 parametri. Un altro problema riscontrato è stato quello della non disponibilità dei dati storici per tutte le variabili in questione, essenziali per la definizione del processo iterativo dei modelli in questione.

Infine, un limite di grande importanza è che questi modelli forniscono in uscita un valore di rischio fulmini che però si discosta totalmente da quello definito dalla norma CEI EN 62305 che è stata presa come riferimento per questo progetto di tesi. Questo risulta essere un problema perché non è possibile confrontare il valore di rischio ottenuto con il valore di rischio tollerabile definito dalla norma.

Per questo si è pensato di ricercare un modello matematico con il quale fosse possibile calcolare la probabilità di caduta fulmini in un'area geografica di 1 km^2 in modo dinamico, quindi utilizzando come dati in ingresso variabili il cui valore viene aggiornato nel tempo.

Il modello matematico utilizzato è il modello di regressione logistica multipla.

4.2 Modello di regressione logistica multipla

La regressione logistica multipla è un modello statistico utilizzato per studiare la relazione tra una variabile di risposta binaria e un insieme di variabili esplicative. La variabile dipendente assume due possibili valori, ad esempio successo/fallimento, presenza/assenza di malattia, acquisto/non acquisto. L'obiettivo del modello è stimare la probabilità che si verifichi l'evento di interesse

in funzione delle caratteristiche osservate. Quindi questo modello risulta particolarmente funzionale al calcolo della probabilità che cada un fulmine o meno, in quanto quello che si sta analizzando è un evento binario [12].

Nuovi studi, che si pongono come obiettivo il calcolo della probabilità di fulmini, si basano su un modello di regressione logistica multipla.

4.2.1 Spiegazione matematica del modello

Nella regressione logistica multipla, si modella la probabilità di un evento binario $Y \in \{0, 1\}$, tale che:

- $Y = 1$ se l'evento si verifica;
- $Y = 0$ se l'evento non si verifica.

Indichiamo con $p(X)$ la probabilità che l'evento si verifichi dato il vettore delle covariate $X = (X_1, \dots, X_p)$:

$$P(Y = 1 | X) = p(X)$$

Poiché una probabilità deve essere compresa tra 0 e 1, non è opportuno modellarla direttamente come una combinazione lineare delle covariate.

Per superare questo problema si introduce il concetto di odds (rapporto di probabilità):

$$odds(X) = \frac{p(X)}{1 - p(X)}$$

Le odds rappresentano il rapporto tra la probabilità che l'evento si verifichi e la probabilità che non si verifichi [12].

Esempi di calcolo degli odds

Di seguito vengono riportati alcuni esempi utili per capire, a partire da una probabilità p definita, come varia il rapporto tra la probabilità che l'evento si verifichi e la possibilità che l'evento non si verifichi:

- $p = 0.5 \rightarrow odds = 1$ (evento e non evento equiprobabili);
- $p = 0.2 \rightarrow odds = 0.25$ (evento 1 volta ogni 4 non-eventi);
- $p = 0.8 \rightarrow odds = 4$ (evento 4 volte più probabile del non-evento).

Applicando il logaritmo alle odds si ottiene la trasformazione logit:

$$\log\left(\frac{p(X)}{1-p(X)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_P X_P$$

dove:

- β_0 è l'intercetta, ossia il valore del log-odds quando tutte le variabili valgono zero;
- β_j rappresenta l'effetto della variabile X_j sul logaritmo delle odds;
- $X_1, \dots, X_P$ sono le variabili esplicative.

Un coefficiente positivo indica che all'aumentare della covariata aumenta la probabilità dell'evento, mentre un coefficiente negativo suggerisce una diminuzione della probabilità. In particolare, mantenendo costanti tutte le altre variabili, un incremento unitario di X_j modifica il log-odds di una quantità pari a β_j .

Questa equazione costituisce la formulazione fondamentale della regressione logistica multipla.

Risolvendo l'equazione precedente rispetto a $p(X)$, si ottiene la funzione logistica:

$$p(X) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_P X_P)}}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_P X_P)}$$

oppure, in forma equivalente:

$$p(X) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_P X_P)}}$$

Questa funzione garantisce che le probabilità stimate siano sempre comprese tra 0 e 1. Per questo progetto il punto di partenza è questo modello matematico, che è stato adattato allo studio del rischio fulmini per i lavoratori inserendo le variabili di interesse [13].

4.3 Variabili per il modello

Le variabili atmosferiche che influenzano la probabilità di caduta fulmini sono molte, come è stato descritto nei modelli analizzati nel *Capitolo 3*. Per il modello di regressione logistica multipla utilizzato sono state scelte tre variabili in grado di descrivere lo stato di instabilità dell'atmosfera sotto diversi punti di vista.

L'obiettivo di questa tesi è il calcolo di un rischio fulmini dinamico pertanto è necessario riuscire ad accedere in modo continuativo ai valori aggiornati delle variabili scelte ogni volta che il rischio viene calcolato. Quindi, la scelta di queste variabili è stata influenzata dalla possibilità di scaricamento dei rispettivi valori più recenti.

Le variabili scelte sono le seguenti:

- Stima della quantità di pioggia che cade al suolo in millimetri all'ora (SRI);
- Misura della riflettività meteorologica (VMI);
- Posizione degli ultimi fulmini caduti rilevati.

In relazione a quanto detto nelle righe precedenti, queste variabili oltre ad essere ottimi indicatori di instabilità atmosferica, sono parametri il cui accesso, ai valori più recenti, è relativamente semplice ed è possibile farlo in modo continuativo.

4.3.1 Precipitazione al suolo in un'ora di tempo (SRI)

Questo parametro è utile per determinare con accuratezza la probabilità di caduta fulmini in quanto è molto usuale che a fenomeni di fulmini siano associati fenomeni di precipitazione, più o meno violenti.

Con SRI (Surface Rainfall Intensity) si intendono i millimetri di pioggia che si accumulerebbero al suolo dopo un'ora di pioggia con costante intensità. L'unità di misura di questa variabile è millimetri all'ora (mm/h).

Questa variabile è disponibile allo scaricamento con valori aggiornati ogni 10 minuti sulla Piattaforma Radar del Dipartimento della Protezione Civile [14].

Nella *Tabella 4.1* vengono riportati valori tipici del parametro SRI riferiti a situazioni differenti di instabilità atmosferica.

Tabella 4.1: Valori tipici di intensità di precipitazione stimata al suolo dal radar (SRI)

Valore [mm/h]	Condizione
0	Nessuna pioggia
0 – 2	Pioggia molto debole
2 – 10	Pioggia debole – moderata
10 – 30	Pioggia intensa
30 – 50	Pioggia molto intensa
50 – 100	Rovescio molto forte
> 100	Temporale severo

Nella *Figura 4.1*, è riportato un estratto della Piattaforma Radar della Protezione Civile nel quale è ben visibile la correlazione tra la presenza di fulmini in corrispondenza dei valori più elevati (macchie più scure) del parametro SRI.

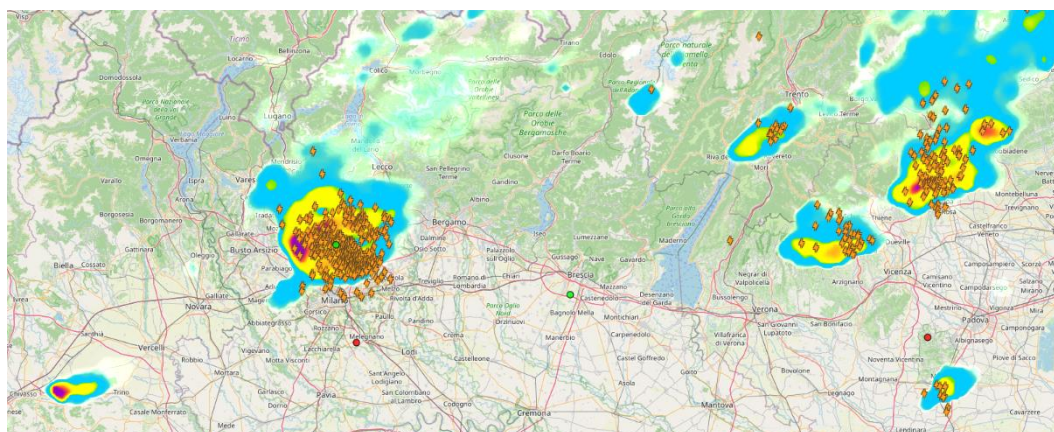


Figura 4.1: Correlazione tra presenza di fulmini e alti valori del parametro SRI

4.3.2 Riflettività meteorologica (VMI)

Il VMI (Vertical Maximum Intensity) rappresenta il massimo valore di riflettività radar rilevato lungo l'intera colonna atmosferica sopra un determinato punto della mappa. Questo parametro è particolarmente utile per individuare i nuclei temporaleschi più intensi e valutare il grado di sviluppo verticale delle celle convettive. Valori elevati di VMI sono spesso associati a temporali più vigorosi,

nei quali aumenta la probabilità di fenomeni elettrici come i fulmini, oltre che di precipitazioni intense e, in alcuni casi, grandine. Il VMI viene espresso in dBZ (decibel di riflettività), un'unità che misura l'intensità del segnale radar riflesso dalle idrometeore (gocce di pioggia, grandine, neve, ecc.) presenti nell'atmosfera.

La misura della variabile VMI viene eseguita a diverse altezze della nube e poi viene considerato solamente il valore rilevato più elevato.

Questa variabile è disponibile allo scaricamento con valori aggiornati ogni 10 minuti sulla Piattaforma Radar del Dipartimento della Protezione Civile [14].

Nella *Tabella 4.2* vengono riportati valori tipici del parametro VMI riferiti a situazioni differenti di instabilità atmosferica.

Tabella 4.2: Valori tipici di riflettività lungo tutta la colonna verticale della nube (VMI)

Valore [dBz]	Condizione
< 20	Nuvole deboli
20 – 30	Pioggia debole
30 - 40	Pioggia moderata
40 - 50	Roveschi intensi
50 - 60	Temporal forti
> 60	Temporal severi, possibile grandine

Nella *Figura 4.2*, è riportato un estratto della Piattaforma Radar della Protezione Civile nel quale è ben visibile la correlazione tra la presenza di fulmini in corrispondenza dei valori più elevati (macchie più scure) del parametro VMI.

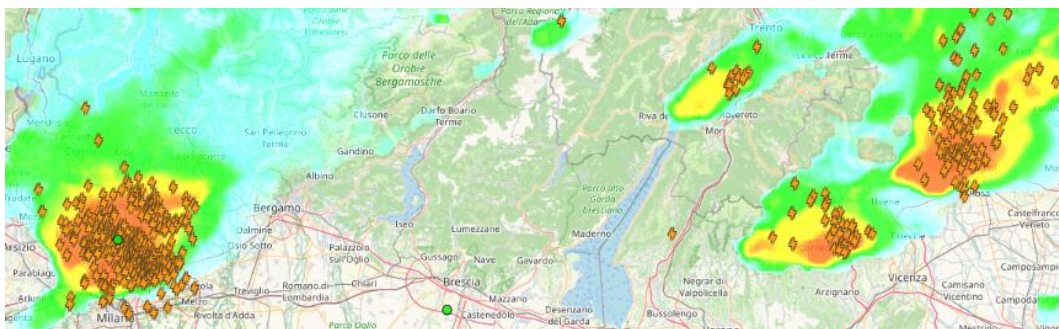


Figura 4.2: Correlazione tra presenza di fulmini e alti valori del parametro VMI

4.3.3 Posizione degli ultimi fulmini caduti

La posizione degli ultimi fulmini caduti che sono stati rilevati è forse la variabile più importante per la previsione della probabilità di caduta di nuovi fulmini. Questo perché è intuitivo pensare che se nell'area di interesse sono stati rilevati fulmini caduti, allora è quasi sicuro che la posizione di interesse per lo studio, sia interessata da un temporale. Minore è la distanza dall'ultimo fulmine rilevato rispetto alla posizione geografica in cui si vuole calcolare la probabilità di caduta fulmini, e più la probabilità di avere un fulmine nell'area di interesse aumenta. Viceversa maggiore è la distanza dall'ultimo fulmine rilevato rispetto alla posizione geografica in cui si vuole calcolare la probabilità di caduta fulmini, e più la probabilità di avere un fulmine nell'area di interesse diminuisce perché significa che molto probabilmente non ci si trova in una situazione di instabilità atmosferica. Questa variabile è disponibile allo scaricamento con valori aggiornati ogni 15 minuti sulla Piattaforma EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) [15].

Nella *Figura 4.3* viene riportato un estratto della mappa disponibile sulla piattaforma EUMETSAT, dove vengono visualizzati i fulmini caduti nell'ultimo periodo di rilevazione. Si vedono delle aree caratterizzate da un colore più scuro che sono quelle in cui è stata rilevata un'attività elettrica maggiore, e poi si notano delle aree con colori più chiari che invece sono quelle in cui è stata rilevata un'attività elettrica minore.

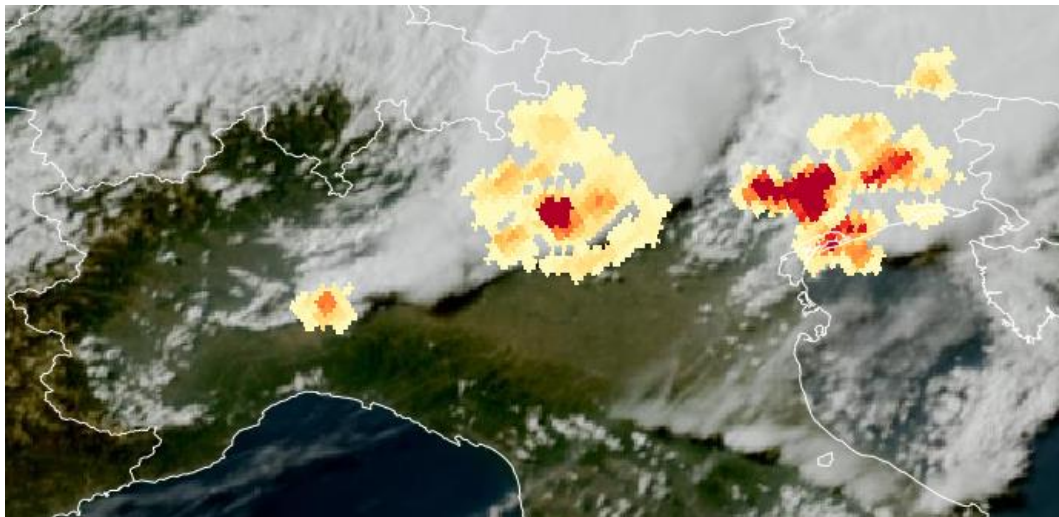


Figura 4.3: Visualizzazione dei fulmini rilevati caduti

4.4 Modello applicato al caso studio

Nello studio preso in esame in questa tesi, questo modello che si pone come obiettivo lo studio di un evento binario $Y \in \{0, 1\}$, è ottimale [13]. Nel caso considerato l'obiettivo è quello di calcolare la probabilità di caduta di almeno un fulmine. Nello specifico è stata fatta una scelta di questo tipo:

- $Y = 1 \rightarrow$ fulmine che cade;
- $Y = 0 \rightarrow$ fulmine che non cade.

4.4.1 Equazione del modello

Di seguito viene riportata l'equazione del modello di regressione logistica multipla, nella quale sono state inserite le variabili descritte precedentemente, utili per definire la probabilità di caduta fulmini al km^2 valida per 15 minuti dall'istante in cui è stato effettuato il calcolo.

$$p(t) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 SRI + \beta_2 VMI - \beta_3 D)}}$$

È possibile fare questo perché le variabili misurate (SRI, VMI e posizione dei più recenti fulmini caduti) in un certo istante di tempo, non solo sono utili per conoscere il livello di instabilità dell'atmosfera in quell'istante di tempo, ma possono rivelare informazioni utili anche per capire come si evolverà lo stato di instabilità dell'atmosfera nei successivi 15 minuti [13].

4.4.2 Definizione dei parametri β

Ciò che dobbiamo ancora definire sono i coefficienti β . Ogni β_j indica quanto incide ognuna delle variabili inserite nell'equazione. Quindi di fatto questi coefficienti li possiamo considerare come dei pesi.

I fattori β devono essere ricavati tramite una regressione logistica di dati storici molto vasta. Devono essere considerate molte situazioni nelle quali, oltre al valore di ogni variabile che concorre al calcolo della probabilità di caduta fulmini, si deve osservare se nei 15 minuti successivi alla misurazione delle variabili sono stati rilevati dei fulmini o meno. In questo modo, tramite una regressione logistica dei dati scaricati e dei risultati che sono attesi dal calcolo della probabilità, è possibile stimare i valori dei coefficienti β in modo tale che questi soddisfino quanti più casi

studio possibili. Questo è quello che in letteratura viene anche definito come addestramento del modello.

Nella trattazione proposta, non avendo a disposizione dati storici per tutte e tre le variabili considerate, questa regressione logistica è stata fatta su un numero di casi studio molto più ristretto. L'obiettivo, conoscendo le variabili di ingresso e il risultato atteso, è stato trovare tramite la regressione logistica i valori dei parametri β . Nello specifico sono stati considerati casi studio, relativi a luoghi, date e orari differenti, per i quali sono state rilevate le variabili di ingresso del modello, ovvero i valori delle variabili SRI e VMI e la distanza del punto di interesse dall'ultimo fulmine caduto. Per gli stessi casi studio è stato definito il risultato atteso, in forma binaria (1 per fulmine rilevato, 0 per fulmine non rilevato), basandosi sulla rilevazione o meno di fulmini all'interno del chilometro quadrato in cui si trova il punto di interesse, nei quindici minuti successivi alla misurazione dei dati di ingresso utilizzati. Questo procedimento ha portato alla definizione di questi valori per i rispettivi coefficienti:

- $\beta_0 = -2.10$
- $\beta_{SRI} = 0.020$
- $\beta_{VMI} = 0.048$
- $\beta_D = -0.105$

Il valore β_0 è definito valore di intercetta. Il suo scopo è far convergere il modello ad una probabilità molto bassa, quando le variabili SRI e VMI assumono valore nullo e quando non viene rilevato alcun fulmine caduto nei minuti precedenti. I valori dei coefficienti β sono definiti dal modello di regressione logistica. Si nota come il parametro β_D risulti essere più elevato rispetto ai medesimi valori riferiti alle variabili SRI e VMI. Questo sia perché si è voluto dare più importanza alla variabile che definisce la distanza del fulmine rilevato più vicino al punto di interesse, sia perché nel caso di una situazione di cella temporalesca, i valori delle variabili SRI e VMI risultano essere molto elevati, mentre la variabile D assume valori molto meno rilevanti.

Come detto, il coefficiente β_0 è il valore del log-odds quando le variabili SRI e VMI assumono valore nullo e quando non viene rilevato alcun fulmine caduto nei minuti precedenti. In realtà nel caso in cui il punto considerato non si trovi all'interno di una cella temporalesca, ci si aspetta che i valori delle variabili SRI e VMI siano molto limitati mentre ci si aspetta un valore molto elevato per la variabile D, perché è molto probabile che la distanza dell'ultimo fulmine caduto rilevato nei minuti precedenti dal punto di interesse sia molto elevata. In questo caso la componente

del log-odds relativa alla distanza D assume un valore molto rilevante che porta al calcolo di un valore della probabilità quasi irrilevante da parte del modello.

4.4.3 Indice di Poisson

Con il modello sopra descritto si calcola la probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato in 15 minuti. L'idea di questo progetto si basa proprio sul calcolo di tale probabilità come punto di partenza per il calcolo del rischio fulmini per i lavoratori. Questo concetto di probabilità di caduta fulmini calcolata a partire da variabili meteorologiche si discosta in modo significativo da quanto definito dalla norma CEI EN 62305, che si occupa del calcolo di rischio fulmini a partire dal numero medio di fulmini che colpiscono il suolo all'anno per chilometro quadrato (*fulmini / km²* anno*).

Per questo motivo si è cercato di trovare un modo per ricollegarsi a quanto descritto dalla norma CEI EN 62305, proprio per questo motivo è stato introdotto il concetto di indice di Poisson. A partire dalla probabilità di caduta fulmini calcolata dal modello precedentemente descritto, l'indice di Poisson (λ) identifica il numero di eventi pericolosi attesi in un'ora se le condizioni meteorologiche rimanessero invariate per questo lasso di tempo [16].

Di seguito viene riportata l'equazione per il calcolo dell'indice di Poisson.

$$\lambda(t) = -\frac{1}{\Delta t} \ln(1 - p(t))$$

dove:

- $\lambda(t)$ è l'indice di Poisson (*fulmini / km²* ora*);
- $p(t)$ è la probabilità stimata dal modello logistico;
- Δt è l'intervallo di tempo su cui è valido il valore di probabilità calcolato, nel caso in questione è pari a 15 minuti, ossia 0.25 ore.

4.4.4 Numero di fulmini attesi nei 15 minuti

L'obiettivo, in questa parte del progetto, è quello di riavvicinarsi a quanto definito dalla norma CEI EN 62305, questo perché una volta calcolato il rischio fulmini per il lavoratore considerato, tale rischio dovrà essere confrontato con il valore di rischio tollerabile per capire se il soggetto in questione si trova in una situazione di pericolo o meno.

A tal proposito, il calcolo dell'indice di Poisson è stato solo un passaggio intermedio per arrivare a definire il numero di fulmini attesi nei 15 minuti (N_{g15}) la cui unità di misura è fulmini al chilometro quadrato in 15 minuti (*fulmini / km²* 15'*).

Di seguito viene riportata l'equazione utile per il calcolo della variabile N_{g15} .

$$N_{g15} = \lambda(t) * \Delta t$$

dove:

- N_{g15} è il numero di eventi pericolosi attesi in 15 minuti;
- $\lambda(t)$ è l'indice di Poisson (*fulmini / km²* ora*);
- Δt è l'intervallo di tempo su cui è valido il valore di probabilità calcolato, nel caso in questione è pari a 15 minuti, ossia 0.25 ore.

Questa equazione permette di effettuare il passaggio dal numero di eventi pericolosi attesi in un'ora (λ) al numero di fulmini attesi nei 15 minuti successivi al calcolo. L'obiettivo è riportarsi al calcolo del numero di fulmini attesi nei 15 minuti, perché i valori misurati delle variabili meteorologiche SRI e VMI, e della distanza dall'ultimo fulmine caduto con le quali è stata calcolata la probabilità di caduta fulmini, hanno validità predittiva per i 15 minuti successivi alla misurazione.

Il numero di fulmini attesi nei 15 minuti è stato calcolato a partire da un modello di regressione logistica, quindi non è un valore misurato sperimentalmente come fatto dalla norma CEI EN 62305.

Il numero di fulmini attesi nei 15 minuti è utile per definire le componenti di rischio legate alla perdita di vite umane con le equazioni definite dalla norma, come descritto nelle sezioni successive.

4.5 Calcolo dei numeri di eventi pericolosi

Il numero di fulmini attesi nei 15 minuti non viene utilizzato direttamente per il calcolo delle componenti di rischio, ma viene inserito all'interno delle equazioni utili per calcolare il numero di eventi pericolosi relativo ad ogni componente di rischio.

4.5.1 Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_D)

Il numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura (N_D) è utilizzato per il calcolo: della componente di rischio R_A (danno ad esseri viventi per fulmine sulla struttura), della componente di rischio R_B (danno materiale alla

struttura per fulmine sulla struttura) e della componente di rischio R_C (guasto di apparati del servizio per fulmine sulla struttura).

Di seguito viene riportata l'equazione per il calcolo del numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura (N_D).

$$N_D = N_g * A_d * C_d * 10^{-6}$$

dove:

- N_D è il numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura;
- N_g è il numero di fulmini attesi nei 15 minuti (*fulmini / km² * 15* ');
- A_d è l'area di raccolta equivalente della struttura (m²);
- C_d è il fattore di localizzazione della struttura [Tabella A.1, CEI EN 62305-2].

4.5.2 Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_M)

Il numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità della struttura (N_M) è utilizzato per il calcolo della componente di rischio R_M (guasto di impianti interni per fulmine in prossimità della struttura).

Di seguito viene riportata l'equazione per il calcolo del numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità della struttura (N_M).

$$N_M = \frac{1}{k} * N_g * A_M * 10^{-6}$$

dove:

- N_M è il numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità della struttura;
- k è un fattore fornito dal Lightning Location System (LLS);
- N_g è il numero di fulmini attesi nei 15 minuti (*fulmini / km² * 15* ');
- A_M è l'area di raccolta equivalente dei fulmini che colpiscono in prossimità della struttura (m²).

4.5.3 Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_{DJ})

Il numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura all'estremità lontana della linea (N_{DJ}) è utilizzato per il calcolo: della componente di rischio R_U (danno ad esseri viventi per fulmine sul servizio connesso), della componente di rischio R_V (danno materiale alla struttura per fulmine sul servizio connesso) e della componente di rischio R_W (guasto di apparati del servizio per fulmine sul servizio). Di seguito viene riportata l'equazione per il calcolo del numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura all'estremità lontana della linea (N_{DJ}).

$$N_{DJ} = N_g * A_{DJ} * C_{DJ} * C_T * 10^{-6}$$

dove:

- N_{DJ} è il numero di eventi pericolosi per fulminazione diretta sulla struttura all'estremità lontana della linea;
- N_g è il numero di fulmini attesi nei 15 minuti (*fulmini / km² * 15'*);
- A_{DJ} è l'area di raccolta equivalente della struttura adiacente (m²);
- C_{DJ} è il fattore di localizzazione della struttura adiacente [Tabella A.1, CEI EN 62305-2];
- C_T è il fattore di tipologia di linea [Tabella A.3, CEI EN 62305-2].

4.5.4 Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_L)

Il numero di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio (N_L) è utilizzato per il calcolo: della componente di rischio R_U (danno ad esseri viventi per fulmine sul servizio connesso), della componente di rischio R_V (danno materiale alla struttura per fulmine sul servizio connesso) e della componente di rischio R_W (guasto di apparati del servizio per fulmine sul servizio).

Di seguito viene riportata l'equazione per il calcolo del numero di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio (N_L).

$$N_L = N_g * A_L * C_I * C_E * C_T * 10^{-6}$$

dove:

- N_L è il numero di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio;

- N_g è il numero di fulmini attesi nei 15 minuti (*fulmini / km² * 15*);
- A_L è l'area di raccolta equivalente dei fulmini che colpiscono la linea (m²);
- C_I è il fattore di installazione della linea [Tabella A.2, CEI EN 62305-2];
- C_E è il fattore tipo di linea [Tabella A.3, CEI EN 62305-2];
- C_T è il fattore ambientale [Tabella A.4, CEI EN 62305-2].

4.5.5 Calcolo del numero di eventi pericolosi (N_I)

Il numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità del servizio (N_I) è utilizzato per il calcolo della componente di rischio R_Z (guasto di impianti interni per fulmine in prossimità del servizio).

Di seguito viene riportata l'equazione per il calcolo del numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità del servizio (N_I).

$$N_I = \frac{1}{k} * N_g * A_I * C_I * C_E * C_T * 10^{-6}$$

dove:

- N_L è il numero di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità del servizio;
- k è un fattore fornito dal Lightning Location System (LLS);
- N_g è il numero di fulmini attesi nei 15 minuti (*fulmini / km² * 15*);
- A_I è l'area equivalente di raccolta delle scariche a terra in prossimità della linea (m²);
- C_I è il fattore di installazione [Tabella A.2, CEI EN 62305-2];
- C_E è il fattore tipo di linea [Tabella A.3, CEI EN 62305-2];
- C_T è il fattore ambientale [Tabella A.4, CEI EN 62305-2].

4.6 Calcolo delle probabilità di danno

Le equazioni utili per il calcolo delle componenti di rischio relative alla perdita di vite umane, sono già state descritte nel *Capitolo 2*, nel quale è stato riportato quanto definito dalla norma CEI EN 62305 a tal proposito.

In questa sezione vengono analizzate le equazioni da utilizzare per il calcolo della probabilità di danno relativa ad ogni componente di rischio.

4.6.1 Calcolo della probabilità di danno (P_A)

La probabilità di danno ad esseri viventi per fulmine sulla struttura (P_A) compare nel calcolo della componente di rischio R_A .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_A).

$$P_A = P_{LPS} * P_{AM} * r_t * P_{TWS}$$

dove:

- P_A è la probabilità di danno ad esseri viventi per fulmine sulla struttura;
- P_{LPS} è la probabilità, in funzione del Lightning Protection Level (LPL), delle misure di protezione delle aree esposte della struttura contro un fulmine [Tabella B.3, CEI EN 62305-2];
- P_{AM} è la probabilità che un fulmine su una struttura causi danni dovuti a tensioni di contatto e di passo, in base alle diverse misure di protezione [Tabella B.1, CEI EN 62305-2];
- r_t è il fattore di riduzione in funzione del tipo di superficie del terreno o del pavimento [Tabella B.2, CEI EN 62305-2];
- P_{TWS} è la probabilità che un sistema di allarme temporale (TWS) non rilevi un evento correlato a un fulmine nell'area bersaglio.

4.6.2 Calcolo della probabilità di danno (P_B)

La probabilità di danno materiale in un edificio per fulmine sulla struttura (P_B) compare nel calcolo della componente di rischio R_B .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_B).

$$P_B = P_S * P_{LPS} * r_f * r_p$$

dove:

- P_B è la probabilità di danno materiale in un edificio per fulmine sulla struttura;
- P_S è la probabilità che una scarica elettrica in una struttura provochi scintille pericolose [Tabella B.4, CEI EN 62305-2];
- P_{LPS} è la probabilità, in funzione del Lightning Protection Level (LPL), delle misure di protezione delle aree esposte della struttura contro un fulmine [Tabella B.3, CEI EN 62305-2];
- r_f è il fattore di riduzione in funzione del rischio di incendio o esplosione della struttura. [Tabella B.6, CEI EN 62305-2];
- r_p è il fattore di riduzione in funzione delle misure adottate per ridurre le conseguenze di un incendio [Tabella B.5, CEI EN 62305-2].

4.6.3 Calcolo della probabilità di danno (P_C)

La probabilità di danno di un impianto interno per fulmine sulla struttura (P_C) compare nel calcolo della componente di rischio R_C .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_C).

$$P_C = P_{SPD} * C_{LD}$$

dove:

- P_C è la probabilità di danno di un impianto interno per fulmine sulla struttura;
- P_{SPD} dipende dal sistema SPD, conforme alla norma IEC 62305-4, e dalle caratteristiche del sistema interno [Tabella B.7/Tabella B.8, CEI EN 62305-2];
- C_{LD} è un fattore che dipende dalle condizioni di schermatura, messa a terra e isolamento della linea a cui è collegato il sistema interno [Tabella B.9, CEI EN 62305-2].

4.6.4 Calcolo della probabilità di danno (P_M)

La probabilità di danno di un impianto interno per fulmine in prossimità della struttura (P_M) compare nel calcolo della componente di rischio R_M .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_M).

$$P_M = P_{SPD} * P_{MS}$$

dove:

- P_M è la probabilità di danno di un impianto interno per fulmine in prossimità della struttura;
- P_{SPD} dipende dal sistema SPD, conforme alla norma IEC 62305-4, e dalle caratteristiche del sistema interno [Tabella B.7/Tabella B.8, CEI EN 62305-2];
- P_{MS} è ottenuto dal prodotto:

$$P_{MS} = (K_{S1} * K_{S2} * K_{S3})^2$$

con K_{S1} che tiene conto dell'efficacia di schermatura della struttura e del sistema LPS, K_{S2} che tiene conto dell'efficacia delle schermature interne alla struttura e K_{S3} che tiene conto delle caratteristiche del cablaggio interno [Tabella B.10, CEI EN 62305-2].

4.6.5 Calcolo della probabilità di danno (P_U)

La probabilità di danno ad esseri viventi per fulmine sul servizio connesso alla struttura (P_U) compare nel calcolo della componente di rischio R_U .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_U).

$$P_U = P_{AM} * P_{EB} * P_{LD} * P_{TWS} * C_{LD} * r_t$$

dove:

- P_U è la probabilità di danno ad esseri viventi per fulmine sul servizio connesso alla struttura;

- P_{AM} è la probabilità che un fulmine su una struttura causi danni dovuti a tensioni di contatto e di passo, in base alle diverse misure di protezione [Tabella B.1, CEI EN 62305-2];
- P_{EB} dipende dalla messa a terra equipotenziale conforme alla norma IEC 62305-3 [Tabella B.13, CEI EN 62305-2];
- P_{LD} è la probabilità di guasto dei sistemi interni a causa di una scarica elettrica sulla linea collegata, in funzione delle caratteristiche della linea [Tabella B.11/Tabella B.12, CEI EN 62305-2];
- P_{TWS} è la probabilità che un sistema di allarme temporale (TWS) non rilevi un evento correlato a un fulmine nell'area bersaglio;
- C_{LD} è un fattore che dipende dalle condizioni di schermatura, messa a terra e isolamento della linea [Tabella B.9, CEI EN 62305-2];
- r_t è il fattore di riduzione in funzione del tipo di superficie del terreno o del pavimento [Tabella B.2, CEI EN 62305-2];

4.6.6 Calcolo della probabilità di danno (P_V)

La probabilità di danno materiale nella struttura per fulmine sul servizio connesso alla struttura (P_V) compare nel calcolo della componente di rischio R_V .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_V).

$$P_V = P_{EB} * P_{LD} * P_{TWS} * C_{LD} * r_f * r_p$$

dove:

- P_V è la probabilità di danno materiale nella struttura per fulmine sul servizio connesso alla struttura;
- P_{EB} dipende dalla messa a terra equipotenziale conforme alla norma IEC 62305-3 [Tabella B.13, CEI EN 62305-2];
- P_{LD} è la probabilità di guasto dei sistemi interni a causa di una scarica elettrica sulla linea collegata, in funzione delle caratteristiche della linea [Tabella B.11/Tabella B.12, CEI EN 62305-2];
- P_{TWS} è la probabilità che un sistema di allarme temporale (TWS) non rilevi un evento correlato a un fulmine nell'area bersaglio;
- C_{LD} è un fattore che dipende dalle condizioni di schermatura, messa a terra e isolamento della linea [Tabella B.9, CEI EN 62305-2];

- r_f è il fattore di riduzione in funzione del rischio di incendio o esplosione della struttura [Tabella B.6, CEI EN 62305-2];
- r_p è il fattore di riduzione in funzione delle misure adottate per ridurre le conseguenze di un incendio [Tabella B.5, CEI EN 62305-2].

4.6.7 Calcolo della probabilità di danno (P_W)

La probabilità di danno di un impianto interno per fulmine sul servizio connesso alla struttura (P_W) compare nel calcolo della componente di rischio R_W .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_W).

$$P_W = P_{SPD} * P_{TWS} * P_{LD} * C_{LD}$$

dove:

- P_W è la probabilità di danno di un impianto interno per fulmine sul servizio connesso alla struttura;
- P_{SPD} dipende dal sistema SPD, conforme alla norma IEC 62305-4, e dalle caratteristiche del sistema interno [Tabella B.7/Tabella B.8, CEI EN 62305-2];
- P_{TWS} è la probabilità che un sistema di allarme temporale (TWS) non rilevi un evento correlato a un fulmine nell'area bersaglio;
- P_{LD} è la probabilità di guasto dei sistemi interni a causa di una scarica elettrica sulla linea collegata, in funzione delle caratteristiche della linea [Tabella B.11/Tabella B.12, CEI EN 62305-2];
- C_{LD} è un fattore che dipende dalle condizioni di schermatura, messa a terra e isolamento della linea [Tabella B.9, CEI EN 62305-2].

4.6.8 Calcolo della probabilità di danno (P_Z)

La probabilità di danno di un impianto interno per fulmine in prossimità del servizio connesso alla struttura (P_Z) compare nel calcolo della componente di rischio R_Z .

Di seguito viene riportata la relativa equazione per il calcolo della probabilità di danno (P_Z).

$$P_Z = P_{SPD} * P_{TWS} * C_{LI}$$

dove:

- P_Z è la probabilità di danno di un impianto interno per fulmine in prossimità del servizio connesso alla struttura;
- P_{SPD} dipende dal sistema SPD, conforme alla norma IEC 62305-4, e dalle caratteristiche del sistema interno [Tabella B.7/Tabella B.8, CEI EN 62305-2];
- P_{TWS} è la probabilità che un sistema di allarme temporale (TWS) non rilevi un evento correlato a un fulmine nell'area bersaglio;
- C_{LI} è un fattore che dipende dalle condizioni di schermatura, messa a terra e isolamento della linea [Tabella B.9, CEI EN 62305-2].

4.7 Rischio tollerabile sui 15 minuti (R_{T15})

A questo punto, una volta definite le equazioni per determinare il numero di eventi pericolosi e la probabilità di danno per ogni componente di rischio, è possibile calcolare il valore di tutte le singole componenti di rischio, in modo tale da poter successivamente ottenere il rischio totale relativo alla perdita di vite umane (R_I).

Una volta calcolato il rischio totale relativo alla perdita di vite umane (R_I) valido per un intervallo di tempo di 15 minuti, perché calcolato a partire dalla probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato in 15 minuti, si deve valutare se il valore ottenuto è minore o maggiore del rischio tollerabile. La norma CEI EN 62305 prevede un valore di rischio tollerabile per perdita di vite umane, su base annua pari a 10^{-5} . L'idea di questo progetto è quella di valutare il rischio fulmini per i lavoratori in modo dinamico, quindi non su base annua come fatto dalla norma. Nello specifico con questa trattazione si ottiene un rischio di perdita di vite umane valutato su 15 minuti, quindi tale valore non può essere confrontato con il rischio tollerabile annuo definito dalla norma. Non essendo stati trovati in letteratura articoli o documenti scientifici su come ricavare un rischio tollerabile sui 15 minuti partendo da un rischio tollerabile annuo, si è deciso di fare un'approssimazione. Di seguito viene riportata l'equazione matematica.

$$R_{T15} = \frac{10^{-5}}{35040} = 2.85 * 10^{-10}$$

dove:

- R_{T15} è il rischio tollerabile per 15 minuti;
- 10^{-5} è il valore di rischio tollerabile annuo definito dalla norma CEI EN 62305;
- 35040 è il numero di intervalli di 15 minuti che compongono un anno.

In questo modo si è passati da un rischio tollerabile annuo ad un rischio tollerabile sui 15 minuti. Come detto precedentemente questo passaggio implica un'approssimazione rilevante. Infatti con la divisione del rischio tollerato annuo per il numero di intervalli di 15 minuti presenti in un anno, si assume che ogni intervallo di tempo di 15 minuti in un anno sia caratterizzato dalla stessa probabilità di formazione di temporali e quindi fulmini. Questo però non è vero, in quanto è noto che vi è una grande variazione della frequenza di fenomeni temporaleschi nelle diverse stagioni.

Questa approssimazione porta a definire il valore ricavato dall'equazione sopra descritta, non come un rischio tollerabile sui 15 minuti come fatto dalla norma su base annua, ma come una soglia di pericolo. Infatti, l'obiettivo di questo progetto è quello di allertare il lavoratore nel caso in cui si trovi in una situazione di pericolo.

Capitolo 5

5. Codice Python per il calcolo del rischio

5.1 Analisi codice Python

Per raggiungere l'obiettivo di questo progetto di tesi, ovvero calcolare il rischio fulmini per i lavoratori in modo continuativo e automatico utilizzando gli ultimi dati disponibili che descrivono lo stato dell'instabilità atmosferica, è stato creato un codice Python. Questo codice Python esegue le stesse operazioni descritte nel *Capitolo 4*, dallo scaricamento dei dati fino alla determinazione del rischio per i lavoratori, in modo automatico e continuativo.

Il codice presenta al suo interno 5 parti. Una volta avviato il codice, le 5 parti vengono eseguite tutte in modo automatico e continuativo fino a quando l'esecuzione non viene interrotta manualmente. Le uniche due variabili che, all'interno di questo codice, devono essere modificate in base al luogo in cui si trova il lavoratore da proteggere, sono:

- LAT_INPUT che identifica la latitudine a cui il lavoratore si trova ad operare;
- LON_INPUT che identifica la longitudine a cui il lavoratore si trova ad operare.

Una volta inseriti i valori esatti per queste due variabili, è possibile eseguire il codice Python e ogni 15 minuti verrà calcolato il rischio fulmini per il lavoratore in questione e nel caso questo superi il valore tollerabile verrà inviato un avviso di pericolo alla persona di cui si sta valutando il rischio.

Di seguito vengono analizzate più nel dettaglio le 5 parti da cui il codice è costituito.

5.1.1 Parte 1: Scaricamento dati radar

Questa parte di codice denominata `script1()`, implementa un sistema automatico e continuo per il download in tempo reale dei prodotti radar meteorologici della rete della Protezione Civile (RADAR-DPC), come ad esempio VMI e SRI. L'obiettivo principale è quello di intercettare i dati radar in continuo aggiornamento e di

scaricarli immediatamente su disco locale, rendendoli disponibili per successive analisi modellistiche.

Il funzionamento si basa su un'architettura a più componenti che lavorano in parallelo. Il primo elemento è un client WebSocket che si connette al server della Protezione Civile. Questo canale di comunicazione permette di ricevere in tempo reale notifiche ogni volta che viene generato un nuovo prodotto radar. Ogni messaggio contiene informazioni come il tipo di prodotto (ad esempio VMI o SRI) e l'istante temporale associato. Il sistema filtra questi messaggi mantenendo solo quelli relativi ai prodotti di interesse e scarta tutti gli altri.

Quando viene rilevato un prodotto valido, il sistema non scarica immediatamente il file, ma crea un "job" di download che viene inserito in una coda. Questa scelta è fondamentale perché consente di separare la fase di ricezione degli eventi dalla fase di download, evitando blocchi o rallentamenti nella connessione WebSocket. In questo modo, il sistema rimane sempre reattivo.

Una serie di thread worker dedicati si occupa poi di elaborare la coda dei job. Ogni worker prende un elemento dalla coda e interroga un'API REST della Protezione Civile per ottenere i dettagli del file da scaricare. In particolare, l'API restituisce una chiave identificativa del file e un URL temporaneo. Questo URL permette il download diretto del prodotto senza ulteriori autenticazioni.

Una volta ottenuto il link, il file viene scaricato in modo "streaming", cioè a blocchi, per evitare problemi di memoria nel caso di file di grandi dimensioni. Il sistema salva inizialmente il file con estensione temporanea e lo rinomina solo al termine del download, garantendo così che file incompleti non vengano considerati validi. Per evitare duplicazioni, il programma mantiene anche una struttura di deduplicazione basata su chiave composta da tipo di prodotto e timestep. In questo modo, anche se lo stesso evento viene ricevuto più volte dal WebSocket, il file viene scaricato una sola volta.

Il sistema include inoltre meccanismi di robustezza operativa. La connessione WebSocket viene mantenuta attiva tramite messaggi di mantenimento della connessione inviati periodicamente e, in caso di interruzione, viene automaticamente ristabilita con un meccanismo di riconnessione progressiva. Questo garantisce continuità operativa anche in caso di instabilità di rete o del server.

Infine, è presente un processo di pulizia della memoria che elimina periodicamente i riferimenti agli eventi più vecchi, evitando un consumo eccessivo di risorse durante esecuzioni prolungate.

In sintesi, il codice realizza una pipeline completamente automatizzata che va dalla ricezione in tempo reale degli eventi radar fino al salvataggio locale dei prodotti

meteorologici, combinando comunicazione WebSocket, API REST, download da storage remoto e gestione concorrente tramite multi-threading. Questo approccio permette di costruire un sistema efficiente per il monitoraggio continuo dell'attività radar e per l'acquisizione immediata dei dati meteorologici operativi.

5.1.2 Parte 2: Scaricamento dati fulminazione

Questa parte di codice denominata `script2()`, implementa un sistema di acquisizione automatica di dati relativi ai fulmini attraverso il servizio cloud di EUMETSAT. In particolare, utilizza la libreria “eumdac” per accedere al Data Store e accedere ad un dataset specifico identificato dal codice “EO:EUM:DAT:0691”, che contiene osservazioni satellitari relative alle scariche elettriche atmosferiche.

Il funzionamento del programma è basato su un ciclo infinito che esegue interrogazioni periodiche al database ogni cinque minuti. A ogni iterazione, viene definito un intervallo temporale mobile (gli ultimi 15 minuti rispetto al momento corrente) e un'area geografica di interesse, in questo caso l'insieme delle coordinate che descrivono l'intera area dell'Italia.

Per ogni ciclo, il sistema effettua una ricerca nel Data Store filtrando i prodotti disponibili in base alla finestra temporale e alla regione geografica. I prodotti restituiti rappresentano eventi di fulminazione rilevati. Ogni prodotto viene identificato tramite un ID univoco, che viene utilizzato per evitare duplicazioni attraverso una struttura dati di tipo set.

Se un prodotto non è già stato scaricato in precedenza, il sistema procede al download del file associato. Il file viene salvato in formato NetCDF (.nc), tipico dei dati meteorologici e satellitari, all'interno di una cartella locale predefinita. Il download avviene tramite apertura dello stream remoto fornito dal servizio EUMETSAT e copia diretta del contenuto su disco.

Per garantire robustezza e continuità operativa, il sistema gestisce eventuali errori durante il download senza interrompere l'esecuzione complessiva del programma. Dopo aver completato ogni ciclo di interrogazione e download, il programma entra in uno stato di attesa di cinque minuti prima di ripetere il processo, dato che è noto che è disponibile un nuovo file da scaricare solo ogni 10 minuti.

5.1.3 Parte 3: Conversione dei dati SRI e VMI

Questa parte di codice denominata `script3()`, realizza un sistema automatizzato di conversione dei prodotti radar meteorologici, delle variabili SRI (Surface Rainfall Intensity) e VMI (Vertical Maximum Intensity). Il sistema monitora continuamente

due directory locali contenenti file radar in formato GeoTIFF e, non appena nuovi file vengono rilevati, li inserisce in una coda di elaborazione per la conversione.

L'architettura del programma è basata su multi-threading: un thread principale di scansione individua i nuovi file disponibili nelle cartelle di input, mentre più thread worker paralleli si occupano della conversione dei file. Questo approccio consente di gestire in modo efficiente grandi volumi di dati senza bloccare il processo di acquisizione.

La fase centrale del sistema consiste nella trasformazione dei dati raster in formato vettoriale tabellare. Ogni pixel del raster viene convertito in un punto geografico associato a latitudine, longitudine e valore della variabile rilevata dal radar. Per ottenere questo risultato, il codice utilizza le librerie rasterio e pyproj, che permettono rispettivamente la lettura dei GeoTIFF e la trasformazione delle coordinate da un sistema proiettato locale al sistema geografico WGS84 (EPSG:4326).

Durante questa conversione, il sistema estrae i valori della griglia radar, elimina i pixel non validi (ad esempio valori nulli o nodata) e applica un filtro spaziale che mantiene solo i punti ricadenti all'interno dell'area geografica italiana. Il risultato finale viene strutturato in un DataFrame tramite la libreria pandas e salvato in formato CSV.

Per garantire efficienza operativa, il sistema utilizza una struttura a coda (queue.Queue) che coordina il passaggio dei file tra il processo di scansione e i worker di elaborazione. Inoltre, viene mantenuto un insieme di file già processati per evitare duplicazioni. Il tutto è eseguito in modo continuo e asincrono, permettendo l'elaborazione in tempo reale dei nuovi dati man mano che vengono generati.

5.1.4 Parte 4: Conversione dei dati di fulminazione

Questa parte di codice denominata script4(), implementa una procedura automatizzata di gestione e conversione dei dati satellitari relativi ai fulmini, basata su file in formato NetCDF (.nc) compressi in archivi ZIP. L'obiettivo del sistema è trasformare i dati grezzi provenienti dalla fase di acquisizione in un formato tabellare (CSV), più adatto ad analisi statistiche, modellistiche o di integrazione con altri dataset meteorologici.

Il funzionamento del programma è organizzato come un ciclo continuo che monitora una directory locale contenente i file scaricati in precedenza. In particolare, il sistema ricerca costantemente nuovi file prodotti provenienti dalla fase di download e identifica automaticamente il file più recente sulla base della

data di modifica. Questa logica consente di lavorare in modalità real-time, processando i dati man mano che diventano disponibili.

Una volta individuato il file più recente, il sistema verifica il formato del contenuto. Se il file è compresso in formato ZIP, viene estratto in una directory temporanea; se invece si tratta già di un file NetCDF, viene semplicemente copiato nella cartella di estrazione. Successivamente, tra i file estratti viene selezionato quello di dimensione maggiore, che è quello che rappresenta il dataset principale contenente le osservazioni di fulminazione.

Il file NetCDF viene quindi aperto tramite la libreria xarray, che consente la gestione efficiente di dati multidimensionali tipici dei prodotti satellitari. Da questo dataset vengono estratte le variabili fondamentali necessarie alla descrizione degli eventi di fulminazione: il tempo del fulmine, la latitudine e la longitudine del punto di rilevazione. Queste variabili vengono organizzate in una struttura tabellare mediante la libreria pandas, dove ogni riga rappresenta un singolo evento.

Successivamente viene applicato un filtro spaziale per selezionare esclusivamente gli eventi ricadenti all'interno del dominio geografico italiano. Questo passaggio è fondamentale per garantire la coerenza spaziale dei dati con gli altri componenti utilizzati per l'analisi.

Il risultato della trasformazione viene salvato in formato CSV all'interno di una directory dedicata, con un nome file che include un timestamp di sistema. Questo permette di mantenere la tracciabilità temporale dei dataset generati ed evitare sovrascritture.

Dopo ogni ciclo di elaborazione, il programma esegue una pulizia delle cartelle di lavoro, eliminando i file temporanei sia nella directory di input sia in quella di estrazione.

Infine, il programma entra in uno stato di attesa di 5 minuti prima di avviare un nuovo ciclo di controllo, assicurando un aggiornamento continuo e regolare dei dati. Quindi, questo script realizza una fase di preprocessing automatizzato dei dati satellitari sui fulmini, convertendo file NetCDF in dataset tabellari, filtrati spazialmente e pronti per essere integrati con le altre variabili osservate. Questo passaggio rappresenta un elemento essenziale della pipeline complessiva, in quanto rende i dati satellitari immediatamente utilizzabili per analisi meteorologiche avanzate e per lo sviluppo di modelli di nowcasting della convezione elettrica.

5.1.5 Parte 5: Valutazione del rischio

Questa parte di codice denominata `script5()`, rappresenta la fase finale dell'intero codice, in cui i dati radar e satellitari precedentemente acquisiti ed elaborati vengono integrati nel modello adottato per la valutazione del rischio da fulminazione per le persone, con riferimento a un punto geografico specifico. Il sistema combina: osservazioni meteorologiche in tempo reale, il modello adottato per il calcolo del numero di fulmini attesi per km^2 nei successivi 15 minuti e formulazioni normative di rischio (CEI EN 62305) per produrre una stima quantitativa del rischio fulmini per le persone su base temporale di 15 minuti.

Il funzionamento del programma è organizzato come un ciclo continuo che si ripete ogni 15 minuti. Ad ogni iterazione, il sistema recupera i dati più recenti disponibili relativi alle tre variabili considerate: variabili radar (SRI e VMI) e dati sulla posizione degli ultimi fulmini caduti. Questi dati sono memorizzati localmente in file CSV generati dalle fasi precedenti della pipeline e vengono letti per identificare il valore più vicino alla posizione geografica di interesse.

Per ciascuna variabile viene ricercato il valore del punto considerato, ossia il punto che è stato definito prima di eseguire il codice con le variabili `LAT_INPUT` e `LON_INPUT`. In particolare, il sistema ricerca l'osservazione più vicina alle coordinate inserite dall'utente utilizzando la distanza geodetica (formula di Haversine). Per i dati radar (SRI e VMI) viene selezionato il valore di intensità associato al punto più vicino, mentre per i fulmini viene calcolata la distanza del fulmine più vicino rispetto alla posizione di interesse.

Una volta ottenute le variabili ambientali, il sistema applica il modello di regressione logistica multipla descritto nel *Capitolo 4*, per stimare la probabilità di occorrenza di fulmini nei successivi 15 minuti. Questo modello combina linearmente le variabili SRI, VMI e distanza dal fulmine tramite coefficienti empirici, producendo una probabilità compresa tra 0 e 1. Tale probabilità viene successivamente trasformata in un parametro di intensità temporale (N_{g15}) attraverso un modello di tipo Poisson, che consente di stimare il numero atteso di fulmini in un intervallo di 15 minuti.

Il valore ottenuto viene quindi utilizzato come input per il calcolo del rischio secondo la normativa CEI EN 62305, che descrive la valutazione del rischio da fulminazione in relazione alla perdita di vite umane. Il modello implementa diverse componenti di rischio, che rappresentano differenti modalità di danno. Queste componenti vengono calcolate separatamente per due scenari: un edificio universitario e un edificio rurale, caratterizzati da parametri di vulnerabilità e esposizione differenti, adottati come caso studio.

Il rischio totale viene ottenuto come somma delle singole componenti e viene confrontato con una soglia di tolleranza predefinita. In base a questo confronto, il sistema determina se il livello di rischio è accettabile oppure se supera la soglia di sicurezza, fornendo quindi una valutazione operativa dello stato di pericolosità atmosferica.

Infine, ogni ciclo di elaborazione produce un record che viene salvato in un file CSV, contenente la probabilità di fulminazione, il parametro di intensità Poisson e i valori di rischio calcolati. Questo consente di costruire una serie temporale del rischio e di monitorarne l'evoluzione.

In sintesi, questo script integra dati radar e satellitari osservativi all'interno di un quadro di riferimento probabilistico e normativo, producendo una stima del rischio di fulminazione su breve scala temporale. Rappresenta quindi il livello decisionale finale dell'intero codice, trasformando dati meteorologici grezzi in indicatori quantitativi di rischio utili per applicazioni di nowcasting.

Di seguito vengono descritte le funzioni principali create all'interno dello script5():

Funzione trova_più_vicino_radar

Questa funzione serve a trovare il pixel radar più vicino a una determinata posizione geografica e a restituire il valore associato a quel pixel. Nello specifico viene usata per trovare i valori delle variabili SRI e VMI associati al pixel radar più vicino alla posizione per cui si deve valutare il rischio per il lavoratore. Gli ingressi rischiesti da questa funzione sono:

- Il file .csv contenente i dati radar;
- La latitudine del punto di interesse;
- La longitudine del punto di interesse.

Funzione distanza_km

Questa funzione calcola la distanza geografica in chilometri tra due punti sulla superficie terrestre, conoscendone latitudine e longitudine. Nello specifico, tale funzione viene utilizzata per calcolare la distanza tra il punto di interesse, quello in cui si trova il lavoratore per cui si deve valutare il rischio fulmini, e il punto in cui è stato rilevato il fulmine caduto considerato. Utilizza la formula di Haversine, uno degli algoritmi più comuni per il calcolo delle distanze geodetiche, che considera la curvatura terrestre. Le variabili necessarie in ingresso a tale funzione, sono:

- Latitudine e longitudine della posizione geografica in cui si trova il lavoratore;

- Latitudine e longitudine della poizione geografica in cui è caduto il fulmine considerato.

Funzione trova_più_vicino_fulmine

Questa funzione serve a trovare il fulmine caduto più vicino alla posizione geografica in cui si trova il lavoratore per cui si vuole valutare il rischio fulmini e restituisce la distanza tra il punto di interesse e quel fulmine, misurata in km. All'interno di questa funzione, viene richiamata la funzione *distanza_km*, descritta precedentemente; infatti questa funzione serve a fare una generalizzazione per considerare le coordinate di tutti i fulmini caduti rilevati, per poi trovare il fulmine con distanza in chilometri minore rispetto al punto di interesse. Gli ingressi richiesti da questa funzione sono:

- Il file .csv contenente le coordinate dei fulmini caduti negli ultimi minuti;
- La latitudine del punto di interesse;
- La longitudine del punto di interesse.

Funzione probabilità_fulmini

Questa funzione implementa il modello di regressione logistica che stima una probabilità di fulmini a partire da tre variabili di ingresso, che sono:

- SRI ossia la stima della quantità di pioggia che cade al suolo in millimetri all'ora;
- VMI ossia la misura della riflettività meteorologica;
- D ossia la distanza in km del fulmine caduto più vicino alla posizione di interesse negli ultimi minuti.

Questa funzione restituisce, in uscita, la probabilità di caduta fulmini al km² nei successivi 15 minuti (p) dall'esecuzione del calcolo, un valore compreso tra 0 e 1. Questo valore di probabilità è l'ingresso della funzione *indice_poisson* implementata successivamente.

Funzione indice_poisson

Questa funzione trasforma la probabilità di caduta fulmini al km² valida su 15 minuti (p), calcolata dalla funzione *probabilità_fulmini* in un indice di Poisson (λ) che è la variabile che la funzione restituisce in uscita.

Funzione `fulmini_attesi_15min`

Questa funzione calcola il numero di eventi attesi nei 15 minuti successivi al calcolo. Per fare questo, la funzione utilizza come ingresso l'indice di Poisson (λ) e restituisce in uscita il numero di fulmini atteso nei 15 minuti successivi (N_{g15}).

Funzione `calcola_rischio_totale`

Questa funzione implementa un processo di calcolo del rischio a partire dal numero di fulmini atteso nei 15 minuti (N_{g15}), calcolato dalla funzione *fulmini_attesi_15min* definita in precedenza. Le equazioni utilizzate in questa parte di codice derivano direttamente da quanto definito a tal proposito dalla norma CEI EN 62305.

L'unica variabile di ingresso della funzione *calcola_rischio_totale* è l'indice di densità di fulmini (N_{g15}), mentre tutti gli altri parametri sono costanti definite all'interno della funzione. Il calcolo del rischio viene proposto per due strutture differenti: un edificio universitario in zona urbanizzata ed un edificio in zona rurale, questo per mettere in mostra come varia il calcolo del rischio, non solo in base al numero di fulmini attesi ma anche in base a tutti i valori delle costanti che descrivono ogni tipo di struttura.

Capitolo 6

6. Risultati

Nel *Capitolo 5* è stato analizzato il codice Python che è stato ideato per lo scopo di questo progetto di tesi. L'idea di questo capitolo è invece quella di mostrare un esempio di calcolo utilizzando le equazioni definite nei capitoli precedenti e di interpretare i risultati che si ottengono una volta che il codice Python viene eseguito, per capire quanto essi si avvicinano a quanto descritto dalla norma CEI EN 62305.

6.2 Esempi di calcolo

In questa sezione, vengono riportati due esempi di calcolo del rischio per perdita di vita umane: uno su base annua, seguendo quanto definito dalla norma CEI EN 62305 e uno valido su 15 minuti, calcolato a partire dal modello dinamico descritto nei capitoli precedenti. Ogni calcolo viene proposto sia per un edificio universitario sia per un edificio in zona rurale, questo per far notare come varia il valore di rischio in base al tipo di struttura e al tipo di zona in cui essa si trova. L'edificio universitario si trova in una zona urbanizzata. Le dimensioni scelte per questa struttura sono: lunghezza di 60 metri, larghezza di 30 metri e altezza di 20 metri. Per un edificio universitario, trovandosi in una zona urbanizzata, si suppone che sia circondato da strutture simili in quanto a dimensioni. Ipotizzando la struttura sia solitamente molto frequentata e che al suo interno vi siano componenti elettronici sensibili, è stato scelto un LPS di alta classe I. Da questi fattori dipendono i ragionamenti fatti per la scelta dei valori per i parametri utili alla definizione del rischio fulmini per i lavoratori.

L'edificio in zona rurale si trova in una zona isolata. Le dimensioni scelte per questa struttura sono: lunghezza di 120 metri, larghezza di 20 metri e altezza di 12 metri. Per un edificio in zona rurale, trovandosi in una zona isolata, si suppone che non sia circondato da molte strutture. Nel caso considerato si è fatta l'ipotesi che nei pressi di questa struttura se ne trovi soltanto un'altra di lunghezza di 20 metri, larghezza di 7 metri e altezza di 5 metri, quindi di dimensioni molto ridotte rispetto alla struttura da proteggere. Ipotizzando la struttura sia solitamente frequentata da poche persone e che al suo interno non vi siano componenti sensibili, è stato scelto un LPS di alta classe III. Da questi fattori dipendono i ragionamenti fatti per la

scelta dei valori per i parametri utili alla definizione del rischio fulmini per i lavoratori.

Per entrambi i casi, prima di calcolare tutte le componenti di rischio necessarie per definire il rischio di perdita di vite umane, devono essere definiti tutti i valori dei parametri che descrivono in modo approfondito il tipo di struttura cui ci si trova di fronte. Nella *Tabella 6.1*, per ogni parametro viene riportato il simbolo, una breve descrizione e il valore sia per il caso dell'edificio universitario sia per il caso dell'edificio in zona rurale.

Tabella 6.1: *Tabella riassuntiva dei parametri per l'edificio universitario e per l'edificio in zona rurale*

Simbolo	Spiegazione	Valore edificio universitario	Valore edificio in zona rurale
L_A	Fattore di perdita relativo alla perdita di vite umane per tensioni di contatto e di passo	10^{-2}	10^{-2}
L_U	Fattore di perdita relativo alla perdita di vite umane dovuta a incendio o esplosione	10^{-2}	10^{-2}
L_B	Fattore di perdita relativo ai guasti degli impianti interni causati dal LEMP	$2 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-3}$
L_V	Fattore di perdita relativo ai guasti degli impianti entranti causati dal LEMP	$2 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-3}$
A_L	Area di raccolta equivalente delle linee entranti nella struttura	$40 * 1000 \text{ m}^2$	$40 * 1000 \text{ m}^2$
A_D	Area di raccolta equivalente della struttura per fulmini diretti	0.023309 km^2	0.01655 km^2
A_{DJ}	Area di raccolta equivalente della struttura per fulmini nelle vicinanze	0.023309 km^2	$1.66 * 10^{-3} \text{ km}^2$

Risultati

C_D	Fattore di ubicazione della struttura rispetto all'ambiente circostante	0.5	1
C_{DJ}	Fattore di ubicazione per gli effetti dei fulmini nelle vicinanze della struttura	0.5	1
C_T	Fattore che tiene conto delle caratteristiche della linea entrante	1	1
C_I	Fattore che considera l'installazione e il percorso della linea entrante	0.3	0.3
C_E	Fattore che considera le caratteristiche ambientali della linea entrante	0.01	1
P_{LPS}	Probabilità che il sistema di protezione contro i fulmini (LPS) non prevenga il danno	0.05	0.1
P_{AM}	Probabilità di guasto degli impianti interni dovuto al LEMP	10^{-2}	10^{-3}
P_S	Probabilità che un fulmine provochi un danno fisico alla struttura	0.5	0.5
r_f	Fattore di riduzione del rischio dovuto alle misure antincendio	10^{-3}	10^{-3}
r_p	Fattore di riduzione del rischio dovuto alle misure di protezione delle persone	0.2	1
r_t	Fattore di riduzione del rischio dovuto a misure organizzative o di protezione specifiche	10^{-3}	10^{-2}
P_{TWS}	Probabilità che non sia presente o efficace un sistema di allerta temporali	1	1

P_{EB}	Probabilità di danno agli impianti dovuto ai collegamenti equipotenziali	0.02	0.05
P_{LD}	Probabilità di danno legata alle caratteristiche delle linee entranti	1	0.3
C_{LD}	Fattore correttivo relativo al tipo e alla posa delle linee entranti	1	1

6.1.1 Esempio di calcolo del rischio annuo

Per il calcolo del rischio fulmini annuo come definito dalla norma CEI EN 62305, si considera una densità di fulmini al suolo (N_g) pari a 3.93 fulmini/km²/anno, tipico della città di Brescia. Come esempio di calcolo è stata scelta la città di Brescia perché il confronto diretto tra il rischio annuo e il rischio su 15 minuti risulta essere particolarmente interessante. Di seguito vengono riportati gli esempi di calcolo sia per il caso di edificio universitario sia per il caso di edificio in zona rurale.

Edificio universitario

$$N_{DUNI} = N_g * A_{DUNI} * C_{DUNI} = 0.04580$$

$$N_{DJUNI} = N_g * A_{DJUNI} * C_{DJUNI} * C_{TUNI} = 0.04580$$

$$N_{LUNI} = N_g * A_{LUNI} * C_{IUNI} * C_{EUNI} * C_{TUNI} * 10^{-6} = 4.716 * 10^{-4}$$

$$P_{AUNI} = P_{LPSUNI} * P_{AMUNI} * r_{tUNI} * P_{TWSUNI} = 5 * 10^{-7}$$

$$P_{BUNI} = P_{SUNI} * P_{LPS} * r_{fUNI} * r_{pUNI} = 5 * 10^{-6}$$

$$P_{UUNI} = P_{AMUNI} * P_{EBUNI} * P_{LDUNI} * P_{TWSUNI} * C_{LDUNI} * r_{tUNI} = 2 * 10^{-7}$$

$$P_{VUNI} = P_{EB} * P_{LDUNI} * P_{TWSUNI} * C_{LDUNI} * r_{fUNI} * r_{pUNI} = 4 * 10^{-6}$$

$$R_{AUNI} = N_{DUNI} * P_{AUNI} * L_{AUNI} = 2.29 * 10^{-10}$$

$$R_{BUNI} = N_{DUNI} * P_{BUNI} * L_{BUNI} = 4.58 * 10^{-10}$$

$$R_{UUNI} = (N_{LUNI} + N_{DJUNI}) * P_{UUNI} * L_{UUNI} = 9.25 * 10^{-11}$$

$$R_{VUNI} = (N_{LUNI} + N_{DJUNI}) * P_{VUNI} * L_{VUNI} = 3.70 * 10^{-10}$$

$$R_{1UNI} = R_{AUNI} + R_{BUNI} + R_{UUNI} + R_{VUNI} = 1.15 * 10^{-9}$$

Per il caso descritto sopra, ossia il calcolo del rischio fulmini annuo come descritto dalla norma CEI EN 62305 per un edificio universitario, si ottiene un risultato che soddisfa la condizione di protezione, in quanto $R_{1UNI} < R_T$ ($R_T = 10^{-5}$). Quindi, per un edificio universitario che si trova in zona urbanizzata, considerando la presenza di un LPS di alto livello a protezione della struttura, il limite imposto dalla norma su base annua come vincolo di sicurezza è rispettato.

Edificio in zona rurale

$$N_{DRUR} = N_g * A_{RUR} * C_{DRUR} = 0.06504$$

$$N_{DJRUR} = N_g * A_{DJRUR} * C_{DJRUR} * C_{TRUR} = 6.524 * 10^{-3}$$

$$N_{LRUR} = N_g * A_{LRUR} * C_{LRUR} * C_{ERUR} * C_{TRUR} * 10^{-6} = 0.04716$$

$$P_{ARUR} = P_{LPSRUR} * P_{AMRUR} * r_{tRUR} * P_{TWSRUR} = 10^{-6}$$

$$P_{BRUR} = P_{SRUR} * P_{LPSRUR} * r_{fRUR} * r_{pRUR} = 5 * 10^{-5}$$

$$P_{URUR} = P_{AMRUR} * P_{EBRUR} * P_{LDRUR} * P_{TWSRUR} * C_{LDRUR} * r_{tRUR} = 1.5 * 10^{-7}$$

$$P_{VRUR} = P_{EBRUR} * P_{LDRUR} * P_{TWSRUR} * C_{LDRUR} * r_{fRUR} * r_{pRUR} = 1.5 * 10^{-5}$$

$$R_{ARUR} = N_{DRUR} * P_{ARUR} * L_{ARUR} = 6.50 * 10^{-10}$$

$$R_{BRUR} = N_{DRUR} * P_{BRUR} * L_{BRUR} = 6.50 * 10^{-9}$$

$$R_{URUR} = (N_{LRUR} + N_{DJRUR}) * P_{URUR} * L_{URUR} = 8.05 * 10^{-11}$$

$$R_{VRUR} = (N_{LRUR} + N_{DJRUR}) * P_{VRUR} * L_{VRUR} = 1.61 * 10^{-9}$$

$$R_{1RUR} = R_{ARUR} + R_{BRUR} + R_{URUR} + R_{VRUR} = 8.84 * 10^{-9}$$

Per il caso descritto sopra, ossia il calcolo del rischio fulmini annuo come descritto dalla norma CEI EN 62305 per un edificio in zona rurale, si ottiene un risultato che soddisfa la condizione di protezione, in quanto $R_{1RUR} < R_T$ ($R_T = 10^{-5}$). Quindi, per un edificio in zona rurale, considerando la presenza di un LPS di basso livello a protezione della struttura e dei componenti interni ad essa, il limite imposto dalla norma su base annua come vincolo di sicurezza è rispettato.

6.1.2 Esempio di calcolo del rischio dinamico (valido su 15 minuti)

Per il calcolo del rischio fulmini su 15 minuti definito dal modello dinamico descritto nei capitoli precedenti, si considera il valore di densità di fulmini al suolo (N_{g15}) calcolato dal modello stesso, a partire dalla probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato in 15 minuti. Di seguito vengono riportati gli esempi di calcolo sia per il caso di edificio universitario sia per il caso di edificio in zona rurale, considerando i dati meteorologici della città di Brescia misurati il 10/06/2026 alle ore 15:35. I valori delle variabili meteorologiche sono i seguenti:

- SRI = 16.14 mm/h
- VMI = 42.50 dBz
- D = 0.95 km.

Edificio universitario

$$p(t) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 SRI + \beta_2 VMI - \beta_3 D)}} = 0.54$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{\Delta t} \ln(1 - p(t)) = 3.11$$

$$N_{g15} = \lambda(t) * \Delta t = 0.78$$

$$N_{DUNI} = N_{g15} * A_{DUNI} * C_{DUNI} = 9.09 * 10^{-3}$$

$$N_{DJUNI} = N_{g15} * A_{DJUNI} * C_{DJUNI} * C_{TUNI} = 9.09 * 10^{-3}$$

$$N_{LUNI} = N_{g15} * A_{LUNI} * C_{LUNI} * C_{EUNI} * C_{TUNI} * 10^{-6} = 9.36 * 10^{-5}$$

$$P_{AUNI} = P_{LPSUNI} * P_{AMUNI} * r_{tUNI} * P_{TWSUNI} = 5 * 10^{-7}$$

$$P_{BUNI} = P_{SUNI} * P_{LPSUNI} * r_{fUNI} * r_{pUNI} = 5 * 10^{-6}$$

$$P_{UUNI} = P_{AMUNI} * P_{EBUNI} * P_{LDUNI} * P_{TWSUNI} * C_{LDUNI} * r_{tUNI} = 2 * 10^{-7}$$

$$P_{VUNI} = P_{EB} * P_{LDUNI} * P_{TWSUNI} * C_{LDUNI} * r_{fUNI} * r_{pUNI} = 4 * 10^{-6}$$

$$R_{AUNI} = N_{DUNI} * P_{AUNI} * L_{AUNI} = 4.55 * 10^{-11}$$

$$R_{BUNI} = N_{DUNI} * P_{BUNI} * L_{BUNI} = 9.09 * 10^{-11}$$

$$R_{UUNI} = (N_{LUNI} + N_{DJUNI}) * P_{UUNI} * L_{UUNI} = 1.84 * 10^{-11}$$

$$R_{VUNI} = (N_{LUNI} + N_{DJUNI}) * P_{VUNI} * L_{VUNI} = 7.34 * 10^{-11}$$

$$R_{1UNI} = R_{AUNI} + R_{BUNI} + R_{UUNI} + R_{VUNI} = 2.28 * 10^{-10}$$

Per il caso descritto sopra, ossia il calcolo del rischio fulmini dinamico (valido su 15 minuti) per un edificio universitario, si ottiene un risultato che soddisfa la condizione di protezione, in quanto $R_{1UNI} < R_{T15}$ ($R_{T15} = 2.85 * 10^{-10}$).

Quindi, per un edificio universitario che si trova in zona urbanizzata, considerando la presenza di un LPS di alto livello a protezione della struttura, il limite relativo al rischio su 15 minuti calcolato a partire dal valore imposto dalla norma CEI EN 62305, è rispettato. Questo significa che al lavoratore per cui è stato svolto questo calcolo, in questo caso specifico non arriva un segnale di allerta per rischio fulmini troppo elevato nei successivi 15 minuti.

Edificio in zona rurale

$$p(t) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 SRI + \beta_2 VMI - \beta_3 D)}} = 0.54$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{\Delta t} \ln(1 - p(t)) = 3.11$$

$$N_{g15} = \lambda(t) * \Delta t = 0.78$$

$$N_{D_{RUR}} = N_{g15} * A_{D_{RUR}} * C_{D_{RUR}} = 0.01291$$

$$N_{D_{J_{RUR}}} = N_{g15} * A_{D_{J_{RUR}}} * C_{D_{J_{RUR}}} * C_{T_{RUR}} = 1.295 * 10^{-3}$$

$$N_{L_{RUR}} = N_{g15} * A_{L_{RUR}} * C_{I_{RUR}} * C_{E_{RUR}} * C_{T_{RUR}} * 10^{-6} = 9.36 * 10^{-3}$$

$$P_{A_{RUR}} = P_{LPS_{RUR}} * P_{AM_{RUR}} * r_{t_{RUR}} * P_{TWS_{RUR}} = 10^{-6}$$

$$P_{B_{RUR}} = P_{S_{RUR}} * P_{LPS_{RUR}} * r_{f_{RUR}} * r_{p_{RUR}} = 5 * 10^{-5}$$

$$P_{U_{RUR}} = P_{AM_{RUR}} * P_{EB_{RUR}} * P_{LD_{RUR}} * P_{TWS_{RUR}} * C_{LD_{RUR}} * r_{t_{RUR}} = 1.5 * 10^{-7}$$

$$P_{V_{RUR}} = P_{EB_{RUR}} * P_{LD_{RUR}} * P_{TWS_{RUR}} * C_{LD_{RUR}} * r_{f_{RUR}} * r_{p_{RUR}} = 1.5 * 10^{-5}$$

$$R_{A_{RUR}} = N_{D_{RUR}} * P_{A_{RUR}} * L_{A_{RUR}} = 1.29 * 10^{-10}$$

Risultati

$$R_{B_{RUR}} = N_{D_{RUR}} * P_{B_{RUR}} * L_{B_{RUR}} = 1.29 * 10^{-9}$$

$$R_{U_{RUR}} = (N_{L_{RUR}} + N_{D_{J_{RUR}}}) * P_{U_{RUR}} * L_{U_{RUR}} = 1.60 * 10^{-11}$$

$$R_{V_{RUR}} = (N_{L_{RUR}} + N_{D_{J_{RUR}}}) * P_{V_{RUR}} * L_{V_{RUR}} = 3.20 * 10^{-10}$$

$$R_{1_{RUR}} = R_{A_{RUR}} + R_{B_{RUR}} + R_{U_{RUR}} + R_{V_{RUR}} = 1.76 * 10^{-9}$$

Per il caso descritto sopra, ossia il calcolo del rischio fulmini dinamico (valido su 15 minuti) per un edificio in zona rurale, si ottiene un risultato che non soddisfa la condizione di protezione, in quanto $R_{1_{RUR}} > R_{T15}$ ($R_{T15} = 2.85 * 10^{-10}$). Quindi, per un edificio che si trova in zona rurale, considerando la presenza di un LPS di basso livello a protezione della struttura, il limite relativo al rischio calcolato su 15 minuti a partire dal valore imposto dalla norma CEI EN 62305, non è rispettato. Questo significa che al lavoratore per cui è stato svolto questo calcolo, in questo caso specifico arriva un segnale di allerta per rischio fulmini troppo elevato nei successivi 15 minuti.

Tabella 6.2: Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dal calcolo di rischio per l'edificio universitario

UNIVERSITA'					
N_g (fulmini / $km^2 * ora$)	N_{g15} (fulmini / $km^2 * 15$ minuti)	R_1	R_T	R_{15}	R_{T15}
3.93	0.78	$1.15 * 10^{-9}$	10^{-5}	$2.28 * 10^{-10}$	$2.85 * 10^{-10}$

Tabella 6.3: Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dal calcolo di rischio per l'edificio in zona rurale

EDIFICIO IN ZONA RURALE					
N_g (fulmini / $\text{km}^2 \cdot \text{ora}$)	N_{g15} (fulmini / $\text{km}^2 \cdot 15$ minuti)	R_1	R_T	R_{15}	R_{T15}
3.93	0.78	$8.84 \cdot 10^{-9}$	10^{-5}	$1.76 \cdot 10^{-9}$	$2.85 \cdot 10^{-10}$

Dai casi proposti, si nota come il valore del rischio totale relativo alla perdita di vite umane (R_I) varia in base al tipo di struttura considerata. Oltre a questo, dalla Tabella 6.2 e dalla Tabella 6.3 si vede come il rischio calcolato tramite il modello dinamico, partendo dalla densità di fulmini al chilometro quadrato in quindici minuti (N_{g15}), sia sempre minore del valore del rischio annuo calcolato come descritto dalla norma. Questo perchè la densità di fulmini al chilometro quadrato in quindici minuti, per quanto ci si possa trovare in una situazione di forte temporale, sarà sempre più basso rispetto alla densità di fulmini al chilometro quadrato all'anno usato dalla norma per il calcolo del rischio annuo. Ciò che cambia notevolmente ordine di grandezza è il rischio tollerabile con cui viene confrontato il rischio di perdita di vite umane calcolato. Nel caso del calcolo del rischio tramite il modello dinamico, la soglia tollerabile di rischio è estremamente minore rispetto al rischio tollerato annuo presente nella norma. Quindi nei 15 minuti, pur partendo da un numero di fulmini al chilometro quadrato sicuramente minore rispetto al valore annuo, si possono ottenere situazioni in cui il rischio calcolato supera la soglia tollerabile.

6.2 Analisi dei risultati del codice Python

In questa sezione l'obiettivo è cercare di analizzare e interpretare i risultati ottenuti dall'esecuzione del codice Python descritto nel Capitolo 5. I dati proposti nelle pagine successive sono relativi al calcolo del rischio fulmini per i lavoratori nella giornata del 10/06/2026 dalle ore 13:05 alle ore 17:05, per le città di Brescia, Monza, Venezia e Bologna. Le prime tre città sono state scelte per monitorare lo spostamento del temporale che ha interessato il nord Italia il giorno 10/06/2026. Bologna è invece stata scelta per mostrare il criterio di convergenza del modello a

valori di rischio irrilevanti nel caso in cui la posizione di interesse si trovi in un punto lontano dal temporale più vicino.

6.2.1 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Monza

Nella *Tabella 6.4* vengono riportati i valori di probabilità di caduta fulmini, del numero di fulmini al chilometro quadrato attesi nei 15 minuti, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di struttura universitaria, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di un edificio in zona rurale e della distanza del fulmine più vicino alla posizione di interesse, rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio per il lavoratore, relativi alla città di Monza.

Tabella 6.4: *Tabella degli output del codice Python per la città di Monza*

Orario	p	N_{g15} <i>(fulmini / km²* 15 minuti)</i>	R_{15_uni}	R_{15_rur}	Distanza minima fulmine <i>(km)</i>
13:05:30	0,001410255	0,00141125	4,13E-13	3,18E-12	41,47
13:20:31	0,002726666	0,00273039	7,99E-13	6,15E-12	14,70
13:35:33	0,059789044	0,061651008	1,80E-11	1,39E-10	10,82
13:50:35	0,322565254	0,389442047	1,14E-10	8,77E-10	0,63
14:05:38	0,801973439	1,619354109	4,74E-10	3,64E-09	0,52
14:20:40	0,772202693	1,479299051	4,33E-10	3,33E-09	0,80
14:35:41	0,621342695	0,971123691	2,84E-10	2,19E-09	3,92
14:50:43	0,026804066	0,027169846	7,95E-12	6,12E-11	33,59
15:05:45	0,006064116	0,006082577	1,78E-12	1,37E-11	60,21
15:20:47	0,000364081	0,000364147	1,07E-13	8,20E-13	55,06
15:35:49	0,001058932	0,001059493	3,10E-13	2,38E-12	7,90
15:50:51	0,09067663	0,095054505	2,78E-11	2,14E-10	5,35
16:05:53	0,112892574	0,119789193	3,50E-11	2,70E-10	7,07
16:20:55	0,106988998	0,113156378	3,31E-11	2,55E-10	9,48
16:35:57	0,069661877	0,072207186	2,11E-11	1,63E-10	23,55
16:50:59	0,01846647	0,018639104	5,45E-12	4,20E-11	149,09
17:05:06	3,90E-08	3,90E-08	1,14E-17	8,78E-17	152,05

Risultati

Dalla *Tabella 6.4*, si nota come i valori di rischio calcolati per un edificio universitario e per un edificio in zona rurale variano in relazione al numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti successivi al calcolo. Nell'ultima colonna della *Tabella 6.4* è mostrata la distanza del fulmine rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio, più vicino al punto in cui si sta valutando il rischio fulmini.

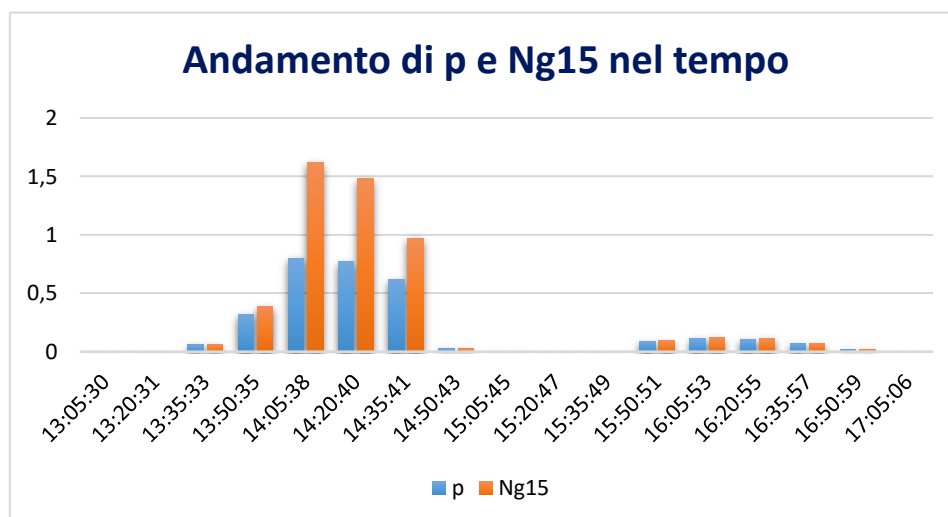


Grafico 6.1: Andamento della probabilità di caduta fulmini e del numero di fulmini attesi in 15 minuti al variare del tempo

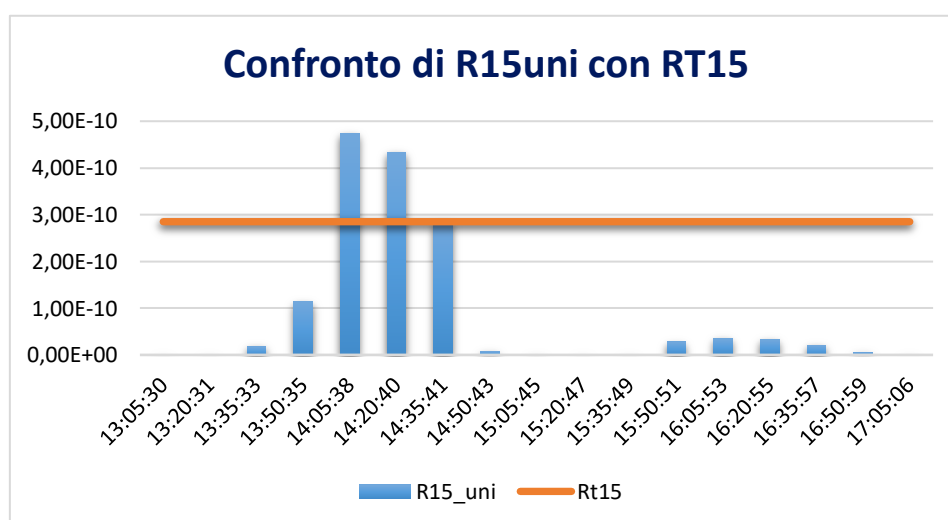


Grafico 6.2: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio universitario e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

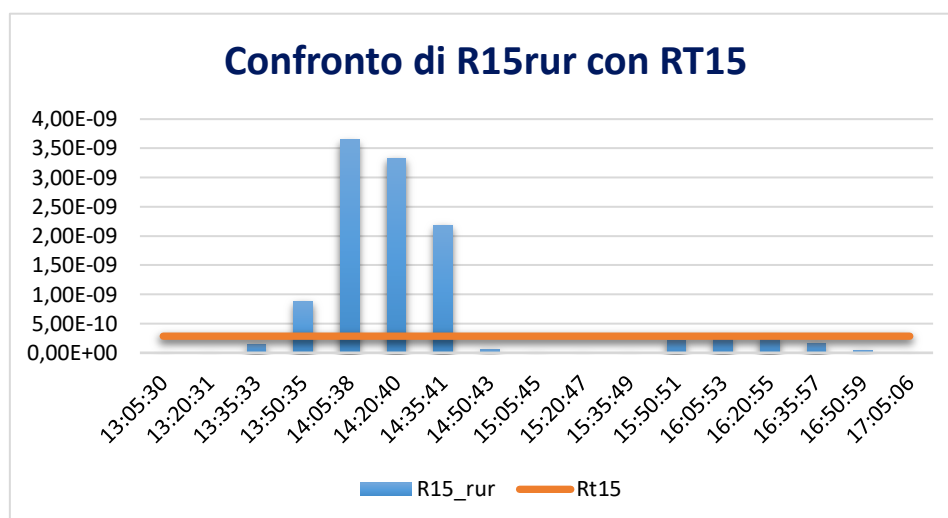


Grafico 6.3: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio in zona rurale e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

Nel *Grafico 6.1* si vuole evidenziare la proporzionalità che lega il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato in 15 minuti e la probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato nei 15 minuti. Dallo stesso grafico, si nota anche come la zona di Monza sia stata interessata dalla cella temporalesca in un arco di tempo compreso tra le 13:50 e le 14:35. Questo può essere identificato visivamente anche osservando il *Grafico 6.2* e il *Grafico 6.3*, nei quali si nota proprio come nell'arco di tempo indicato precedentemente si ha un'impennata dei valori di rischio per entrambe le strutture considerate.

Se si osservano nel dettaglio i valori della *Tabella 6.4*, si nota come, all'aumentare del numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti, diminuisce la distanza del fulmine rilevato più vicino alla posizione di interesse rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio per i lavoratori.

Dal *Grafico 6.2* e dal *Grafico 6.3* è evidente quando i rischi calcolati sono minori del rischio tollerabile e quando invece sono maggiori. Nel caso di struttura universitaria, il rischio calcolato supera la soglia tollerabile soltanto nei timestamp delle ore 14:05 e delle ore 14:20, quindi solo in questi due casi verrà inviato un messaggio di allerta al lavoratore. Nel caso di struttura in zona rurale, il rischio calcolato supera la soglia tollerabile nei timestamp compresi tra le ore 13:50 e le ore 14:35, quindi in questi casi verrà inviato un messaggio di allerta al lavoratore.

6.2.2 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Brescia

Nella *Tabella 6.5* vengono riportati i valori di probabilità di caduta fulmini, del numero di fulmini al chilometro quadrato attesi nei 15 minuti, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di struttura universitaria, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di un edificio in zona rurale e della distanza del fulmine più vicino alla posizione di interesse, rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio per il lavoratore, relativi alla città di Brescia.

Tabella 6.5: *Tabella degli output del codice Python per la città di Brescia*

Orario	p	N_{g15} <i>(fulmini / km²* 15 minuti)</i>	R_{15_uni}	R_{15_rur}	Distanza minima fulmine <i>(km)</i>
13:05:30	0,000960113	0,000960574	2,81E-13	2,16E-12	46,55
13:20:31	0,001760234	0,001761785	5,15E-13	3,97E-12	51,14
13:35:33	0,001036962	0,0010375	3,04E-13	2,34E-12	62,51
13:50:35	0,000285625	0,000285666	8,36E-14	6,43E-13	60,64
14:05:38	0,000347591	0,000347651	1,02E-13	7,82E-13	41,30
14:20:40	0,002643516	0,002647016	7,74E-13	5,96E-12	37,84
14:35:41	0,003985077	0,003993039	1,17E-12	8,99E-12	19,75
14:50:43	0,03209569	0,032622049	9,54E-12	7,34E-11	7,89
15:05:45	0,317909535	0,382592983	1,12E-10	8,61E-10	3,40
15:20:47	0,668322559	1,103592347	3,23E-10	2,48E-09	0,94
15:35:49	0,540729584	0,7781161	2,28E-10	1,75E-09	4,36
15:50:51	0,070453106	0,073058023	2,14E-11	1,64E-10	13,56
16:05:53	0,01023309	0,010285808	3,01E-12	2,32E-11	29,62
16:20:55	0,009620645	0,009667223	2,83E-12	2,18E-11	38,60
16:35:57	0,025226928	0,025550582	7,48E-12	5,75E-11	53,38
16:50:59	0,001410525	0,001411521	4,13E-13	3,18E-12	82,64
17:05:06	5,63974E-05	5,6399E-05	1,65E-14	1,27E-13	89,36

Risultati

Dalla *Tabella 6.5*, si nota come i valori di rischio calcolati per un edificio universitario e per un edificio in zona rurale variano in relazione al numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti successivi al calcolo.

Se si osservano nel dettaglio i valori della *Tabella 6.5*, si nota come, all'aumentare del numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti, diminuisce la distanza del fulmine rilevato più vicino alla posizione di interesse rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio per i lavoratori.

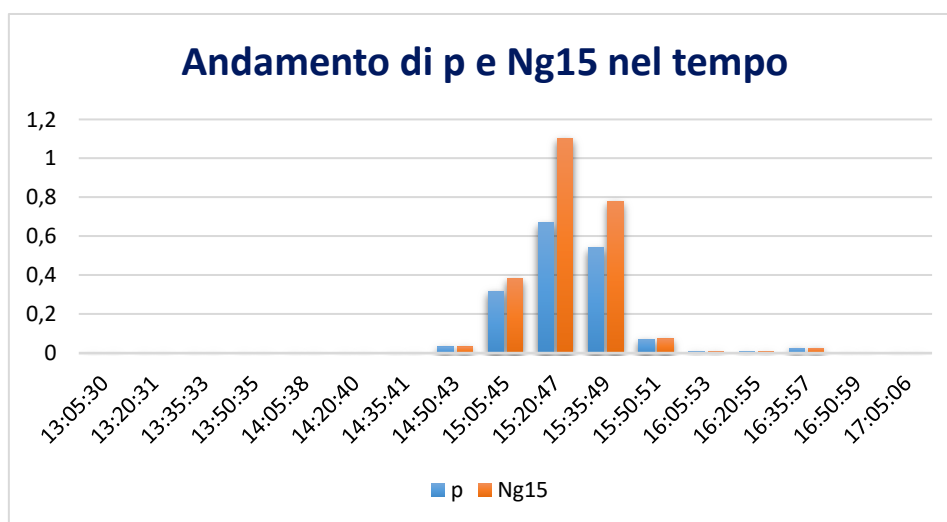


Grafico 6.4: Andamento della probabilità di caduta fulmini e del numero di fulmini attesi in 15 minuti al variare del tempo

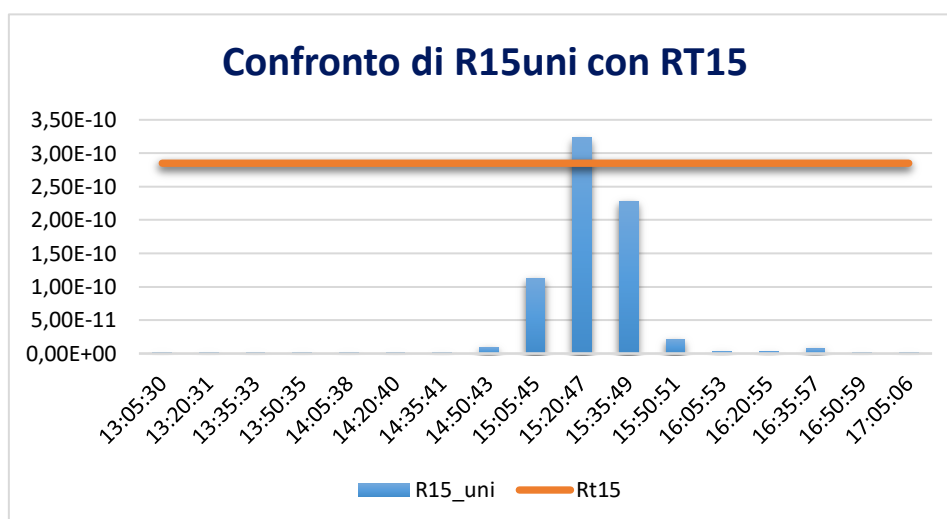


Grafico 6.5: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio universitario e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

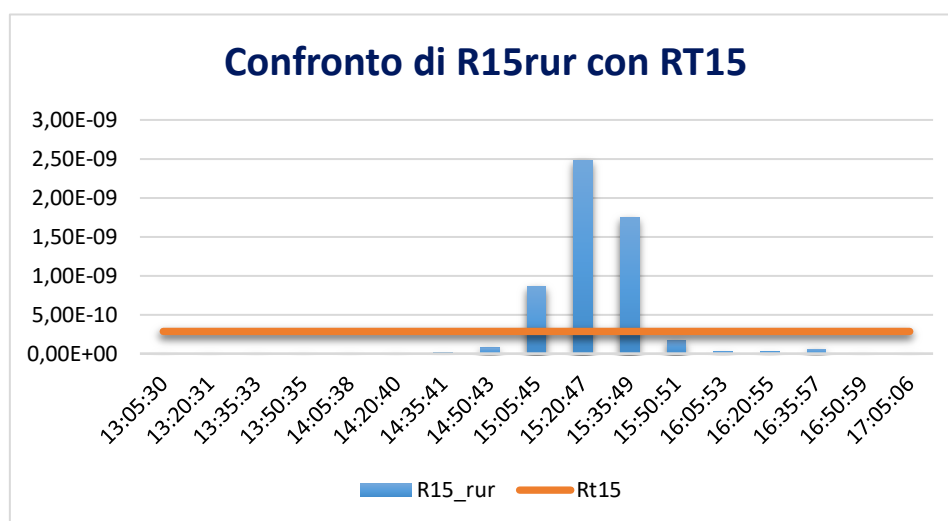


Grafico 6.6: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio in zona rurale e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

Nel *Grafico 6.4* si vuole evidenziare la proporzionalità che lega il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato in 15 minuti e la probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato nei 15 minuti. Dallo stesso grafico, si nota anche come la zona di Brescia sia stata interessata dalla cella temporalesca in un arco di tempo compreso tra le 15:05 e le 15:50. Questo è visibile anche osservando la mappa del sito EUMETSAT, che mostra la posizione dei fulmini caduti [13]. Da questa mappa radar, si nota come la cella temporalesca che interessava la città di Monza dalle ore 13:50 alle ore 14:35, è la stessa che interessa la città di Brescia dalle ore 15:05 alle ore 15:50. Con gli esempi riportati, relativi alle città di Monza e di Brescia si nota bene quello che è lo spostamento delle celle temporalesche nel tempo. In questo caso, la cella temporalesca si è mossa da ovest verso est, investendo prima la città di Monza e successivamente l'area intorno alla città di Brescia.

Nel caso di struttura universitaria, il rischio calcolato supera la soglia tollerabile soltanto nel timestamp delle ore 15:20, quindi solo in questo caso verrà inviato un messaggio di allerta al lavoratore. Invece, nel caso di struttura in zona rurale, il rischio calcolato supera la soglia tollerabile nei timestamp compresi tra le ore 15:05 e le ore 15:35, quindi in questi casi verrà inviato un messaggio di allerta al lavoratore.

6.2.3 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Venezia

Nella *Tabella 6.6* vengono riportati i valori di probabilità di caduta fulmini, del numero di fulmini al chilometro quadrato attesi nei 15 minuti, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di struttura universitaria, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di un edificio in zona rurale e della distanza del fulmine più vicino alla posizione di interesse, rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio per il lavoratore, relativi alla città di Venezia.

Tabella 6.6: *Tabella degli output del codice Python per la città di Venezia*

Orario	p	N_{g15} <i>(fulmini / km²* 15 minuti)</i>	R_{15_uni}	R_{15_rur}	Distanza minima fulmine <i>(km)</i>
13:05:30	0,000179799	0,000179815	5,26E-14	4,05E-13	69,46
13:20:31	0,000197645	0,000197664	5,78E-14	4,45E-13	58,76
13:35:33	0,000423876	0,000423966	1,24E-13	9,54E-13	60,49
13:50:35	0,000743511	0,000743788	2,18E-13	1,67E-12	48,86
14:05:38	0,001449924	0,001450976	4,25E-13	3,27E-12	22,06
14:20:40	0,024218198	0,024516282	7,17E-12	5,52E-11	10,42
14:35:41	0,103545353	0,109307576	3,20E-11	2,46E-10	3,25
14:50:43	0,423914575	0,551499322	1,61E-10	1,24E-09	1,84
15:05:45	0,570987553	0,846269347	2,48E-10	1,90E-09	0,79
15:20:47	0,382537692	0,482137253	1,41E-10	1,09E-09	3,78
15:35:49	0,235595369	0,268658008	7,86E-11	6,05E-10	13,47
15:50:51	0,025265124	0,025589767	7,49E-12	5,76E-11	35,81
16:05:53	0,012461935	0,012540237	3,67E-12	2,82E-11	21,34
16:20:55	0,021613682	0,021850678	6,39E-12	4,92E-11	17,94
16:35:57	0,045299076	0,046357156	1,36E-11	1,04E-10	21,22
16:50:59	0,03035807	0,03082842	9,02E-12	6,94E-11	17,76
17:05:06	0,033422409	0,033993703	9,95E-12	7,65E-11	14,76

Dalla *Tabella 6.6*, si nota come i valori di rischio calcolati per un edificio universitario e per un edificio in zona rurale variano in relazione al numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti successivi al calcolo.

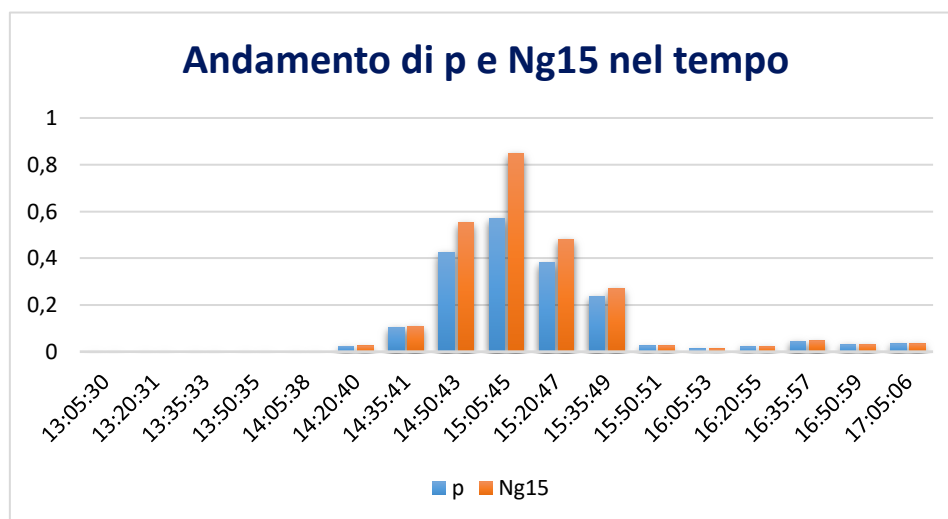


Grafico 6.7: Andamento della probabilità di caduta fulmini e del numero di fulmini attesi in 15 minuti al variare del tempo

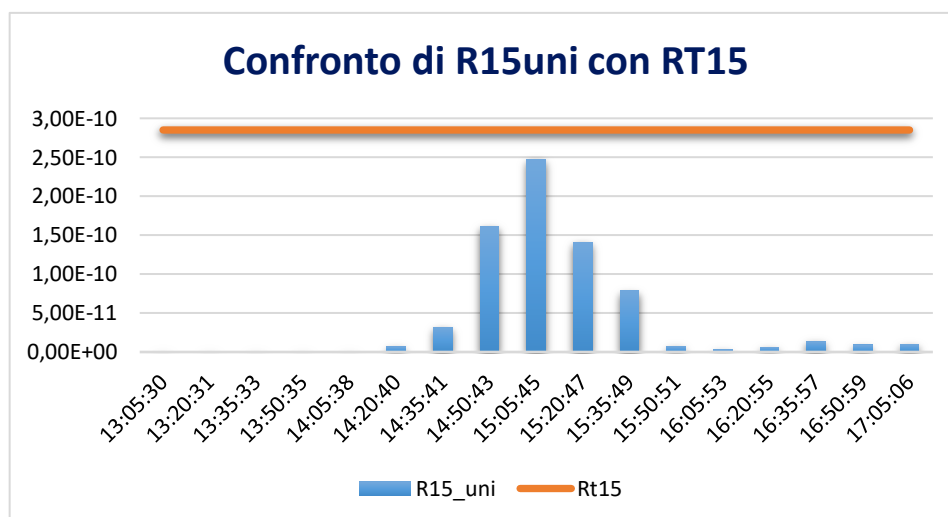


Grafico 6.8: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio universitario e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

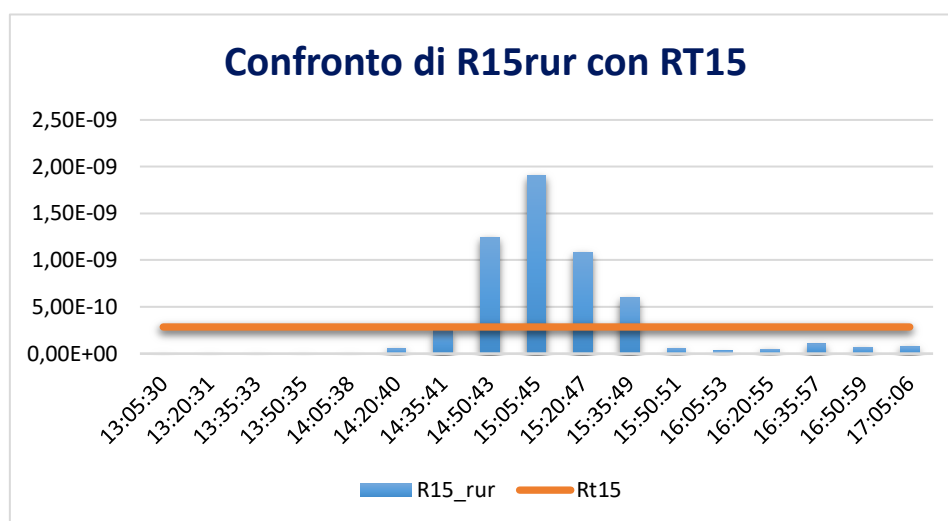


Grafico 6.9: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio in zona rurale e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

Nel *Grafico 6.7* si vuole evidenziare la proporzionalità che lega il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato in 15 minuti e la probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato nei 15 minuti. Dallo stesso grafico, si nota anche come la zona di Venezia sia stata interessata dalla cella temporalesca in un arco di tempo compreso tra le 14:50 e le 15:35.

Dalla *Tabella 6.6* si evince come la città di Venezia sia stata interessata dalla cella temporalesca in modo meno centrale, infatti anche nell'arco di tempo compreso tra le 14:50 e le 15:35, il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti rimane più contenuto rispetto a quanto visto nei due casi precedenti per le città di Monza e di Brescia.

Dalla mappa radar del sito EUMETSAT [15] si nota infatti quanto descritto sopra, ovvero che la città di Venezia viene interessata dalla cella temporalesca ma non in modo centrale.

Nel caso di struttura universitaria, il rischio calcolato non supera mai la soglia tollerabile, quindi non verrà mai inviato un messaggio di allerta al lavoratore. Invece, nel caso di struttura in zona rurale, il rischio calcolato supera la soglia tollerabile nei timestamp compresi tra le ore 14:50 e le ore 15:35, quindi in questi casi verrà inviato un messaggio di allerta al lavoratore.

6.2.4 Calcolo del rischio per i lavoratori nella città di Bologna

Nella *Tabella 6.7* vengono riportati i valori di probabilità di caduta fulmini, del numero di fulmini al chilometro quadrato attesi nei 15 minuti, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di struttura universitaria, del rischio per il lavoratore calcolato nel caso di un edificio in zona rurale e della distanza del fulmine più vicino alla posizione di interesse, rilevato nei 15 minuti successivi al calcolo dei valori di rischio per il lavoratore, relativi alla città di Bologna. È stata fatta la scelta di portare il caso della città di Bologna, in quanto è stato ritenuto utile per capire come si comporta il modello dinamico per il calcolo del rischio fulmini per i lavoratori nel caso in cui il punto in cui si trova ad operare il lavoratore non sia interessato da una cella temporalesca.

Tabella 6.7: Tabella degli output del codice Python per la città di Bologna

Orario	p	N_{g15} (fulmini / km ² * 15 minuti)	R_{15_uni}	R_{15_rur}	Distanza minima fulmine (km)
13:05:30	1,47E-07	1,47E-07	4,32E-17	3,32E-16	130,24
13:20:31	2,33E-07	2,33E-07	6,82E-17	5,25E-16	130,02
13:35:33	2,50E-07	2,50E-07	7,32E-17	5,63E-16	122,67
13:50:35	5,16E-07	5,16E-07	1,51E-16	1,16E-15	89,22
14:05:38	1,91E-05	1,91E-05	5,57E-15	4,29E-14	97,91
14:20:40	8,63E-06	8,63E-06	2,52E-15	1,94E-14	103,46
14:35:41	6,27E-06	6,27E-06	1,84E-15	1,41E-14	112,33
14:50:43	2,59E-06	2,59E-06	7,59E-16	5,84E-15	113,48
15:05:45	3,54E-06	3,54E-06	1,04E-15	7,97E-15	126,62
15:20:47	3,41E-07	3,41E-07	9,98E-17	7,67E-16	114,68
15:35:49	1,22E-06	1,22E-06	3,58E-16	2,75E-15	103,01
15:50:51	4,17E-06	4,17E-06	1,22E-15	9,39E-15	103,51
16:05:53	3,95E-06	3,95E-06	1,16E-15	8,90E-15	116,11
16:20:55	1,03E-06	1,03E-06	3,01E-16	2,31E-15	126,86
16:35:57	3,32E-07	3,32E-07	9,73E-17	7,48E-16	136,85
16:50:59	1,17E-07	1,17E-07	3,41E-17	2,62E-16	134,71
17:05:06	1,99E-07	1,99E-07	5,83E-17	4,48E-16	134,71

Dalla *Tabella 6.7*, si nota come i valori di rischio calcolati per un edificio universitario e per un edificio in zona rurale sono sempre minori della soglia di rischio tollerabile.

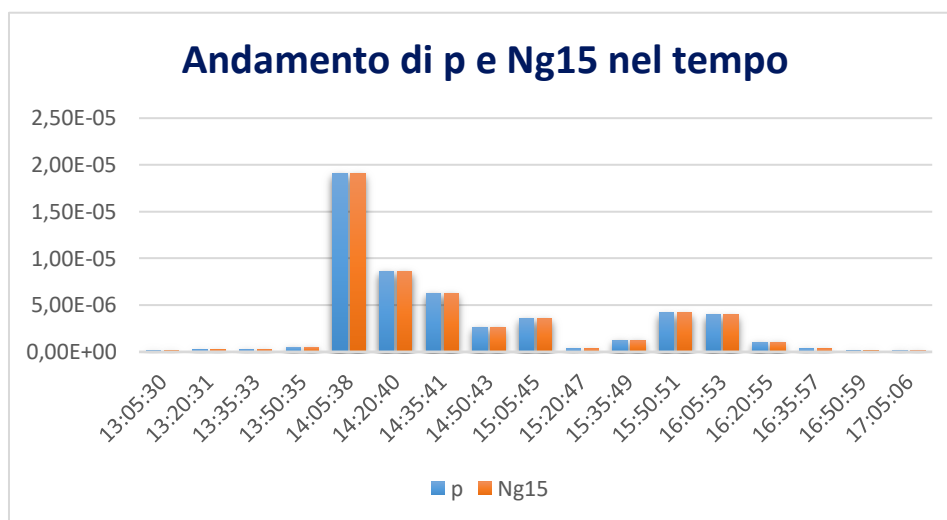


Grafico 6.10: Andamento della probabilità di caduta fulmini e del numero di fulmini attesi in 15 minuti al variare del tempo

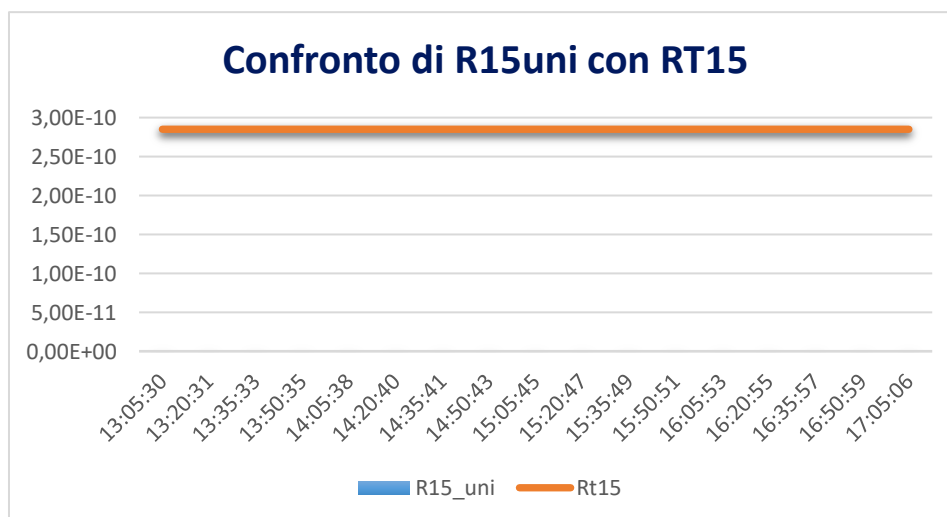


Grafico 6.11: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio universitario e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

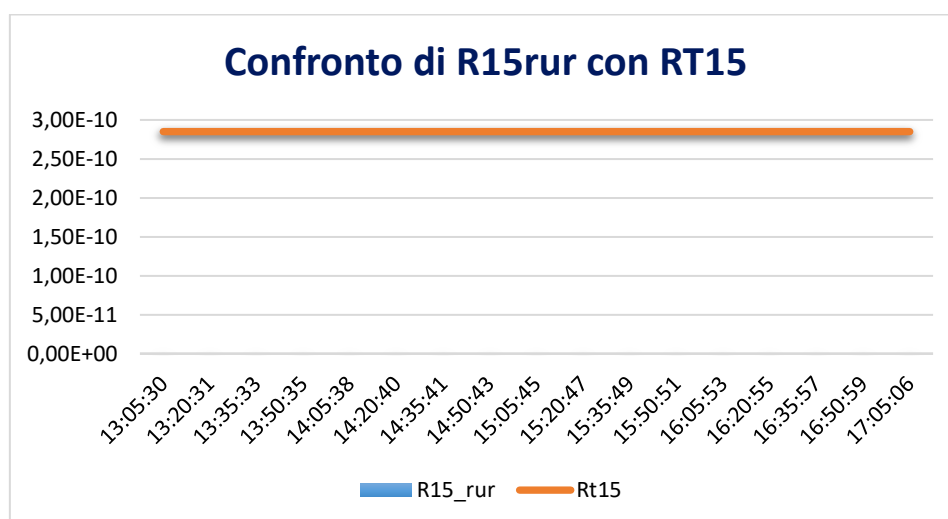


Grafico 6.12: Confronto tra il rischio fulmini calcolato per un edificio in zona rurale e il rischio tollerabile per 15 minuti al variare del tempo

Come si può vedere dall'ultima colonna della *Tabella 6.7*, i fulmini caduti rilevati più vicini alla posizione in cui si vuole calcolare il rischio per il lavoratore, sono molto distanti. Questo significa che la cella temporalesca più vicina al punto di interesse, si trova molto lontano. Questo fa sì che il modello dinamico converga ad una probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato in 15 minuti molto bassa (come si può vedere dal *Grafico 6.10*), dalla quale si ottiene un numero di fulmini attesi al chilometro quadrato in 15 minuti quasi irrilevante, il che conseguentemente porta ad un valore di rischio calcolato per l'edificio universitario e per quello in zona rurale molto bassi (come si può vedere dal *Grafico 6.11* e dal *Grafico 6.12*). Nel caso della città di Bologna, sia per il caso di edificio universitario, sia per il caso di edificio in zona rurale, in nessun timestamp il rischio calcolato supera quello tollerabile, quindi non verrà mai inviato un messaggio di allerta al lavoratore.

Dai risultati ottenuti dai casi proposti nelle pagine precedenti, si evince che il modello dinamico per il calcolo del rischio fulmini per i lavoratori calcolato in una precisa posizione, in alcuni casi sovrastima il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti. Lo si può notare osservando i valori riportati nelle tabelle riferiti ad ogni città considerata. In alcuni casi, pur essendo la posizione di interesse nel centro della cella temporalesca, il fulmine rilevato più vicino a tale posizione è maggiore al chilometro, anche se il modello ha previsto un numero di fulmini attesi

al chilometro quadrato nei 15 minuti successivi al calcolo pari o superiore ad 1. Quindi in questi casi il rischio calcolato per i lavoratori risulta essere troppo elevato rispetto al rischio reale. Il fatto che però il modello presenti in alcuni casi una sovrastima e non una sottostima è di conforto, in quanto l'obiettivo di questo progetto è la sicurezza dei lavoratori, quindi è preferibile avere falsi allarmi piuttosto che avere allarmi mancati.

Questo riporta al concetto di soglia tollerabile e non di rischio tollerabile definito nei capitoli precedenti. Il fatto che il rischio calcolato superi il valore di rischio tollerabile non implica sicuramente un rischio effettivo per i lavoratori presenti nei pressi della struttura, ma indica una situazione di pericolo. Per questo, è più corretto definire una soglia tollerabile/soglia di allerta piuttosto che un rischio tollerabile.

Capitolo 7

7. Considerazioni finali

L'obiettivo di questo progetto di tesi è stato ricercare un modello dinamico con il quale calcolare un rischio dinamico dovuto ai fulmini per i lavoratori, e nel caso questo risulti essere maggiore del rischio tollerabile inviare un messaggio di allerta al lavoratore che si trova in pericolo. La norma che definisce il processo di calcolo del rischio fulmini per gli esseri viventi è la CEI EN 62305. Questa norma però prevede soltanto un calcolo del rischio fulmini per le persone su base annua e non un calcolo di rischio fulmini dinamico per le persone.

L'idea è quindi stata quella di cercare una strada alternativa a quella proposta dalla norma. Sono stati analizzati dei modelli trovati in letteratura che vengono utilizzati per la previsione di caduta fulmini in tempo breve. Questi modelli però si discostano in modo troppo rilevante da quanto previsto dalla norma CEI EN 62305. Infatti è la stessa norma che a livello nazionale definisce il valore di rischio tollerabile per perdita di esseri viventi provocati da fulmini. Accantonati questi modelli già esistenti e utilizzati a livello internazionale, l'obiettivo è rimasto quello di calcolare un rischio fulmini dinamico con un processo simile a quello definito dalla norma per il calcolo del rischio fulmini per le persone su base annua.

È stato definito un modello di regressione logistica multipla con il quale è stato possibile calcolare la probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato nei 15 minuti successivi al calcolo, a partire da dati meteorologici misurati nei minuti precedenti al calcolo della probabilità. Dalla probabilità di caduta fulmini al chilometro quadrato in 15 minuti è stato ricavato il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato in 15 minuti (N_{g15}). A questo punto è stato possibile ricollegarsi al procedimento previsto dalla norma CEI EN 62305 per il calcolo del rischio fulmini per gli esseri viventi. Il punto di partenza per il calcolo di tale rischio è lo stesso, sia per il modello dinamico utilizzato, sia per quanto definito dalla norma. La differenza sostanziale è che la norma utilizza un numero di fulmini attesi al chilometro quadrato all'anno mentre il modello dinamico proposto utilizza un numero di fulmini attesi al chilometro quadrato in 15 minuti.

Il problema non sta nel processo di calcolo del rischio fulmini, per il quale è stato seguito quello proposto dalla norma, ma nel confronto del rischio dinamico calcolato (valido per i 15 minuti successivi al calcolo) con il valore di rischio tollerabile annuo presente nella norma. Confrontare un rischio dinamico con un

rischio tollerabile annuo non è cosa di troppo senso logico. L'idea è quindi stata quella di cercare di trasformare il rischio tollerabile annuo in un rischio tollerabile per un intervallo di tempo di 15 minuti. In letteratura non è stato trovato un processo di questo tipo, pertanto, non avendo a disposizione valori di rischio storici per tutti gli intervalli di 15 minuti di un anno, si è deciso di dividere il valore di rischio tollerabile annuo per il numero di intervalli di 15 minuti presenti in un anno (35040). Con questa assunzione si commette un errore importante, ossia si considera che in tutti gli intervalli di 15 minuti di un anno i movimenti temporaleschi siano gli stessi. Questo però ovviamente non è vero, in quanto è noto come l'interessamento dell'Italia da parte di celle temporalesche vari nell'arco dell'anno solare. In questo modo però è stato ricavato un rischio tollerabile o meglio, una soglia tollerabile valida sui 15 minuti, utile per il confronto con il rischio dinamico calcolato.

L'obiettivo iniziale di questo progetto di tesi è quello di calcolare un rischio fulmini dinamico per i lavoratori, in modo automatico e continuativo. Per fare ciò è stato ideato un codice Python, il quale, una volta inserite le coordinate della posizione in cui si trova il lavoratore da avvisare nel caso in cui si verifichi una situazione di pericolo, scarica i dati disponibili più aggiornati delle variabili meteorologiche con i quali calcola il rischio fulmini per il lavoratore in questione, ripetendo il processo all'infinito. Dall'esecuzione del codice, ogni 15 minuti viene calcolato il rischio fulmini per il lavoratore e nel caso questo sia maggiore della soglia tollerabile (definita su 15 minuti) invia un messaggio di allerta al lavoratore che in questo modo si può mettere in salvo dalla situazione di pericolo in cui si trovava.

In questo progetto di tesi, nel *Capitolo 6*, sono stati riportati alcuni esempi dei risultati ottenuti dall'esecuzione del codice, impostando posizioni differenti riferite a diverse città italiane. Ciò che si evince dai risultati mostrati nel *Capitolo 6*, è che il modello dinamico utilizzato per il calcolo del rischio fulmini per i lavoratori calcolato in una precisa posizione, in alcuni casi sovrastima il numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti. In alcuni casi, pur essendo la posizione di interesse nel centro della cella temporalesca, il fulmine rilevato più vicino a tale posizione è maggiore al chilometro, anche se il modello ha previsto un numero di fulmini attesi al chilometro quadrato nei 15 minuti successivi al calcolo pari o superiore ad 1. Quindi in questi casi il rischio calcolato per i lavoratori risulta essere troppo elevato rispetto al rischio reale. Il fatto che però il modello presenti in alcuni casi una sovrastima e non una sottostima è di conforto, in quanto l'obiettivo di questo progetto è la sicurezza dei lavoratori, quindi è preferibile avere falsi allarmi piuttosto che avere allarmi mancati.

In conclusione si può affermare che questo modello proposto è valido per quanto il calcolo del rischio fulmini per i lavoratori. Possono sicuramente essere previsti dei miglioramenti. Come primo miglioramento, si può pensare di utilizzare il codice Python per creare un database di dati storici per tutte le variabili utilizzate nel modello. In questo modo la definizione dei coefficienti β può essere fatta a partire dai dati storici raccolti e non da un numero di casi studio molto ristretto come fatto in questo progetto. Un altro sviluppo futuro può essere cercare di validare il modello utilizzato considerando un maggior numero di dati, quindi prevedere un'esecuzione del codice Python per una durata molto lunga. Interessante potrebbe essere prevedere un funzionamento per un lungo periodo, per diversi luoghi, in modo tale da vedere situazioni come si comporta il modello in situazioni differenti.

Un ulteriore miglioramento può essere pensare di aumentare il numero di variabili meteorologiche utilizzate dal modello di regressione logistica multipla. In questo modo si può ottenere un miglioramento dei risultati ottenuti perché più il numero delle variabili presenti nel modello aumenta e meno il risultato ottenuto dipende da ogni variabile, il che permette una maggiore convergenza del modello. Un esempio di variabile che potrebbe essere aggiunta al modello proposto, dalla quale dipende notevolmente la formazione di fulmini, è il campo elettrico dell'atmosfera.

Questa idea, dell'aumento del numero delle variabili meteorologiche utilizzate dal modello, non è stata messa in pratica in questo progetto per un problema nel reperire siti certificati dai quali scaricare in modo automatico e continuativo i valori delle variabili.

Capitolo 8

8. Bibliografia

- [1] Price, C., & Rind, D. (1994). Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D5), 10823-10831.
- [2] Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D., & Molinari, J. (2014). Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science*, 346(6211), 851-854.
- [3] INAIL. (2016). *Impianti di protezione contro le scariche atmosferiche: Valutazione del rischio e verifiche*. Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro, Dipartimento Innovazioni Tecniche
- [4] Zeng, R., Zhuang, C., Zhou, X., Chen, S., Wang, Z., Yu, Z., & He, J. (2016). Survey of recent progress on lightning and lightning protection research. *High Voltage*, 1(1), 2-10.
- [5] Guida alla normativa per la protezione contro il rischio di scariche atmosferiche dell'Università di Padova.
- [6] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 1: Principi generali*. Rapp. tecn. 2013.
- [7] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 2: Valutazione del rischio*.
- [8] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone*.
- [9] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 4: Impianto elettrici ed elettronici*.
- [10] Bouchard, A., Buguet, M., Chan-Hon-Tong, A., Dezert, J., & Lalande, P. (2023). Comparison of different forecasting tools for short-range lightning strike risk assessment. *Natural Hazards*, 115(2), 1011-1047.

Bibliografia

- [11] Heitkemper, L. J., Price, R. F., Johnson, D. B., & Heitkemper, L. J. (2008). *Lightning-warning systems for use by airports*. Transportation Research Board.
- [12] Bewick, V., Cheek, L., & Ball, J. (2005). Statistics review 14: Logistic regression. *Critical care*, 9(1), 112.
- [13] Battaglioli, F., Groenemeijer, P., Tsonevsky, I., & Púčik, T. (2023). Forecasting large hail and lightning using logistic regression models and the ECMWF reforecasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(12), 3651-3669.
- [14] Dipartimento della Protezione Civile (n.d.). *Piattaforma radar*. [https://mappe.protezionecivile.gov.it/it/mappe-e-dashboard rischi/piattaforma-radar/](https://mappe.protezionecivile.gov.it/it/mappe-e-dashboard-rischi/piattaforma-radar/)
- [15] EUMETSAT . (2025). *LI Lightning Groups – MTG – 0 degree* [Dataset]. EUMETSAT Data Store. <https://data.eumetsat.int/>
- [16] Fathi-Vajargah, B., & Khoshkar-Foshtomi, H. (2013). Simulating of poisson point process using conditional intensity function (Hazard function). *International Journal of Advanced Statistics and Probability*, 2(1).

Bibliografia
