

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Tesi di Laurea Magistrale

## Valutazione del rischio legato al fulmine nelle stazioni AT/MT

Relatori

Enrico PONS

Pietro COLELLA

Giovanni PECA

Candidato

Giuseppe FIUME

Luglio 2024



# Abstract

Il seguente lavoro mira a valutare il rischio di fulminazione in stazioni di trasformazione AT/MT, proprietà di IRETI S.p.A. Le stazioni elettriche esaminate sono site in Torino, Parma e Vercelli. Ai fini del calcolo del rischio legato al fulmine, si fa riferimento alla norma CEI EN 62305, che fornisce le definizioni e gli strumenti necessari per il calcolo del rischio. In particolare, di maggiore interesse, è la parte due della norma, che tratta proprio la valutazione del rischio. I calcoli sono stati sviluppati con l'ausilio del software "Flash" fornito dal Comitato Elettrotecnico Italiano. Il software calcola le diverse componenti di rischio legato al fulmine in funzione dei dati in input che gli vengono forniti. Al fine di ottenere tutti i dati utili per il calcolo, oltre allo studio della documentazione fornita da IRETI, sono stati effettuati dei sopralluoghi nelle stazioni di interesse, con lo scopo di analizzare direttamente la struttura oggetto della valutazione del rischio. Nell'utilizzare il software "Flash" emergono alcune criticità, dovute al fatto che questo è pensato per essere applicato ad edifici convenzionali, con impianti BT. Infatti, la CEI EN 62305, che è alla base del software del CEI, non dichiara esplicitamente la possibilità di applicare la valutazione del rischio alle stazioni elettriche. Il seguente lavoro di tesi ha quindi come scopo anche quello di esaltare le criticità dell'applicazione della norma al caso delle stazioni elettriche e sottolineare le ipotesi fatte per la selezione dei fattori utilizzati al fine della valutazione del rischio con il software "Flash". Nel seguente lavoro non vengono esaminate tutte le stazioni, ma solo le principali tipologie, basate sulle caratteristiche della struttura e sul posizionamento delle apparecchiature elettriche all'interno di essa. Il risultato finale della tesi consiste quindi in un insieme di valori numerici, cioè i valori di rischio della struttura, che vengono confrontati con il rischio tollerabile. Questo lavoro getta le basi per una successiva valutazione dell'installazione di sistemi di protezione contro il fulmine nel caso in cui la stazione elettrica presenti dei valori di rischio superiori ai valori tollerabili.

# Ringraziamenti

*Dedico questo giorno a me stesso,  
al mio impegno e alla mia determinazione.  
Ringrazio fortemente tutti coloro che mi hanno  
sostenuto con la loro vicinanza e presenza.*



# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	VII
<b>Elenco delle figure</b>	IX
<b>Simboli e Definizioni</b>	XII
<b>1 Introduzione</b>	1
<b>2 La norma CEI EN 62305</b>	6
2.1 Introduzione alla norma . . . . .	6
2.2 Protezione contro i fulmini. Parte 2: Valutazione del rischio . . . . .	8
2.2.1 Spiegazione dei termini . . . . .	8
2.2.2 Metodo di valutazione . . . . .	10
2.2.3 Componenti di rischio . . . . .	13
2.2.4 Determinazione del rischio di perdita di vite umane ( $R_1$ ) . . . . .	18
2.2.5 Determinazione del rischio di perdita di servizio pubblico ( $R_2$ ) . . . . .	19
2.2.6 Determinazione del rischi di perdita di patrimonio culturale insostituibile ( $R_3$ ) . . . . .	19
2.2.7 Determinazione del rischio di perdita economica ( $R_4$ ) . . . . .	20
2.2.8 Esito della valutazione . . . . .	20
<b>3 Applicabilità della norma al caso delle stazioni elettriche</b>	22
3.1 Problemi nell'applicazione della norma al caso delle stazioni elettriche	23
3.2 Programmi di supporto al calcolo . . . . .	23
3.2.1 Introduzione al Flash . . . . .	23
3.2.2 Limiti del software "Flash" . . . . .	24
3.2.3 Valutazione del rischio mediante foglio di calcolo . . . . .	25
3.3 Ipotesi di base per l'applicazione della norma alle stazioni AT/MT: Articoli scientifici . . . . .	32
3.4 Ipotesi di base per l'applicazione della norma alle stazioni AT/MT: Ipotesi elaborate per il seguente lavoro di tesi . . . . .	33

3.4.1	Ipotesi: struttura . . . . .	34
3.4.2	Ipotesi: linee . . . . .	34
3.4.3	Ipotesi: rischi e perdite . . . . .	39
3.4.4	Ipotesi: zone . . . . .	41
3.4.5	Ipotesi: impianti . . . . .	44
3.4.6	Analisi parametriche . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Valutazione del rischio di fulminazione</b>	<b>55</b>
4.1	Stazione SUD di Torino . . . . .	56
4.1.1	Caratteristiche stazione SUD di Torino . . . . .	56
4.1.2	Modifiche al foglio di calcolo excel . . . . .	63
4.1.3	Risultati stazione SUD di Torino . . . . .	63
4.2	Stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	68
4.2.1	Caratteristiche stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	68
4.2.2	Modifiche al foglio di calcolo excel . . . . .	75
4.2.3	Risultati stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	75
4.3	Stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	79
4.3.1	Caratteristiche stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	79
4.3.2	Modifiche al foglio di calcolo excel . . . . .	87
4.3.3	Risultati stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	88
4.4	Stazione SPIP di Parma . . . . .	93
4.4.1	Caratteristiche stazione SPIP di Parma . . . . .	93
4.4.2	Modifiche al foglio di calcolo excel . . . . .	101
4.4.3	Risultati stazione SPIP di Parma . . . . .	102
4.5	Considerazioni finali . . . . .	107
	<b>Bibliografia</b>	<b>108</b>

# Elenco delle tabelle

2.1	Tipici valori di rischio tollerabile $R_T$ . . . . .	10
2.2	Modi in cui un fulmine può causare un danno alla ad una struttura	11
2.3	Componenti di rischio da considerare per ciascun tipo di perdita in una struttura . . . . .	12
3.1	Valori della probabilità $P_{LI}$ in funzione del tipo di linea e della tensione di tenuta ad impulso degli apparati . . . . .	24
3.2	Valori di probabilità $P$ e dei corrispondenti valori di $I$ . . . . .	30
3.3	Valori di $U_w$ e corrispondente $P_{LI}$ . . . . .	31
3.4	Valori di $U_w$ e corrispondente $P_{LD}$ . . . . .	31
3.5	Caratteristiche schermi cavi AT . . . . .	35
3.6	Fattori correttivi per le linee MT . . . . .	37
3.7	Caratteristiche schermi cavi MT . . . . .	38
3.8	Caratteristiche schermi cavi BT . . . . .	38
3.9	Valori delle tipiche percentuali medie $L_T$ , $L_F$ e $L_O$ . . . . .	40
3.10	Suddivisione dei costi nelle zone . . . . .	42
3.11	Valori delle tipiche percentuali medie $L_F$ e $L_O$ per la zona "Trasformatori" . . . . .	43
3.12	Valori della tipica percentuale media $L_O$ per la zona "Quadri" . . . . .	43
3.13	Valori della tipica percentuale media $L_O$ per la zona "Struttura" . . . . .	44
3.14	Valori generali dell'impianto ausiliari . . . . .	45
3.15	Risultati analisi connessione linea-impianto . . . . .	49
3.16	Risultati analisi sull'importanza del numero di linee - influenza delle linee AT . . . . .	51
3.17	Risultati analisi sull'importanza del numero di linee - influenza delle linee MT . . . . .	52
3.18	Risultati analisi sulla tensione di isolamento . . . . .	52
3.19	Risultati analisi sull'importanza della tensione di isolamento degli impianti MT e AT . . . . .	53
3.20	Risultati analisi sulla schermatura degli impianti "Quadri" e "Trasformatori" . . . . .	54

3.21	Risultati analisi sulla divisione in zone . . . . .	54
4.1	Informazioni zone Stazione SUD di Torino . . . . .	60
4.2	Suddivisione dei costi stazione SUD di Torino . . . . .	61
4.3	Valori impianto Trasformatori stazione SUD di Torino . . . . .	62
4.4	Valori impianto Quadri stazione SUD di Torino . . . . .	63
4.5	Risultati rischio R1 stazione SUD di Torino . . . . .	64
4.6	Risultati rischio R2 stazione SUD di Torino . . . . .	65
4.7	Risultati rischio R4 stazione SUD di Torino . . . . .	66
4.8	Informazioni zone Stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	72
4.9	Suddivisione dei costi stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	73
4.10	Valori impianto Trasformatori stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	74
4.11	Valori impianto Quadri stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	74
4.12	Risultati rischio R1 stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	76
4.13	Risultati rischio R2 stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	77
4.14	Risultati rischio R4 stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	78
4.15	Caratteristiche schermi cavi MT (7kV) . . . . .	84
4.16	Informazioni zone Stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	85
4.17	Suddivisione dei costi stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	85
4.18	Valori impianto "Trasformatori Aerea" stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	86
4.19	Valori impianto "Trasformatori cavo" stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	86
4.20	Valori impianto "Quadri MT" stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	87
4.21	Valori impianto "Quadri MT (7kV)" stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	87
4.22	Risultati rischio R1 stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	89
4.23	Risultati rischio R2 stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	90
4.24	Risultati rischio R4 stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	91
4.25	Informazioni zone Stazione SPIP di Parma . . . . .	99
4.26	Suddivisione dei costi stazione SPIP di Parma . . . . .	100
4.27	Valori impianto Trasformatori stazione SPIP di Parma . . . . .	100
4.28	Valori impianto Quadri stazione SPIP di Parma . . . . .	101
4.29	Risultati rischio R1 stazione SPIP di Parma . . . . .	103
4.30	Risultati rischio R2 stazione SPIP di Parma . . . . .	104
4.31	Risultati rischio R4 stazione SPIP di Parma . . . . .	106

# Elenco delle figure

1.1	Fulmine discendente: fasi della scarica [3] . . . . .	3
1.2	Tipi di fulmine [3] . . . . .	4
2.1	Procedura generale di calcolo del rischio R . . . . .	13
3.1	Tabella per l'inserimento dei dati generali della struttura . . . . .	26
3.2	Tabella per l'inserimento dei dati delle linee . . . . .	26
3.3	Tabella per l'inserimento dei dati delle zone . . . . .	27
3.4	Tabella per l'inserimento dei costi della struttura . . . . .	28
3.5	Tabella con le componenti di rischio R1 . . . . .	29
3.6	Andamento iperbolico probabilità $P_{LI}$ . . . . .	30
3.7	Percorso cavi MT Martinetto . . . . .	36
3.8	Percorso cavi MT Arbarello . . . . .	37
3.9	Spiegazione grafica dei casi dell'analisi sulla connessione linea-impianto	48
3.10	Spiegazione grafica dei casi dell'analisi sull'importanza del numero di linee . . . . .	50
4.1	Piazzale interno stazione SUD . . . . .	57
4.2	Cavi MT stazione SUD . . . . .	58
4.3	Trasformatore AT/MT stazione SUD . . . . .	59
4.4	Terminali in aria dei trasformatori AT/MT stazione SUD . . . . .	60
4.5	Rappresentazione stazione SUD di Torino . . . . .	61
4.6	Stazione SUD di Torino [17] . . . . .	62
4.7	Componenti rischio R1 stazione SUD di Torino . . . . .	65
4.8	Componenti rischio R2 stazione SUD di Torino . . . . .	66
4.9	Componenti rischio R4 stazione SUD di Torino . . . . .	67
4.10	Trasformatore AT/MT stazione ARBARELLO . . . . .	69
4.11	Quadri MT stazione ARBARELLO . . . . .	70
4.12	Cavi MT stazione ARBARELLO . . . . .	71
4.13	Locale passaggio cavi stazione ARBARELLO . . . . .	72
4.14	Rappresentazione stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	73

4.15	Componenti rischio R1 stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	76
4.16	Componenti rischio R2 stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	77
4.17	Componenti rischio R4 stazione ARBARELLO di Torino . . . . .	78
4.18	Trasformatore AT/MT stazione SUD-OVEST . . . . .	80
4.19	Sezione 27kV in aria stazione SUD-OVEST . . . . .	81
4.20	Quadri MT stazione SUD-OVEST . . . . .	82
4.21	Arrivo linea AT da stazione Terna a stazione SUD-OVEST . . . . .	83
4.22	Rappresentazione stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	83
4.23	Stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	84
4.24	Componenti rischio R1 stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	90
4.25	Componenti rischio R2 stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	91
4.26	Componenti rischio R4 stazione SUD-OVEST di Torino . . . . .	92
4.27	Quadro MT stazione SPIP . . . . .	94
4.28	Cavi MT con TA stazione SPIP . . . . .	95
4.29	Modulo ibrido stazione SPIP . . . . .	96
4.30	Arrivo cavi AT stazione SPIP . . . . .	97
4.31	Rappresentazione stazione SPIP di Parma . . . . .	98
4.32	Stazione SPIP di Parma . . . . .	98
4.33	Componenti rischio R1 stazione SPIP di Parma . . . . .	104
4.34	Componenti rischio R2 stazione SPIP di Parma . . . . .	105
4.35	Componenti rischio R4 stazione SPIP di Parma . . . . .	106



# Simboli e Definizioni

## **Fulmine su una struttura**

Fulmine che colpisce una struttura da proteggere

## **Fulmine in prossimità di una struttura**

Fulmine che colpisce tanto vicino ad una struttura da proteggere, da essere in grado di generare sovratensioni pericolose

## **Fulmine su una linea**

Fulmine che colpisce una linea connessa alla struttura da proteggere

## **Fulmine in prossimità di una linea**

Fulmine che colpisce tanto vicino ad una linea connessa alla struttura da proteggere, da essere in grado di generare sovratensioni pericolose

## **Danni ad esseri viventi**

Danni, inclusa la perdita della vita, causata a uomini o animali per elettrocuzione provocata da tensioni di contatto e di passo generate dal fulmine

## **LEMP**

Impulso elettromagnetico del fulmine, tutti gli effetti elettromagnetici della corrente di fulmine che possono generare impulsi e campi elettromagnetici mediante accoppiamento resistivo, induttivo e capacitivo

## **LPL**

Livello di protezione, numero, associato ad un gruppo di valori dei parametri della corrente di fulmine, relativo alla probabilità che i correlati valori massimo e minimo di progetto non siano superati in natura

## **Misure di protezione**

Misure da adottare nella struttura da proteggere per ridurre il rischio

**LP**

Protezione contro il fulmine, sistema completo usato per la protezione contro il fulmine delle strutture, dei loro impianti interni, del loro contenuto e delle persone, costituito in generale da un LPS e dalle SPM

**Z<sub>s</sub>**

Zona di struttura, parte di una struttura con caratteristiche omogenee, in cui può essere usato un unico gruppo di parametri per la valutazione di una componente di rischio

**LPS**

Sistema di protezione contro il fulmine, impianto completo usato per ridurre il danno materiale dovuto alla fulminazione diretta della struttura

**SPM**

Misure di protezione contro il LEMP, misure usate per la protezione degli impianti interni contro gli effetti del LEMP

**SPD**

Limitatore di sovratensione, dispositivo che limita le sovratensioni e scarica le correnti impulsive; contiene almeno un componente non lineare

**Sistema di SPD**

Gruppo di SPD adeguatamente scelto, coordinato ed installato per ridurre i guasti degli impianti elettrici ed elettronici

**A<sub>D</sub>**

Area di raccolta dei fulmini su una struttura isolata

**A<sub>DJ</sub>**

Area di raccolta dei fulmini su una struttura adiacente

**A<sub>I</sub>**

Area di raccolta dei fulmini in prossimità di una linea

**A<sub>L</sub>**

Area di raccolta dei fulmini su una linea

**A<sub>M</sub>**

Area di raccolta dei fulmini in prossimità di una struttura

<b>B</b>	Struttura
<b>C<sub>D</sub></b>	Coefficiente di posizione
<b>C<sub>DJ</sub></b>	Coefficiente di posizione di una struttura adiacente
<b>C<sub>E</sub></b>	Coefficiente ambientale
<b>C<sub>I</sub></b>	Coefficiente di installazione di una linea
<b>C<sub>L</sub></b>	Costo annuo della perdita totale senza misure di protezione
<b>C<sub>LD</sub></b>	Coefficiente dipendente dalla schermatura, dalle condizioni di messa a terra e di separazione di una linea per fulmini sulla linea stessa
<b>C<sub>LI</sub></b>	Coefficiente dipendente dalla schermatura, dalle condizioni di messa a terra e di separazione di una linea per fulmini in prossimità della linea stessa
<b>C<sub>T</sub></b>	Coefficiente di correzione per un trasformatore AT/BT sulla linea
<b>D1</b>	Danno ad esseri viventi per elettrocuzione
<b>D2</b>	Danno materiale
<b>D3</b>	Guasto di impianti elettrici ed elettronici
<b>K<sub>S1</sub></b>	Coefficiente relativo all'efficacia dell'effetto schermante della struttura

<b>K<sub>S2</sub></b>	Coefficiente relativo all'efficacia di uno schermo interno alla struttura
<b>K<sub>S3</sub></b>	Coefficiente relativo alle caratteristiche dei circuiti interni alla struttura
<b>K<sub>S4</sub></b>	Coefficiente relativo alla tensione di tenuta ad impulso di un impianto interno
<b>L<sub>F</sub></b>	Tipica percentuale di perdita per danni materiali in una struttura
<b>L<sub>O</sub></b>	Tipica percentuale di perdita per guasto di impianti interni in una struttura
<b>L<sub>T</sub></b>	Tipica percentuale di perdita per danni ad esseri viventi per elettrocuzione
<b>L1</b>	Perdita di vite umane
<b>L2</b>	Perdita di servizio pubblico
<b>L3</b>	Perdita di patrimonio culturale insostituibile
<b>L4</b>	Perdita economica
<b>N<sub>G</sub></b>	Densità di fulmini al suolo
<b>n<sub>Z</sub></b>	Numero delle possibili persone danneggiate (vittime o utenti non serviti)
<b>n<sub>T</sub></b>	Numero totale di persone (o utenti non serviti)
<b>P</b>	Probabilità di danno

- P<sub>A</sub>**  
Probabilità di danno ad esseri viventi per elettrocuzione (fulminazione sulla struttura)
- P<sub>B</sub>**  
Probabilità di danno materiale in una struttura (fulminazione sulla struttura)
- P<sub>C</sub>**  
Probabilità di guasto di un impianti interno (fulminazione sulla struttura)
- P<sub>M</sub>**  
Probabilità di guasto degli impianti interni (fulmine in prossimità della struttura)
- P<sub>U</sub>**  
Probabilità di danno ad esseri viventi (fulmine sulla linea connessa)
- P<sub>V</sub>**  
Probabilità di danno materiale nella struttura (fulmine sulla linea connessa)
- P<sub>W</sub>**  
Probabilità di guasto di un impianto interno (fulmine sulla linea connessa)
- P<sub>X</sub>**  
Probabilità di danno nella struttura
- P<sub>Z</sub>**  
Probabilità di guasto degli impianti interni (fulmine in prossimità della linea connessa)
- P<sub>EB</sub>**  
Probabilità che riduce  $P_U$  e  $P_V$  dipendente dalle caratteristiche della linea e dalla tensione di tenuta degli apparati in presenza di EB (equipotenzializzazione al fulmine)
- P<sub>LD</sub>**  
Probabilità che riduce  $P_U$ ,  $P_V$  e  $P_W$  dipendente dalle caratteristiche e dalla tensione di tenuta degli apparati (fulmine sulla linea connessa)
- P<sub>LI</sub>**  
Probabilità che riduce  $P_Z$  dipendente dalle caratteristiche e dalla tensione di tenuta degli apparati (fulmine in prossimità della linea)

**P<sub>SPD</sub>**

Probabilità che riduce  $P_C$ ,  $P_M$ ,  $P_W$  e  $P_Z$ , quando sia installato un sistema di SPD

**P<sub>TA</sub>**

Probabilità che riduce  $P_A$  dipendente dalle misure di protezione contro le tensioni di contatto e di passo

**r<sub>t</sub>**

Coefficiente di riduzione associato al tipo di superficie

**r<sub>f</sub>**

Coefficiente di riduzione delle perdite dipendente dal rischio di incendio

**r<sub>p</sub>**

Coefficiente di riduzione delle perdite correlato alle misure antincendio

**R<sub>T</sub>**

Rischio tollerabile, valore massimo del rischio che può essere tollerato nella struttura da proteggere

**R<sub>A</sub>**

Componente di rischio (danno ad esseri viventi-fulmine sulla struttura)

**R<sub>B</sub>**

Componente di rischio (danno materiale alla struttura-fulmine sulla struttura)

**R<sub>C</sub>**

Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine sulla struttura)

**R<sub>M</sub>**

Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità della struttura)

**R<sub>U</sub>**

Componente di rischio (danno ad esseri viventi-fulmine sulla linea connessa)

**R<sub>V</sub>**

Componente di rischio (danno materiale alla struttura-fulmine sulla linea connessa)

<b>R<sub>w</sub></b>	Componente di rischio (danno agli impianti-fulmine sulla linea connessa)
<b>R<sub>z</sub></b>	Componente di rischio (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità di una linea)
<b>R1</b>	Rischio di perdita di vite umane nella struttura
<b>R2</b>	Rischio di perdita di un servizio pubblico in una struttura
<b>R3</b>	Rischio di perdita di patrimonio culturale insostituibile in una struttura
<b>R4</b>	Rischio di perdita economica in una struttura
<b>S</b>	Struttura
<b>S1</b>	Sorgente di danno (fulmine sulla struttura)
<b>S2</b>	Sorgente di danno (fulmine in prossimità della struttura)
<b>S3</b>	Sorgente di danno (fulmine sulla linea)
<b>S4</b>	Sorgente di danno (Fulmine in prossimità della linea)
<b>t<sub>z</sub></b>	Tempo di permanenza delle persone in un luogo pericoloso (ore/anno)
<b>U<sub>w</sub></b>	Tensione di tenuta nominale ad impulso di un impianto
<b>w<sub>m</sub></b>	Lato di maglia

# Capitolo 1

## Introduzione

Il fulmine è un fenomeno naturale che consiste in una scarica atmosferica al suolo, talvolta con effetti disastrosi. È un fenomeno più comune di quanto si pensi. Secondo il Meteorology Office del Regno Unito, si stimano circa 1.4 miliardi di fulmini all'anno, approssimativamente 44 scariche ogni secondo [1]. È stato osservato come la frequenza delle scariche al suolo sia stata accresciuta dal fenomeno del riscaldamento globale. Per ogni 1% di aumento della temperatura, ci si aspetta una aumento del 6% nella frequenza dei fulmini [2].

Esistono due tipi principali di fulmine:

- fulmini discendenti iniziati da canali procedenti dalla nube verso terra;
- fulmini ascendenti iniziati da canali procedenti da una struttura a terra verso la nube.

Il fulmine ascendente riguarda solo le strutture molto alte e snelle, in pratica solo per le strutture più alte di 80 metri. Le strutture più basse sono di fatto interessate solo da fulmini discendenti, come per il caso delle stazioni elettriche. Nel meccanismo di formazione del fulmine si possono identificare essenzialmente tre fasi:

1. formazione del canale di fulmine;
2. formazione della controscarica;
3. sviluppo della scarica di ritorno.

Facendo riferimento ad un fulmine che abbia origine dalla nuvola (fulmine discendente):

1. *Formazione del canale di fulmine*

Una scarica può iniziare nella parte inferiore della nuvola, per via dell'intenso

campo elettrico locale e della rarefazione dell'aria. Successivamente, sotto l'azione del campo elettrico, la scarica si propaga verso terra, assumendo la forma di un canale ramificato. Questo canale è costituito da un nucleo altamente conduttore (plasma ionizzato), del diametro di circa 1 cm, circondato per effetto corona da una carica spaziale di polarità uguale a quella delle cariche contenute nella parte inferiore della nuvola, in genere negativa. La scarica si propaga in aria arrestandosi nel punto in cui il campo elettrico è inferiore alla rigidità dielettrica dell'aria. La carica elettrica discendente dalla nube si accumula nel canale e rinforza il campo elettrico, finché la scarica riprende verso il basso. Il canale procede a zig-zag poiché la direzione di avanzamento è determinata dalle mutevoli condizioni locali e per scatti successivi, come osservabile in figura 1.1(a). La velocità di avanzamento del canale è di qualche millesimo della velocità della luce. La carica elettrica depositata lungo il canale è di alcuni coulomb mentre la corrente associata al trasporto di questa carica è dell'ordine delle centinaia di ampere

2. *Formazione della controscarica*

Quando il canale di fulmine arriva in prossimità del suolo (10-100 m) il campo elettrico diventa così alto da dar luogo sul terreno, specie su strutture alte, a fenomeni di effluvio. Si forma così un canale di controscarica che si sviluppa verso l'alto fino ad incontrare il canale discendente (figura 1.1(b)).

3. *Sviluppo della scarica di ritorno*

Quando il canale discendente incontra quello di controscarica inizia lo smaltimento a terra delle cariche depositate lungo il canale discendente. Il fenomeno può essere visto come il passaggio di cariche di segno opposto a quelle del canale di fulmine, e quindi positive, che fluiscono dal terreno verso il canale di fulmine per neutralizzare la carica negativa presente nel canale stesso. Si ha quindi il passaggio di corrente attraverso la struttura colpita: tale corrente prende il nome di *corrente di fulmine*. Questo processo è accompagnato dal manifestarsi della "scarica di ritorno" che si propaga verso l'alto lungo il canale con una velocità compresa fra il 10% e il 50% di quella della luce. La scarica di ritorno illumina vivamente il canale e le sue ramificazioni: essa costituisce la parte visibile del fenomeno della fulminazione (figura 1.1(c)(d)). L'intensità della corrente drenata a terra, attraverso la struttura colpita, è molto maggiore di quella che accompagna l'avanzamento del canale di fulmine verso terra. Infatti la carica elettrica in gioco nelle due fasi è la stessa, ma nella seconda fase la carica è smaltita a terra con una velocità anche metà di quella della luce. Nella fase di scarica a terra si possono raggiungere intensità di corrente di centinaia di migliaia di ampere.

Un'altra classificazione del fulmine è data dalla sua polarità. Si definisce polarità di un fulmine quella della carica posseduta dalla parte della nuvola con la quale

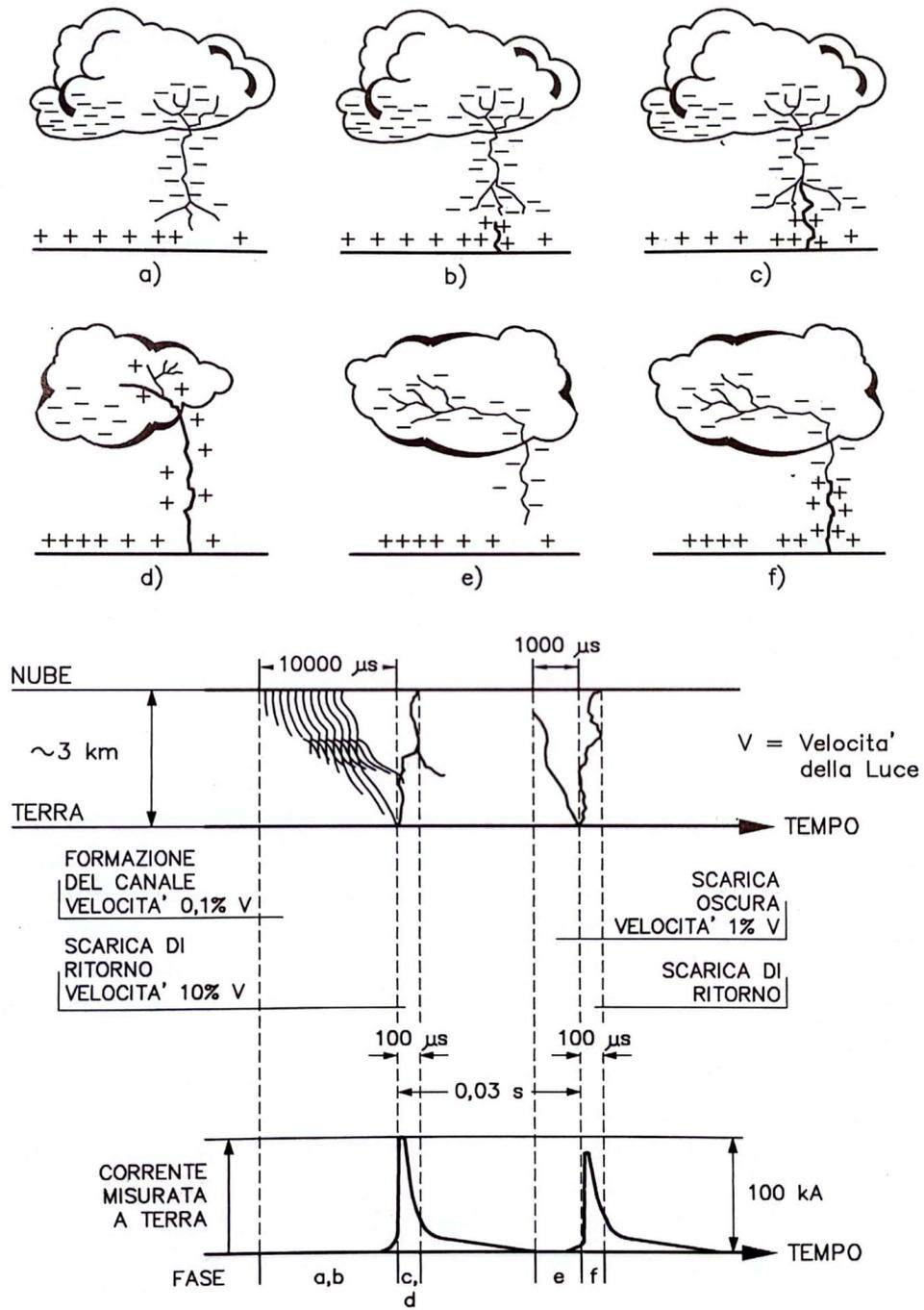
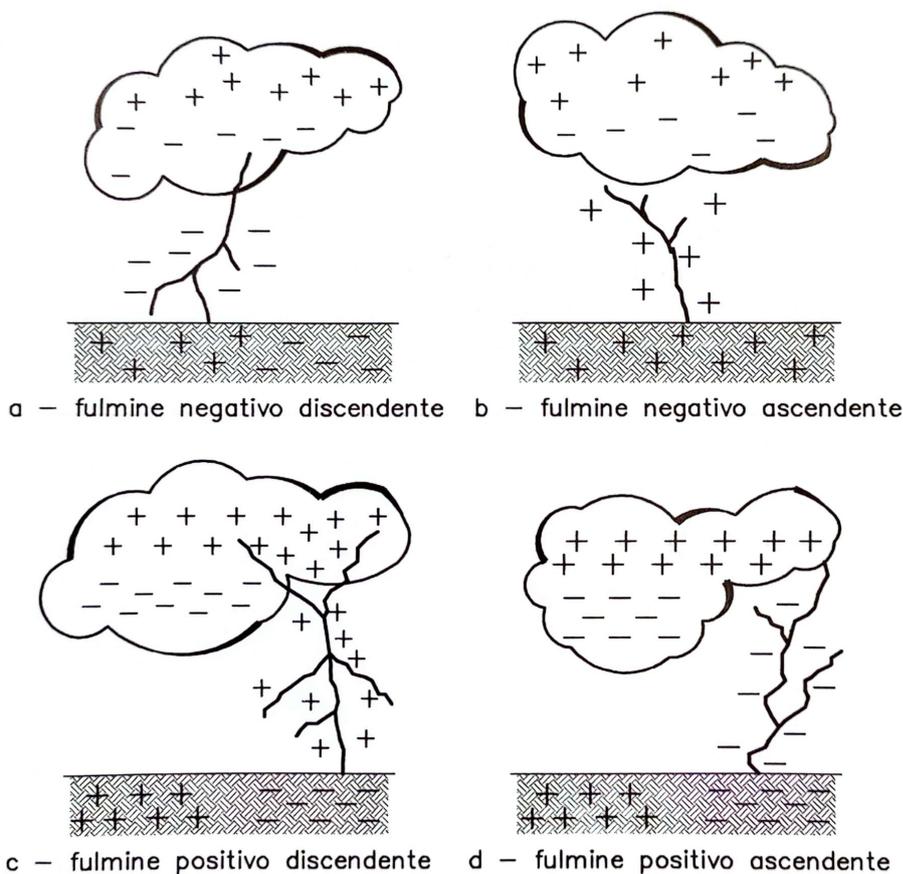


Figura 1.1: Fulmine discendente: fasi della scarica [3]

avviene lo scambio di cariche elettriche. Con questa convenzione circa il 90% dei fulmini è negativo. La principale differenza fra fulmini positivi e negativi è che quelli negativi sono spesso costituiti da più colpi, mentre quelli positivi sono costituiti da un solo colpo. Questo perché la carica positiva è situata nella parte alta della nuvola, perciò il canale del fulmine positivo ha sempre lunghezze notevoli ed elevato risulta il tempo che la scarica di ritorno impiega a neutralizzare la carica depositata in esso. Le parti più "vecchie" del canale si raffreddano, si deionizzano e vengono meno le condizioni favorevoli alla formazione di scariche successive [3].



**Figura 1.2:** Tipi di fulmine [3]

L'enorme quantità di energia rilasciata istantaneamente dal fulmine (anche  $E_{specifica} = 15000kJ/\Omega$ ) può causare gravi infortuni e vittime tra gli essere viventi, oltre a danni a strutture ed impianti, con gravi conseguenze di carattere economico

[4][5]. Seppur non si conoscono dispositivi o metodi atti a modificare i naturali fenomeni meteorologici al punto di prevenire la formazione dei fulmini [6], è possibile l'adozione di misure di protezione contro il fulmine. Le stazioni di trasformazione, in particolare quelle AT/MT, alla base del lavoro di questa tesi, sono uno degli elementi essenziali nel sistema elettrico. Tipicamente queste sono situate in luoghi suburbani e quindi più facilmente soggette al fulmine. In generale, il fulmine può produrre sovracorrenti e sovratensioni causando scariche nell'isolamento delle apparecchiature, tensioni di passo e contatto pericolose e possibilità di innesco in presenza di atmosfere esplosive o con la presenza di materiali infiammabili. In particolare, fulmini sulle stazioni di trasformazione possono causare anche gravi effetti nelle vicinanze, tra cui aumento del potenziale del terreno e tensioni indotte nelle linee di distribuzione che possono trasferirsi fino ai clienti, e causare il danneggiamento dei loro servizi [7]. L'importanza della valutazione del rischio legato al fulmine nelle stazioni AT/MT è quindi quello di minimizzare il tasso di infortuni degli operatori mentre lavorano nella stazione e assicurare la continuità della fornitura elettrica ai clienti [4].

# Capitolo 2

## La norma CEI EN 62305

### 2.1 Introduzione alla norma

La serie di norme principali per la protezione contro le scariche atmosferiche è la CEI EN 62305, la cui versione attualmente in vigore è la seconda edizione pubblicata dal CEI nel 2013. Fornisce i principi generali riguardo la protezione contro i fulmini, calcolo e gestione del rischio, misure di protezione contro i danni fisici alla struttura e contro la perdita di vite umane oltre che le misure di protezione contro i danni a sistemi elettrici ed elettronici all'interno della struttura. La serie di norme CEI EN 62305 è composta da quattro parti [6][8][9][10]:

- ***CEI EN 62305-1 "Protezione contro i fulmini. Principi generali"***: questa parte definisce i principi generali alla base della protezione contro i fulmini di strutture e degli impianti in esse entranti, mettendo in evidenza i possibili effetti che un fulmine può causare alla struttura colpita in base alle caratteristiche della struttura stessa. Introduce termini e definizioni, parametri della corrente di fulmine, danni dovuti al fulmine, criteri base per la protezione e parametri per simulare tramite dei test l'effetto dei fulmini nei componenti del sistema di protezione contro il fulmine (LPS);
- ***CEI EN 62305-2 "Protezione contro i fulmini. Valutazione del rischio"***: questa parte fornisce la procedura per la determinazione del rischio dovuto al fulmine. Tale procedura consente di stabilire se la protezione della struttura sia necessaria o meno e, in caso affermativo, di individuare le misure più idonee da adottare secondo le modalità richieste dalle altre parti della norma. La decisione di adottare misure di protezione contro il fulmine può essere presa indipendentemente dal risultato di qualsivoglia valutazione del rischio;

- ***CEI EN 62305-3 "Protezione contro i fulmini. Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone":***

la terza parte tratta della protezione contro i fulmini di una struttura per limitare i danni materiali e i danni agli esseri viventi. Sono forniti i criteri per la realizzazione dell'impianto di protezione contro i fulmini (LPS). Vengono fornite le prescrizioni per il progetto, l'installazione, la verifica e la manutenzione di LPS per strutture e la messa in atto di misure di protezione contro i danni agli esseri viventi causati dalle tensioni di passo e di contatto. L'LPS è normalmente composto da un impianto di protezione esterno e da un impianto di protezione interno. L'impianto di protezione esterno ha lo scopo di:

- a. intercettare i fulmini diretti sulla struttura (con un sistema di captatori);
- b. condurre a terra senza danno la corrente di fulmine (con un sistema di calate);
- c. disperdere a terra la corrente di fulmine (con un sistema di dispersori).

L'impianto di protezione interno ha lo scopo di prevenire le scariche pericolose nella struttura utilizzando connessioni equipotenziali o distanze di sicurezza (e quindi isolamento elettrico) tra i componenti dell'LPS esterno ed altri elementi metallici interni alla struttura. Le principali misure di protezione contro i danni agli esseri viventi dovuti alle tensioni di contatto e di passo hanno lo scopo di:

1. ridurre la corrente pericolosa che può influire nel corpo mediante l'isolamento delle parti conduttrici esposte e/o incrementando la resistività superficiale del suolo;
2. ridurre la possibilità che si manifestino pericolose tensioni di contatto e di passo utilizzando barriere e/o cartelli ammonitori.

- ***CEI EN 62305-4 "Protezione contro i fulmini. Impianti elettrici ed elettronici":***

Questa ultima parte fornisce informazioni sul progetto, l'installazione, l'ispezione, la manutenzione e la verifica del sistema di misure di protezione (SPM) contro gli effetti elettromagnetici associati al fulmine (LEMP) sugli impianti elettrici ed elettronici interni alle strutture, al fine di ridurre il rischio di danni permanenti. I guasti permanenti agli impianti elettrici ed elettronici possono essere causati dall'impulso elettromagnetico connesso al fulmine (LEMP) tramite:

- a. gli impulsi condotti trasmessi agli apparati attraverso i conduttori;
- b. tramite gli effetti del campo elettromagnetico irradiato direttamente sull'apparato stesso.

Sono particolarmente importanti gli impianti elettrici ed elettronici utilizzati in installazioni caratterizzate da considerevoli costi d'investimento, dimensioni e complessità, per le quali il disservizio è un evento del tutto indesiderabile per motivi di sicurezza e di costi. Il sistema di protezione (SPM) degli impianti interni di energia e di segnale è realizzato mediante schermi magnetici che attenuano il campo magnetico inducente. Un'efficace protezione contro le sovratensioni responsabili dei guasti negli impianti interni può anche essere ottenuta mediante interfacce di protezione e/o mediante un sistema di SPD che limiti l'ampiezza delle sovratensioni a valori inferiori alla tensione nominale di tenuta del sistema da proteggere.

## **2.2 Protezione contro i fulmini. Parte 2: Valutazione del rischio**

Per i calcoli e la valutazione del rischio si fa riferimento alla parte due della norma CEI EN 62305. La normativa specifica una procedura per la valutazione del rischio dovuto a fulminazione e individua le misure di protezione, se necessarie, da realizzare per ridurre il rischio a valori non superiori a quello ritenuto tollerabile dalla norma.

### **2.2.1 Spiegazione dei termini**

I fulmini a terra sono pericolosi per le strutture e per i servizi. I fulmini che interessano la struttura possono essere divisi in:

- fulmini diretti sulla struttura;
- fulmini che colpiscono in prossimità della struttura, fulmini che colpiscono direttamente le linee connesse alla struttura stessa (linee di energia e di telecomunicazione) o fulmini che colpiscono in prossimità delle linee.

Il pericolo per la struttura può consistere in:

- danno alla struttura e al suo contenuto;
- guasti dei relativi impianti elettrici ed elettronici;
- danno agli esseri viventi all'interno o in prossimità della struttura.

I fulmini che colpiscono la struttura o una linea ad essa connessa possono causare danni materiali e pericolo per gli esseri viventi. I fulmini che colpiscono il suolo in prossimità della struttura o della linea ed i fulmini sulla struttura o sulla linea possono causare guasti agli impianti elettrici ed elettronici dovuti alle sovratensioni

derivanti dall'accoppiamento resistivo e induttivo di questi impianti con la corrente di fulmine. Gli effetti consequenziali del danno e dei guasti possono estendersi ai dintorni della struttura o possono interessare l'ambiente.

### ***Sorgente di rischi, S***

La corrente di fulmine è la principale sorgente di danno. Le sorgenti sono distinte in base al punto d'impatto del fulmine.

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

### ***Tipo di danno, D***

Un fulmine può causare danni in funzione delle caratteristiche della struttura da proteggere. Nelle pratiche applicazioni della determinazione del rischio, è utile distinguere tra i tre tipi principali di danno che possono manifestarsi come conseguenza di una fulminazione. I tipi di danno si distinguono in:

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

### ***Tipo di perdita, L***

Ciascun tipo di danno, solo o in combinazione con altri, può produrre diverse perdite nella struttura da proteggere. Il tipo di perdita che ne consegue dipende dalle caratteristiche della struttura stessa e dal suo contenuto. I tipi di perdita sono:

- 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).

### **Rischio, $R$**

Il rischio  $R$  è la misura della probabile perdita media annua. Per ciascun tipo di perdita che può verificarsi in una struttura può essere valutato il relativo rischio.

- 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).

### **Rischio tollerabile, $R_T$**

La definizione dei valori di rischio tollerabili  $R_T$  riguardanti le perdite di valore sociale sono stabilite dalla norma CEI EN 62305-2 e di seguito riportati.

- Rischio tollerabile per perdita di vite umane o danni permanenti ( $R_T=10^{-5}$   $anni^{-1}$ ).
- Rischio tollerabile per perdita di servizio pubblico ( $R_T=10^{-3}$   $anni^{-1}$ )
- Rischio tollerabile per perdita di patrimonio culturale insostituibile ( $R_T=10^{-4}$   $anni^{-1}$ )

I valori sono riassunti nella tabella 2.1. Le relazioni causa-effetto che descrivono i principali modi in cui un fulmine può causare un danno ad una struttura nel suo complesso sono riassunte nella tabella 2.2.

**Tabella 2.1:** Tipici valori di rischio tollerabile  $R_T$

Tipo di perdita	$R_T(1/anno)$
L1: Perdita di vite umane o danni permanenti	$10^{-5}$
L2: Perdita di servizio pubblico	$10^{-3}$
L3: Perdita di patrimonio culturale insostituibile	$10^{-4}$

### **2.2.2 Metodo di valutazione**

Ai fini della valutazione del rischio (R1, R2, R3, R4) 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  $R_X$ ;

**Tabella 2.2:** Modi in cui un fulmine può causare un danno alla ad una struttura

Sorgente di danno	Tipo di danno	Tipo di perdita
S1	D1	L1, L4*
	D2	L1, L2, L3, L4
	D3	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		

- confrontare il rischio  $R_X$  con quello tollerabile  $R_T$  (tranne per il rischio R4).

La tabella 2.3 riporta tutti gli elementi da valutare.

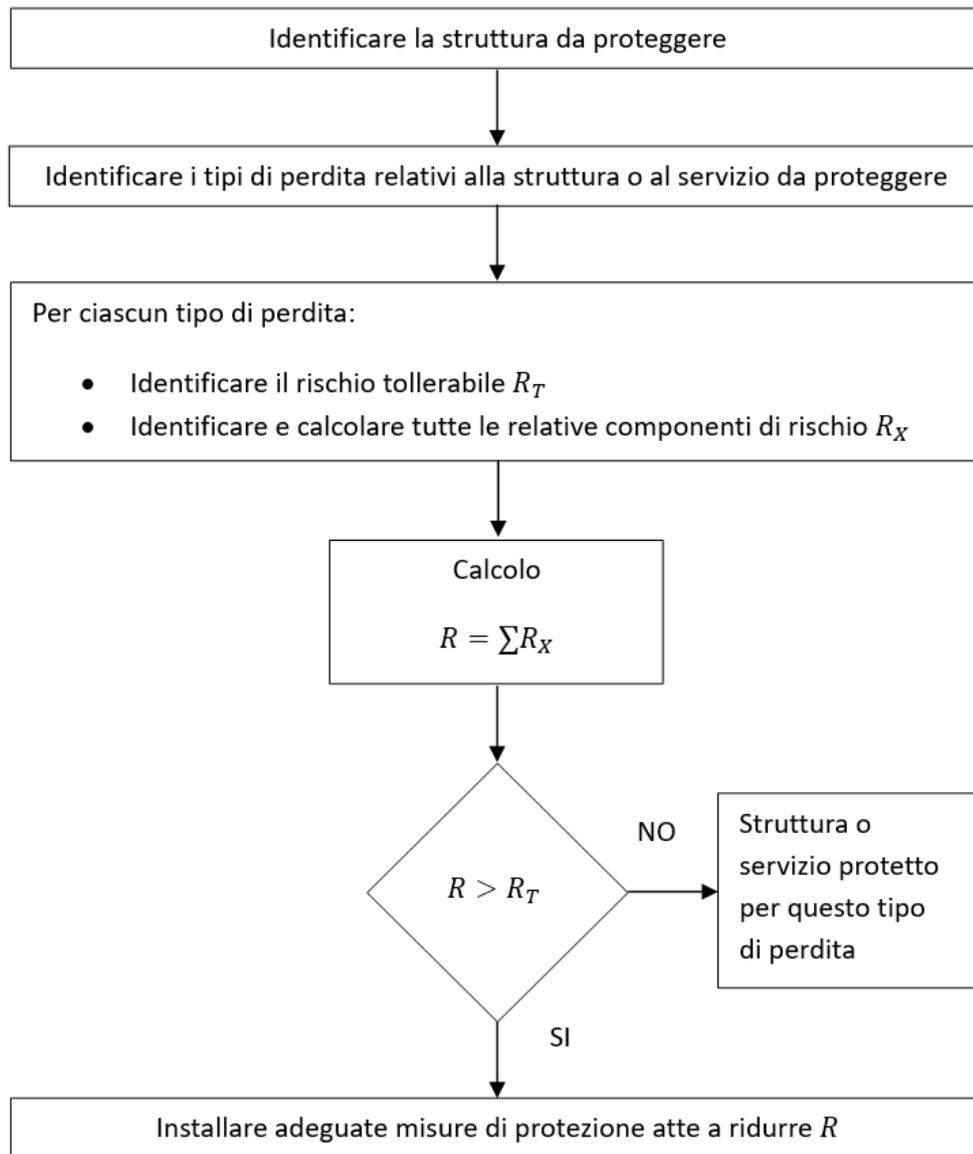
**Tabella 2.3:** Componenti di rischio da considerare per ciascun tipo di perdita in una struttura

Sorgente	S1			S2	S3			S4
Danno	D1	D2	D3	D3	D1	D2	D3	D3
Comp. di rischio	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_M$	$R_U$	$R_V$	$R_W$	$R_Z$
$R_1$	SI	SI	SI*	SI*	SI	SI	SI*	SI*
$R_2$	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI
$R_3$	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO
$R_4$	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 ciascun rischio devono essere effettuati i seguenti passi (vedi figura 2.1):

- identificazione delle componenti  $R_X$  che contribuiscono al rischio;
- calcolo della componente di rischio identificata  $R_X$ ;
- identificazione del rischio tollerabile  $R_T$ ;
- confronto del rischio  $R$  con quello tollerabile  $R_T$ .

Se  $R_X \leq R_T$  la protezione contro il fulmine non è necessaria. Se  $R_X > R_T$  devono essere adottate misure di protezione al fine di rendere  $R_X \leq R_T$  per tutti i rischi a cui è interessata la struttura. Per il rischio R4, oltre a determinare le componenti e il valore del rischio R4, deve essere effettuata la valutazione della convenienza economica della protezione effettuando il confronto tra il costo totale della perdita con e senza le misure di protezione.



**Figura 2.1:** Procedura generale di calcolo del rischio  $R$

### 2.2.3 Componenti di rischio

Le componenti di rischio sono raggruppate secondo la sorgente di danno ed il tipo di danno. Ciascuna delle componenti di rischio può essere calcolata mediante la seguente equazione generale:

$$R_X = N_X \times P_X \times L_X$$

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].

**Componente di rischio  $R_A$  (danno ad esseri viventi - fulmine sulla struttura)**

Componente relativa ai danni ad esseri viventi dovuti a tensioni di contatto e di passo in zone fino a 3 m all'esterno della struttura. Possono verificarsi perdite di tipo L1 (perdita di vite umane) e, in strutture ad uso agricolo, anche di tipo L4 (perdita economica) con possibile perdita di animali.

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A$$

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].

**Componente di rischio  $R_B$  (danno materiale alla struttura-fulmine sulla struttura)**

Componente relativa ai danni materiali causati da scariche pericolose all'interno della struttura che innescano l'incendio e l'esplosione e che possono essere pericolose per l'ambiente. Possono verificarsi tutti i tipi di perdita: L1 (perdita di vite umane), L2 (perdita di un servizio pubblico), L3 (perdita di patrimonio culturale insostituibile) e L4 (perdita economica).

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B$$

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].

### **Componenti di rischio $R_C$ (guasto di impianti interni-fulmini sulla struttura)**

Componente relativa al guasto di impianti interni causata dal LEMP (impulso elettromagnetico del fulmine). In tutti i casi possono verificarsi perdite di tipo L2 (perdita di un servizio pubblico) e L4 (perdita economica), unitamente al rischio L1 (perdita di vite umane) nel caso di strutture con rischio di esplosione e di ospedali o di altre strutture in cui il guasto degli impianti interni provoca immediato pericolo per la vita umana.

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C$$

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].

### **Componente di rischio $R_M$ (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità della struttura)**

Componente relativa al guasto di impianti interni causata dal LEMP (impulso elettromagnetico del fulmine). In tutti i casi possono verificarsi perdite di tipo L2 (perdita di un servizio pubblico) e L4 (perdita economica), unitamente al rischio L1 (perdita di vite umane) nel caso di strutture con rischio di esplosione e di ospedali o di altre strutture in cui il guasto degli impianti interni provoca immediato pericolo per la vita umana.

$$R_M = N_M \times P_M \times L_M$$

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].

**Componente di rischio  $R_U$  (danno ad esseri viventi-fulmine sul servizio connesso)**

Componente relativa ai danni ad esseri viventi dovuti a tensioni di contatto all'interno della struttura dovute alla corrente di fulmine iniettata nella linea entrante nella struttura. Possono verificarsi perdite di tipo L1 (perdite di vite umane) e, in strutture ad uso agricolo, anche di tipo L4 (perdita economica) con possibile perdita di animali.

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

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].

**Componente di rischio  $R_V$  (danno materiale alla struttura-fulmine sul servizio connesso)**

Componente relativa ai danni materiali (incendio o esplosione innescati da scariche pericolose fra installazioni esterne e parti metalliche, generalmente nel punto d'ingresso della linea nella struttura) dovuti alla corrente di fulmine trasmessa attraverso il servizio entrante. Possono verificarsi tutti i tipi di perdita: L1 (perdita

di vite umane), L2 (perdita di un servizio pubblico), L3 (perdita di patrimonio culturale insostituibile) e L4 (perdita economica).

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

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].

#### **Componente di rischio $R_W$ (danno agli impianti-fulmine sul servizio connesso)**

Componente relativa al guasto di impianti interni causati da sovratensioni indotte sulla linea e trasmesse alla struttura. In tutti i casi possono verificarsi perdite di tipo L2 (perdita di un servizio pubblico) e L4 (perdita economica), unitamente al rischio L1 (perdita di vite umane) nel caso di strutture con rischio di esplosione e di ospedali o di altre strutture in cui il guasto degli impianti interni provoca immediato pericolo per la vita umana.

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

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].

### **Componente di rischio $R_Z$ (guasto di impianti interni-fulmine in prossimità di un servizio connesso)**

Componente relativa al guasto di impianti interni causata da sovratensioni indotte sulla linea e trasmesse alla struttura. In tutti i casi possono verificarsi perdite di tipo L2 (perdita di un servizio pubblico) e L4 (perdita economica), unitamente al rischio L1 (perdita di vite umane) nel caso di strutture con rischio di esplosione e di ospedali o di altre strutture in cui il guasti degli impianti interni provoca immediato pericolo per la vita umana.

$$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z$$

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];

### **2.2.4 Determinazione del rischio di perdita di vite umane ( $R_1$ )**

Il rischio di perdita di vite umane è determinato come somma delle componenti di rischio precedentemente definite.

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

(\*) 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).

### 2.2.5 Determinazione del rischio di perdita di servizio pubblico ( $R_2$ )

Il rischio di perdita di servizio pubblico è determinato dalla formula:

$$R_2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z$$

dove:

- $R_B$ : 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);
- $R_V$ : 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).

### 2.2.6 Determinazione del rischi di perdita di patrimonio culturale insostituibile ( $R_3$ )

Il rischio di perdita di patrimonio culturale insostituibile è dato dalla formula:

$$R_3 = R_B + R_V$$

dove:

- $R_B$ : Componente di rischio (danno materiale della struttura-fulmine sulla struttura);
- $R_V$ : Componente di rischio (danno materiale alla struttura- fulmine sul servizio connesso);

### 2.2.7 Determinazione del rischio di perdita economica ( $R_4$ )

Il rischio di perdita economica è determinato secondo la formula:

$$R_4 = R_A^* + R_B + R_C + R_M + R_U^* + R_V + R_W + R_Z$$

(\*) Solo in strutture in cui si può verificare la perdita di animali

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).

### 2.2.8 Esito della valutazione

Una volta noti i valori di rischio per la struttura bisogna verificare che essi siano inferiori ai rischi tollerabili. Possono esserci tre differenti casi:

(1) **Struttura autoprotetta**

Se per ogni rischio calcolato i valori sono inferiori ai rispettivi  $R_T$  e non sono state adottate misure di protezione, la struttura oggetto di verifica può considerarsi "Autoprotetta".

(2) **Struttura protetta**

Se per ogni rischio calcolato i valori sono inferiori ai rispettivi  $R_T$  e sono state adottate misure di protezione, la struttura oggetto di verifica può considerarsi "Protetta".

(3) **Struttura NON protetta**

Se almeno un rischio calcolato è superiore al rispettivo  $R_T$  devono essere adottate misure di protezione al fine di rendere il rischio inferiore.

## Capitolo 3

# Applicabilità della norma al caso delle stazioni elettriche

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di calcolare il rischio legato al fulmine in stazioni elettriche di trasformazione AT/MT. L'importanza della valutazione del rischio di fulminazione per le stazioni è quello di minimizzare il tasso di infortuni degli operatori mentre lavorano nella cabina e quello di assicurare la continuità dell'alimentazione ai clienti [4]. Seppure la CEI EN 62305-2 contiene una metodologia standard per calcolare il rischio di fulminazione di edifici e strutture in modo probabilistico, questa norma non dichiara in maniera esplicita la possibilità di applicazione alle stazioni elettriche di alta tensione [11]. La mancanza di linee guida per l'applicazione della norma a casistiche quali quella oggetto di questa tesi e il processo tedioso di calcolo che coinvolge più di 70 parametri, fa sì che molti ingegneri e progettisti siano restii ad applicare la CEI EN 62305-2, preferendo metodi "rule of thumb" [4][11][12][13]. Alla base degli studi dell'argomento in questione, l'obiettivo comune è quello di proporre una metodologia di calcolo del rischio che possa andare bene anche per un caso particolare come quello della stazione AT/MT, e quindi validare l'applicabilità della CEI EN 62305-2 a questa tipologia di struttura. Diverse sono le analisi parametriche che hanno cercato di evidenziare quali sono i parametri più sensibili ai fini della valutazione del rischio. È fondamentale infatti capire l'effetto che il cambiamento di un parametro in ingresso ha nei parametri in uscita. Queste analisi permettono di capire quali sono, tra i tanti, i parametri che hanno un peso maggiore nel calcolo, che bisogna quindi scegliere con cura per evitare di avere risultati non sensati. Allo stesso tempo, è possibile capire anche quali sono i parametri che hanno un peso minore, e quindi quelli che possono essere scelti anche con minore precisione, poiché considerati poco influenti per il risultato finale [13][14][15][11].

## 3.1 Problemi nell'applicazione della norma al caso delle stazioni elettriche

Il problema principale che rende complicata l'applicazione della CEI EN 62305-2 al caso delle stazioni elettriche è dovuto proprio alle ambiguità nella scelta di alcuni fattori che emergono durante il calcolo del rischio [4]. La difficoltà deriva dal fatto che la norma si focalizza su strutture prettamente in bassa tensione. Seppure la norma non faccia particolari restrizioni sulla sua applicabilità, estendendo la possibilità di valutare il rischio per qualsiasi struttura, si capisce dalle tabelle presenti nella 62305 come questa possa essere principalmente applicata ad edifici residenziali, o strutture quali ospedali e musei. Questo porta all'impossibilità di applicare direttamente la norma al caso delle stazioni elettriche. Un esempio banale di difficoltà di applicazione è relativo alla tensione di tenuta dell'isolamento. Nella norma la massima tensione di tenuta che viene presa in considerazione è di 6 kV, nulla in confronto ai valori di tensione di tenuta che si possono trovare in una stazione AT/MT, che possono raggiungere anche centinaia di kV. L'obiettivo di questo lavoro è quindi anche quello di definire con criterio quelli che sono i parametri critici di input del problema e fornire delle idee per rendere la CEI EN 62305-2 fruibile e facilmente applicabile anche per casistiche come quella delle stazioni AT/MT, spronando il Comitato Elettrotecnico Italiano ad effettuare le giuste estensioni.

## 3.2 Programmi di supporto al calcolo

Per semplificare e velocizzare il processo di calcolo del rischio, che richiederebbe ore se fatto manualmente, recentemente sono stati sviluppati diversi software. In Italia il CEI ha sviluppato il software "FLASH" che permette tramite una grafica chiara e molto intuitiva di valutare i diversi fattori di rischio di una determinata struttura.

### 3.2.1 Introduzione al Flash

Alla base del software è ovviamente presente la parte 2 della CEI EN 62305. Il software presenta una serie di schede principali che permettono di impostare il calcolo in funzione delle caratteristiche della struttura: Dati generali, Struttura, Zone, Linee, Impianti e Risultati. Dalla scheda "*Dati generali*" si impostano le informazioni relative al committente e al tecnico che esegue la valutazione. La sezione "*Struttura*" permette di inserire le informazioni generali relative appunto alla struttura, tra cui la sua geometria, la sua ubicazione e la densità di fulmini al suolo. Per la geometria si sfruttano le planimetrie fornite. In questa sezione si impostano anche i parametri di tipica percentuale di perdita (**L**), di cui si parlerà

più approfonditamente dopo. Poi c'è la scheda "Zone" nella quale si impostano i parametri relativi alla suddivisione in zone della struttura, tra cui tipologia di pavimentazione, misure antincendio, numero di persone e altro. Nella scheda "Linee" si inseriscono le informazioni relative alle linee afferenti alla struttura, informazioni relative alla lunghezza, alla tipologia di protezione e alle sue caratteristiche elettromeccaniche. Nella cartella "Impianti" vengono riassunte tutte le informazioni relative agli impianti interni alla struttura, tra cui tensione di tenuta, tipo di cablaggio o presenza di SPD. L'ultima scheda "Risultati" presenta un riepilogo dei calcoli che esegue il software e riassume in maniera chiara e ordinata le diverse componenti di rischio, divise per zone, oltre che quelle totali inerenti all'intera struttura. Il programma offre anche la possibilità di gestione del rischio, andando ad implementare, automaticamente e non, delle possibili soluzioni per abbassare, nel caso in cui ecceda i valori tollerabili, il rischio.

### 3.2.2 Limiti del software "Flash"

Il problema del software Flash è che questo è pensato per edifici e strutture con impianti elettrici in bassa tensione. Sono infatti presenti dei grossi limiti che rendono difficilmente spendibile il software per applicazioni quali le stazioni AT/MT. In base alle ipotesi di calcolo che sono state formulate per il caso della stazione elettrica, e che verranno discusse più avanti nell'elaborato, uno dei limiti più stringenti del software è relativo alla tensione di tenuta dell'isolamento degli impianti  $U_w$  e anche al parametro  $P_{LI}$  rappresentativo della probabilità di guasto di impianti interni dovuto a un fulmine in prossimità della linea connessa. All'interno del software la scelta di questi valori è limitata e ciò rende non corretta la valutazione del rischio. Nel caso delle stazioni elettriche infatti i valori di tensione di tenuta degli impianti, per come sono stati considerati per ipotesi, sono anche di alcune centinaia di kV. Questo comporta un calcolo di rischio estremamente sovrastimato poiché il Flash limita le tensioni di tenuta a valori più bassi non rappresentativi della realtà. Mantenere dei valori di tensione di tenuta più bassi, e consecutivamente valori di  $P_{LI}$  più alti rende l'impianto più vulnerabile di quello che è veramente. Vengono riportati i valori di tensione di tenuta  $U_w$  ed  $P_{LI}$  secondo quanto detto dalla norma nella tabella 3.1.

**Tabella 3.1:** Valori della probabilità  $P_{LI}$  in funzione del tipo di linea e della tensione di tenuta ad impulso degli apparati

Tipo di linea	Tensione $U_w$ in kV				
	1	1,5	2,5	4	6
Linee di energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Linee di telecomunicazione	1	0,5	0,2	0,08	0,04

Altro parametro che risente delle variazioni della tensione di tenuta degli impianti è il  $P_{LD}$ , relativo alla probabilità di guasto degli impianti interni dovuto al fulmine sulla linea connessa. Per questo parametro però, diversamente dal  $P_{LI}$ , è stata fatta un'analisi solo per la stazione di Parma, al fine di rendere i valori più sensati in vista dell'applicazione alla stazione elettrica. Il motivo dell'assenza dell'analisi di questo parametro per le stazioni di Torino è dovuto al fatto che il rischio risultante per le stazioni oggetto dello studio è di molto al di sotto del valore del rischio tollerabile. Quindi, nonostante la sovrastima dovuto al parametro  $P_{LD}$  "limitato" nei suoi valori dal campo di applicazione della norma, la protezione della struttura è assicurata nei casi torinesi. Per Parma invece, per via dei valori di rischio confrontabili con quelli tollerabili, è stata fatta l'analisi in modo da avere un risultato più accurato.

### 3.2.3 Valutazione del rischio mediante foglio di calcolo

Al fine di superare i limiti del software, e quindi cercare di ottenere dei valori che rispecchino meglio la realtà, è stato creato un foglio di calcolo Excel che esegue esattamente i calcoli della CEI EN 62305-2 ottenendo come risultato finale i valori dei rischi di interesse. Il file è stato creato prendendo spunto dalla divisione dei parametri proposti nell'allegato E della CEI EN 62305-2. In quest'allegato sono descritti alcuni esempi di applicazione della norma e vengono rappresentate un insieme di tabelle contenenti tutti i parametri necessari per la valutazione del rischio. Prendendo quindi l'ispirazione da queste tabelle è stato creato il foglio di calcolo. La suddivisione dei parametri nell'Excel è semplice e chiara.

Nella prima tabella si inseriscono i dati generali della struttura e dei suoi dintorni, parametri tra cui la densità di fulmini al suolo, il coefficiente di posizione della struttura, la presenza di eventuali LPS, e le dimensioni della struttura. Riguardo i parametri delle dimensioni della struttura, in questa tabella si possono inserire le dimensioni della struttura intesa come un parallelepipedo, quindi esclusivamente le misure nelle tre coordinate spaziali. Nella grande maggioranza dei casi, e così come anche nel caso in questione, le strutture sono più complesse di un semplice parallelepipedo. Per questo motivo nell'Excel si può anche sfruttare il calcolo delle aree di raccolta fatto dal Flash. Nell'ambiente del software Flash è possibile infatti modellare in 3D la struttura. Basta quindi copiare i valori delle aree di raccolta (Area di raccolta fulmini su una struttura isolata e in prossimità della struttura) calcolati dal software ed incollarli nelle apposite celle (figura 3.1).

Successivamente seguono delle tabelle in cui inserire i dati relativi alle caratteristiche delle linee entranti nella struttura. Al massimo possono essere inserite tre linee di energia e tre linee di telecomunicazioni. In realtà tra le 6 tabelle formalmente non è presente nessuna differenza sostanziale tanto che è possibile utilizzare ognuna delle tabelle con le caratteristiche della singola linea qualsiasi sia la sua tipologia, di energia o di telecomunicazioni. Questo sarà utile nei casi analizzati dal

Parametro	Simbolo	Valore
Densità fulmini al suolo [1/km <sup>2</sup> /anno]	Ng	
Dimensioni (m)	L	
	W	
	H	
Coefficiente di posizione	CD	
LPS	PB	
Equipotenzializzazione	Peb	
Schermatura della struttura	Ks1	

**Figura 3.1:** Tabella per l'inserimento dei dati generali della struttura

seguito elaborato, poiché le linee di telecomunicazione sono esclusivamente in fibra ottica, quindi non vengono considerate nel calcolo. Le tabelle dedicate alle linee di telecomunicazioni saranno quindi destinate, quando necessario, a linee di energia. Tra i parametri presenti all'interno di queste tabelle, oltre alla lunghezza e le informazioni relative al tipo di linea, la sua installazione e l'eventuale schermatura, sono anche inseriti in parte i parametri legati agli impianti interni cui si collegano le linee in questione, e quindi  $U_w$ ,  $P_{LI}$  e  $P_{LD}$  (figura 3.2).

LINEA DI ENERGIA 1		
Parametro	Simbolo	Valore
Lunghezza [m]	LL	
Coefficiente di installazione	CI	
Coefficiente per il tipo di linea	CT	
Coefficiente ambientale della linea [ohm/km]	CE	
Schermatura della linea	RS	
Schermatura, messa a terra, separazione	CLD	
	CLI	
Struttura adiacente [m]	Lj	
	Wj	
	Hj	
Coeff. di posizione struttura adiacente	CDJ	
Tensione tenuta impianti interni [kV]	Uw	
	Ks4	
	PLD	
	PLI	

**Figura 3.2:** Tabella per l'inserimento dei dati delle linee

Dopo aver inserito le informazioni inerenti alle linee, è presente la sezione della suddivisione in zone della struttura. La suddivisione in zone è utile per andare a

perfezionare il calcolo del rischio. L'approccio che è stato seguito è stato quello di considerare inizialmente la struttura come singola zona, caratterizzandola con le proprietà della parte della struttura più "pericolosa" in modo da avere una sovrastima del rischio. Questa è una forma di tutela che rende certo il fatto che il rischio reale non possa mai essere superiore a quello ottenuto dai calcoli. Nello specifico però si è notato come questa tipologia di approccio fosse estremamente conservativa, facendo eccedere i valori di rischio oltre quelli tollerabili. Quindi è stata attuata una suddivisione della struttura in zone. Il foglio elettronico presenta la possibilità di suddividere la struttura in massimo 5 zone, di cui 2 senza la presenza di impianti e 3 con la presenza di impianti al loro interno. Il numero di zone così definito è stato impostato seguendo, al solito, gli esempi dell'allegato E della parte due della norma. Tra i dati che possono essere inseriti vi sono: numero di persone e tempo di presenza nella zona, pavimentazione, rischio di incendio ed eventuali protezioni, informazioni sugli impianti presenti nelle zone oltre che i valori di tipica percentuale di perdita associati ad i diversi rischi (figura 3.3).

ZONA 3		
Parametro	Simbolo	Valore
Tipo di suolo	rt	
Misure contro elettrocuzione (fulm. su struttura)	Pta	
Misure contro elettrocuzione (fulm. su linea)	Ptu	
Rischio di incendio	rf	
Protezione antincendio	rp	
Schermo di zona	Ks2	
Energia 1	Cablaggio interno	Ks3
	Sistema di SPD	Pspd
Telecomunicazione 1	Cablaggio interno	Ks3
	Sistema di SPD	Pspd
Energia 2	Cablaggio interno	Ks3
	Sistema di SPD	Pspd
Telecomunicazione 2	Cablaggio interno	Ks3
	Sistema di SPD	Pspd
Energia 3	Cablaggio interno	Ks3
	Sistema di SPD	Pspd
Telecomunicazione 3	Cablaggio interno	Ks3
	Sistema di SPD	Pspd
L1: Perdita di vite umane	hz	
	LT	
	LF	
	Lo	
Coeff per persone nelle zone	$nz/nt*tz/8760$	
L2: Perdita di servizio pubblico	LF	
	Lo	

**Figura 3.3:** Tabella per l'inserimento dei dati delle zone

Questi dati inseriti sono usati per la valutazione del rischio  $R_1$  ed  $R_2$ . Nella parte bassa del file Excel sono anche state inserite delle tabelle per la valutazione

del rischio R4. I dati da inserire, oltre ai valori di tipica percentuale di perdita, sono relativi ai costi della struttura, suddivisi in costo di animali, dell'edificio, del suo contenuto e della struttura (figura 3.4).

VALORI ECONOMICI IN x10 <sup>6</sup> EURO					
Zona	Animali (Ca)	Edificio (Cb)	Contenuto (Cc)	Impianti interni (Cs)	Totale (Ct)
Z1					0
Z2					0
Z3					0
Z4					0
Z5					0
TOT	0	0	0	0	0

**Figura 3.4:** Tabella per l'inserimento dei costi della struttura

Il foglio elettronico calcola le componenti di rischio R1, R2 ed R4. I dati da inserire come input sono contraddistinti da una colorazione della cella verde. I dati in output sono invece su delle celle color azzurro. Per come è fatto, il foglio di calcolo offre anche la possibilità di apprezzare tutti i risultati intermedi per arrivare al valore di rischio finale. Questo è utile, oltre che per apprezzare tutte le componenti che costituiscono il rischio, per assicurarsi che ci sia una corrispondenza tra i calcoli svolti dal software Flash ed i calcoli svolti dal foglio di calcolo. Per poter utilizzare l'Excel al fine di bypassare i limiti del software, ma ottenere comunque dei dati che siano sensati, è infatti necessario "**validare**" il foglio di calcolo. Il documento creato non è infatti certificato o approvato dal CEI, ma ai fini della seguente tesi, è possibile validarlo assicurandosi che i risultati siano esattamente uguali al Flash. Questo garantisce che il documento Excel fornisca dei risultati corretti e conformi alla CEI EN 62305-2. Solo dopo aver attuato la validazione è possibile cambiare i parametri di interesse, nel caso delle stazioni elettriche la  $U_w$ , il  $P_{LI}$  e, per Parma, il  $P_{LD}$ . Questa è la procedura che è stata eseguita per tutte le stazioni oggetto del seguente lavoro di tesi. In questo modo si garantisce un'attendibilità dei valori ottenuti. Caso per caso la procedura di validazione ha richiesto la correzione di alcuni parametri con dei fattori correttivi in modo da assicurare la giusta corrispondenza tra il foglio Excel e il software Flash. Queste correzioni verranno poi presentate durante la trattazione delle singole stazioni AT/MT.

Per concludere con l'analisi del file Excel, oltre ai valori di rischio, sono dati anche i valori delle componenti di rischio che costituiscono il rischio complessivo. Così si possono osservare facilmente quali sono le componenti di rischio che hanno un peso maggiore e quindi capire quali sono i parametri su cui agire per abbassare, eventualmente, il rischio. Grazie alle funzionalità di Excel, è facile capire quali sono le relazioni di dipendenza delle diverse celle, per risalire a ritroso verso i parametri di input su cui agire (figura 3.5).

RA				
RB				
RC				
RM			Caso sottostazione	
RU			R1	
RV				
RW				
RZ			Protezione necessaria	SI/NO

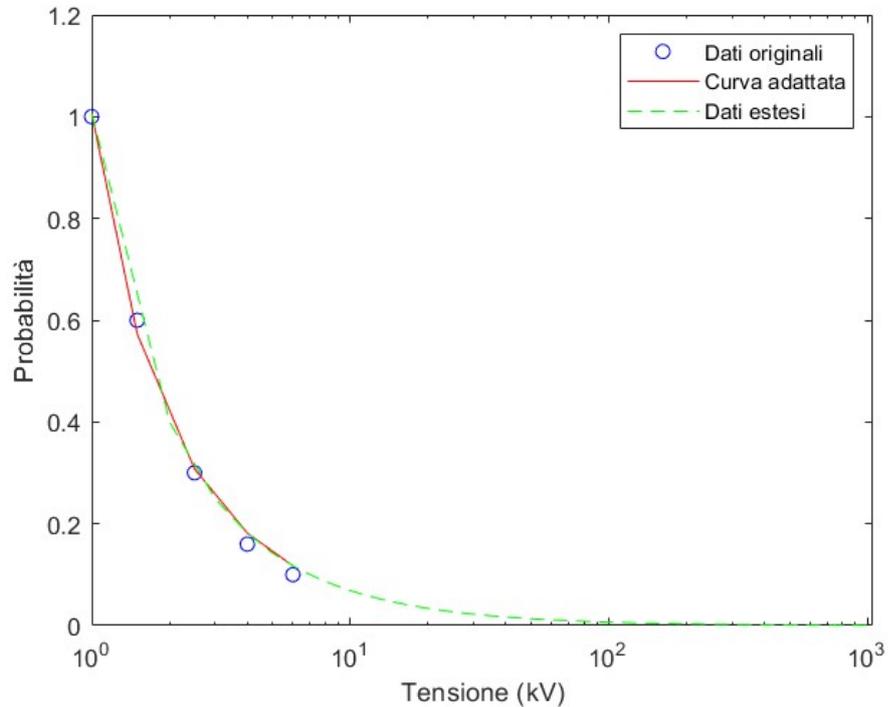
Figura 3.5: Tabella con le componenti di rischio R1

### Analisi dei valori $U_w$ , $P_{LI}$ e $P_{LD}$

È stato già detto che il software Flash ha dei grossi limiti se consideriamo l'applicazione alle stazioni AT/MT, per via dei vincoli sui valori di  $U_w$ ,  $P_{LI}$  e  $P_{LD}$  selezionabili. Per svincolarsi dai limiti è stato creato il foglio di calcolo precedentemente presentato, che offre la possibilità di mettere dei valori arbitrari. In seguito alle ipotesi che verranno ampiamente discusse nei paragrafi successivi, è necessario determinare i valori di tensione di tenuta all'impulso atmosferico e il conseguente valore di  $P_{LI}$ , dei trasformatori e dei quadri MT della stazione. Dalle schede tecniche fornite da IRETI sono facilmente reperibili le informazioni riguardo la tensione di tenuta all'impulso atmosferico di trasformatori lato Alta e Media tensione. Per ottenere dei valori più adeguati di  $P_{LI}$ , corrispondenti alle tensioni di isolamento degli impianti, è stata fatta una duplice analisi. La prima analisi è stata fatta lavorando con uno script MATLAB. A partire dai valori della tabella 3.1, è stato creato un grafico cartesiano con i valori delle tensioni sull'asse delle ascisse e il valore di  $P_{LI}$  delle linee di energia sulle ordinate. L'andamento dei punti è di carattere iperbolico. Il codice MATLAB non fa altro continuare l'andamento iperbolico fino alle tensioni di tenuta di interesse per il caso in questione. Risulta poi facile leggere i valori di  $P_{LI}$  corrispondenti (figura 3.6)

Il secondo metodo di analisi si basa invece nell'andare a comparare i valori delle probabilità  $P_{LI}$  della tabella 3.1 con i valori di probabilità di accadimento dei valori di picco delle correnti di fulmine che superano quelli citati nella tabella A.3 della CEI EN 62305-1, che viene rappresentata con i soli valori di interesse pratico nella tabella 3.2.

Accoppiando i valori di probabilità delle due tabelle, interpolando dove necessario, si trova una coppia di valori (Tensione e Corrente). Il significato fisico di questo accoppiamento può essere visto come la probabilità che si vada a generare una sovratensione pericolosa, dovuta al valore della corrente del fulmine che colpisce in prossimità della linea. Con le coppie di valori "tensione di tenuta" e "corrente di picco" si può calcolare il valore dell'impedenza caratteristica che presenta valori



**Figura 3.6:** Andamento iperbolico probabilità  $P_{LI}$

**Tabella 3.2:** Valori di probabilità  $P$  e dei corrispondenti valori di  $I$

<b>I (kA)</b>	<b>P</b>
0	1
30	0,6
50	0,3
60	0,2
80	0,1
600	0,001

diversi al variare della coppia di punti presa in considerazione. Estrapolando da questi pochi punti l'andamento generale della curva, è possibile associare alle tensioni di tenuta del caso stazione elettrica la corrispondente corrente di fulmine e, da questo, valutare il valore di probabilità sfruttando la tabella A.3 della norma. Confrontando le due analisi, i valori più alti e quindi conservativi del parametro  $P_{LI}$ , sono stati ottenuti dall'analisi con lo script MATLAB. I valori di tensione  $U_W$  e  $P_{LI}$  usati nei casi discussi in questo elaborato sono riportati nella tabella 3.3

Oltre all'analisi sul valore  $P_{LI}$  è stata fatta, per lo stesso motivo, un'analisi sul

**Tabella 3.3:** Valori di  $U_w$  e corrispondente  $P_{LI}$

$U_w$ (kV)	$P_{LI}$
50	$1.12 \times 10^{-2}$
75	$7.5 \times 10^{-3}$
125	$4.5 \times 10^{-3}$
550	$1.0 \times 10^{-3}$
650	$8.569 \times 10^{-4}$
900	$6.187 \times 10^{-4}$
1050	$5.304 \times 10^{-4}$

valore  $P_{LD}$ , valore della probabilità di guasto degli impianti interni in funzione della resistenza dello schermo del cavo e della tensione di tenuta di impulso degli apparati. Anche qui, nel software Flash, il valore della probabilità è limitato ai corrispondenti 6kV. Per estenderlo a tensioni di tenuta più elevate si sfrutta lo stesso script MATLAB usato per il valore del  $P_{LI}$ . A differenza del caso precedente però, non è interessante valutare i valori di  $P_{LD}$  per le stazioni di Torino perché per queste il valore di rischio risultante è molto basso ed abbondantemente al di sotto del rischio tollerabile. Inutile quindi fare altre analisi per migliorare l'accuratezza del calcolo se si sa già che la stazione è autoprotetta. Per il caso della stazione di Parma è stato invece necessario effettuare questa analisi. Si rende, in questo modo, più accurato il calcolo, visto che i valori di rischio sono prossimi a quelli tollerabili. L'unico valore di  $P_{LD}$  di interesse è quello corrispondente ad una tensione di tenuta degli impianti di 550 kV. Per gli altri valori di tensione, gli schermi dei cavi non sono connessi a terra, e quindi il valore di  $P_{LD}$  è pari ad 1. Per il caso BT si sfruttano invece i valori presenti nella norma in quanto la tensione di tenuta è pari a 1kV. Facendo quindi girare lo stesso script di prima, cambiando ovviamente i dati di input che vengono sempre presi dalla norma CEI EN 62305-2, si è calcolato il corrispondente valore di  $P_{LD}$ , facendo attenzione a prendere i giusti valori corrispondenti alla giusta resistenza dello schermo del caso in esame. Il valore ottenuto si riporta nella tabella 3.4.

**Tabella 3.4:** Valori di  $U_w$  e corrispondente  $P_{LD}$

$U_w$ (kV)	$P_{LD}$
550	$7.31 \times 10^{-4}$

### 3.3 Ipotesi di base per l'applicazione della norma alle stazioni AT/MT: Articoli scientifici

Studi recenti hanno avuto come obiettivo quello di dimostrare l'applicabilità della CEI EN 62305-2 alla valutazione del rischio di fulminazione per le stazioni AT/MT. L'articolo che viene preso come riferimento per fissare le ipotesi principali è intitolato "*Lightning Risk Assessment on Outdoor HV Substations Based on IEC 62305-2: A Case Study*" [4]. L'articolo ha l'obiettivo di rappresentare le stazioni elettriche come delle strutture tipo quelle dell'allegato E della CEI EN 62305-2, e di porre una maggiore attenzione a quelli che sono i fattori di rischio che hanno un maggior peso all'interno del calcolo. Il caso studio è quello di una tipica stazione in aria con i classici componenti: interruttori, trasformatori di misura (TA e TV), sezionatori, trasformatori di potenza, quadri etc... Questi componenti sono tipicamente connessi tramite sistemi di sbarre, potenzialmente esposte, insieme a tutti gli altri componenti, al rischio del fulmine.

Le stazioni possono essere protette tramite l'utilizzo di "parafulmini" che intercettano il fulmine e lo scaricano a terra, proteggendo le apparecchiature elettriche. Le protezioni contro il fulmine sono installate seguendo metodologie come la sfera rotolante, il metodo della maglia o il metodo dell'angolo di protezione.

La resistività del terreno e la resistenza dell'impianto di terra sono parametri importanti da considerare per assicurare la sicurezza degli operatori.

Altro sistema di protezione sono gli scaricatori di sovratensioni, normalmente installati in parallelo al sistema da proteggere. Gli scaricatori moderni, che normalmente sono all'ossido di zinco, operano come circuiti aperti durante il normale funzionamento e creano un cortocircuito verso terra nel caso in cui la linea presenti delle sovratensioni dovute al colpo del fulmine. Gli scaricatori sono normalmente installati all'ingresso delle linee di trasmissione e in prossimità delle apparecchiature elettriche importanti e costose.

Il problema di base che si cerca di risolvere in questo articolo è che la CEI EN 62305 non dichiara la possibilità di essere applicata alle stazioni isolate in aria. L'articolo in questione propone una serie di ipotesi con lo scopo di rappresentare la stazione elettrica AT/MT come un edificio, come quelli presentati nella norma. Alcune delle ipotesi più significative sono:

- Tutti gli elementi direttamente connessi a terra come recinzioni, pali della luce, sostegni dei componenti elettrici, rappresentano lo scheletro della struttura da considerare;
- Le persone e i componenti elettrici all'interno dello scheletro della struttura sono gli elementi da proteggere;

- Gli elementi di connessione elettrica come le sbarre sono le "linee" connesse agli elementi da proteggere;
- Tutte le apparecchiature di bassa tensione come i sistemi di controllo, sistemi ausiliari e sistemi elettronici sono considerati "impianti interni";
- La corrente di fulmine che viene trasferita dalle linee di trasmissione che si attestano alla stazione non sono parte dello studio dell'articolo, poiché si da per scontata la presenza di scaricatori di sovratensione all'ingresso della stazione;
- Viene assunto che solo 2 operatori sono presenti nella stazione per 2 ore al giorno;
- solo il rischio R1 e il rischio R2 sono valutati nello studio. Il rischio R3 è escluso dallo studio in quanto non si tratta di edifici di importanza culturale;

Senza queste ipotesi proposte, gli autori dichiarano che la valutazione del rischio secondo la CEI EN 62305-2 sarebbe stata estremamente più complicata. Oltre a fornire queste ipotesi, che hanno il compito di impostare il problema, l'articolo propone una serie di valori numerici per alcuni dei fattori di rischio che appaiono più ambigui nel caso della stazione elettrica, con lo scopo di aiutare ad indirizzare la scelta a dei valori più sensati per il caso in questione.

### **3.4 Ipotesi di base per l'applicazione della norma alle stazioni AT/MT: Ipotesi elaborate per il seguente lavoro di tesi**

Seppure nell'articolo precedentemente descritto vengano presentate delle ipotesi su come trattare la stazione elettrica AT/MT in modo da poter essere applicata su di essa la CEI EN 62305-2, per il seguente lavoro di tesi, quelle ipotesi sono state solo un suggerimento per le supposizioni che invece vengono fatte in questo elaborato. I motivi principali che hanno spinto all'usare delle ipotesi diverse sono:

- Le diverse e numerose tipologie di stazioni elettriche. Non è infatti possibile generalizzare perché ognuna delle stazioni esaminate in questo lavoro di tesi presenta delle caratteristiche differenti: tipologia di struttura, tipologia di isolamento delle apparecchiature elettriche, livelli di tensione;
- Nell'articolo [4] si fa riferimento solo a stazioni isolate in aria in cui non vengono considerate le linee di energia entranti. Il motivo è perché si da per scontata la presenza di scaricatori che proteggono la stazione dalle sovratensioni che

possono essere trasportate dalle linee di trasmissione. Nelle stazioni esaminate però, non sempre è presente lo scaricatore. Per questo motivo si considera anche il potenziale danno associato alle linee di trasmissione. Inoltre, vengono anche tenute in considerazione le linee MT, che non vengono minimamente citate nell'articolo.

Anche per alcuni fattori di rischio sono stati scelti dei valori differenti da quelli proposti dagli articoli esaminati, per il semplice motivo che in alcuni casi si avevano dei fattori molto conservativi o eccessivi, in altri casi valori non coerenti con le casistiche del seguente elaborato.

### 3.4.1 Ipotesi: struttura

Prendendo spunto dall'articolo, la "struttura" che viene presa in considerazione è l'insieme degli edifici che sono presenti all'interno della recinzione della stazione, considerando anche come "edificio" gli elementi dello stallo nel piazzale, nel caso di stazione isolate in aria. È quindi come se si considerasse un "edificio" le cui dimensioni sono dettate dagli ingombri degli elementi del piazzale (interruttori, TA, TV, sezionatori, sbarre, scaricatori). Nel caso particolare di GIS, è tutto contenuto all'interno di un edificio esistente, quindi le dimensioni della struttura coincidono con quelle dell'edificio.

Tramite il software FLASH, è possibile disegnare in maniera accurata l'intera struttura nelle 3 dimensioni dello spazio. È infatti presente un tool grafico in cui, grazie alle informazioni riguardo le dimensioni prese dalle planimetrie delle stazioni, è possibile ricreare in 3D l'intera struttura. Questo tool è stato molto utile poiché, in maniera automatica, calcola le aree di raccolta dei fulmini sulla struttura, e in prossimità della struttura. Queste informazioni che vengono calcolate seguendo quanto detto dalla norma, vengono poi copiate e incollate nel file excel. Sfruttando il tool del FLASH si riesce quindi ad avere una estrema precisione nel valore delle aree di raccolta nonostante la struttura possa essere molto complessa nelle sue forme.

In ognuna delle stazioni:

- non esiste nessuna schermatura esterna [ $K_{S1} = 1$ ];
- la struttura non è protetta da LPS [ $PB = 1$ ].

### 3.4.2 Ipotesi: linee

Rispetto alle ipotesi dell'articolo [4], le linee vengono considerate in modo totalmente diverso. Nell'articolo infatti vengono considerate linee solo le sbarre e le connessioni all'interno dello stallo, trascurando tutta la lunghezza delle linee entranti nella

stazione e trascurando i contributi di eventuali linee MT o BT. Il motivo, come già spiegato prima, è dovuto alla presenza degli scaricatori di sovratensione in ingresso alla stazione. Dai sopralluoghi organizzati però si è evinto che non in tutte le stazioni sono presenti gli scaricatori all'ingresso delle linee. Oltretutto, così facendo, si perderebbe un contributo di rischio significativo legato proprio alle sovratensioni che possono entrare in stazione dalle linee di alta e media tensione, andando a sottostimare, anche in maniera significativa, il rischio. Per questi motivi, sono state avanzate delle ipotesi differenti riguardo le linee, differenziandole per livello di tensione. Si anticipa che per una questione di praticità si è considerata, per livello di tensione, una singola linea con una lunghezza totale equivalente alla somma delle lunghezze di tutte le linee di quella stessa tipologia. È stato comunque dimostrato che non ha nessuna influenza nel risultato finale il considerare n linee diverse o una linea con la lunghezza equivalente. Di questo se ne parlerà nel paragrafo 3.4.6.

### **Ipotesi: linee AT**

Le ipotesi avanzate sulle linee AT sono principalmente legate alla lunghezza e alle caratteristiche elettromeccaniche. Per quanto riguarda la lunghezza delle linee di alta tensione, il valore usato è stato di 1000 metri. L'indicazione dei 1000 metri è data all'interno della CEI EN 62305. Quell'indicazione, in realtà, si riferisce alle linee di bassa tensione in ingresso alla struttura, da usare come valore massimo nel caso in cui non si hanno informazioni sulla suddivisione della linea in sezioni. Prendendo quindi spunto dalla norma, è stata considerata la stessa lunghezza anche per le linee di alta tensione, lunghezza oltre la quale la propagazione degli impulsi si assume trascurabile. Solo in un caso si hanno le informazioni per dire che effettivamente la linea è più corta. Nelle stazioni da analizzare, le linee AT sono in alcuni casi in cavo, in altri casi aeree. Il numero preciso delle linee viene specificato caso per caso. Da IRETI ci sono state fornite tutte le caratteristiche, elettromeccaniche e non, delle linee: se interrate, collocazione ambientale, tensione nominale, informazioni sullo schermo e sul suo collegamento. Gli schermi dei cavi AT sono sempre collegati all'impianto di terra ad entrambe le estremità. Le caratteristiche dello schermo, valide per tutti i cavi AT, sono riassunte nella tabella 3.5.

**Tabella 3.5:** Caratteristiche schermi cavi AT

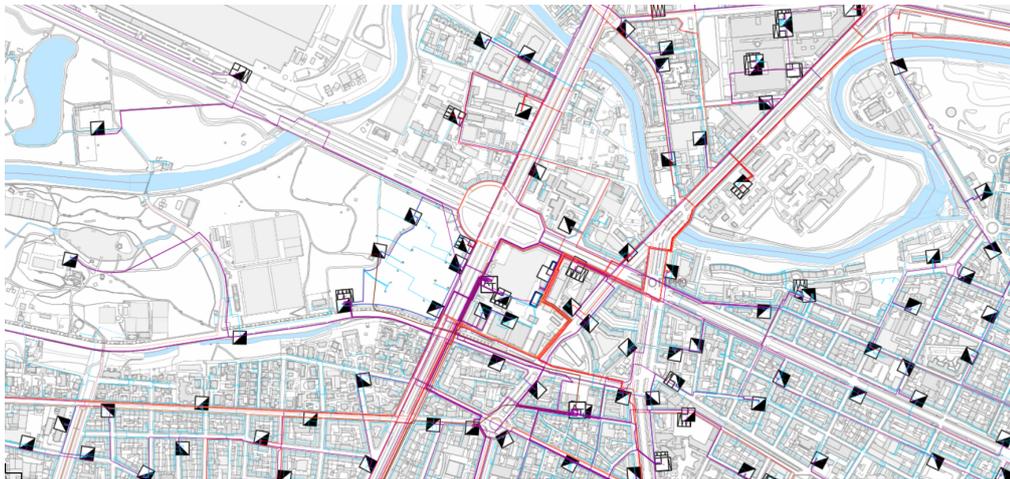
Materiale	Rame
Sezione	132 mm <sup>2</sup>
Resistenza	0,13 Ω/km

Ipotesi molto importante è stata fatta per la scelta del fattore  $C_T$ , cioè per il coefficiente di correzione dovuto alla presenza di un trasformatore sulla linea.

Nel caso della linea AT non esiste un effetto di smorzamento della sovratensione dovuto alla presenza del trasformatore, perché gli impianti da proteggere, tra cui il trasformatore stesso, sono all'interno di quella che è stata considerata, dalle ipotesi formulate in precedenza, "struttura".

### **Ipotesi: linee MT**

Le linee MT non vengono citate nell'articolo [4]. Queste hanno invece un peso importante all'interno della valutazione del rischio in quanto anche tramite queste linee si possono trasmettere all'interno della stazione le sovratensioni originate dal fulmine sulla linea o in prossimità della linea. Seguendo le indicazioni del software, la lunghezza di ogni linea MT afferente alla struttura è stata ipotizzata di 400 metri. Nel caso di una struttura con più linee connesse con lo stesso percorso, il calcolo deve essere effettuato solo per la linea con le peggiori caratteristiche. Nei casi analizzati, le linee vengono considerate tutte uguali tra loro. Viene però preso in considerazione il caso di sovrapposizione tra le aree di raccolta delle linee. L'area di raccolta sovrapposta infatti dovrebbe essere considerata una sola volta. Essendo infatti molto capillare la distribuzione delle linee MT, soprattutto nel raggio di 400 metri dalla stazione, è stato applicato un fattore riduttivo alle linee in modo da non considerarle tutte ed avere un valore di rischio sovrastimato, proprio perché nella posa dei cavi, alcuni percorsi sono condivisi. Il fattore correttivo è stato calcolato a partire dalle foto rappresentanti i percorsi dei cavi MT di due stazioni di Torino, Martinetto e Arbarello (figure 3.7 e 3.8).



**Figura 3.7:** Percorso cavi MT Martinetto



**Figura 3.8:** Percorso cavi MT Arbarello

Tenendo in considerazione la lunghezza delle linee MT da considerare (400 metri) e i percorsi di queste, sono stati valutati due fattori correttivi che vengono riassunti nella tabella 3.6.

**Tabella 3.6:** Fattori correttivi per le linee MT

Stazione	Fattore correttivo
ARBARELLO	0,7
MARTINETTO	0,5

Per le altre stazioni esaminate, il fattore correttivo principalmente considerato è stato quello più svantaggioso, e cioè il fattore pari a 0,7, arrotondando in eccesso, dove necessario, il numero delle linee da considerare.

Anche per le linee MT sono date le informazioni riguardo la posa e le caratteristiche elettromeccaniche dei cavi. A differenza dei cavi AT in cui per le stazioni esaminate gli schermi sono sempre collegati all'impianto di terra ad entrambe le estremità, nei cavi MT gli schermi non sono collegati allo stesso modo tra Torino e Parma. A Torino i cavi sono schermati con schermi messi a terra alle estremità, mentre a Parma gli schermi non sono messi a terra in cabina primaria. Da un punto di vista prettamente legato alla fulminazione e alla valutazione del rischio di fulminazione, sarebbe meglio collegare ovunque gli schermi all'impianto di terra (lo impone anche la norma sui cavi 11-17), in quanto si avrebbe una diminuzione del rischio. Le caratteristiche dello schermo dei cavi MT, valide per tutte le stazioni sono riportate

nella tabella 3.7.

**Tabella 3.7:** Caratteristiche schermi cavi MT

Materiale	Alluminio
Sezione	25 mm <sup>2</sup>
Resistenza	1,13 Ω/km

Riguardo il fattore  $C_T$  vale lo stesso discorso fatto in precedenza per le linee MT. Quindi anche in questo caso non viene considerato l'effetto smorzante del trasformatore.

### **Ipotesi: linee BT**

In tutte le stazioni in esame non sono presenti linee BT entranti nella struttura. Tuttavia, ai fini del calcolo è stata presa in considerazione una linea BT di lunghezza pari a 75 metri. Questa serve a rappresentare la distribuzione BT all'interno della stazione che va ad alimentare gli impianti interni ausiliari di bassa tensione relativi all'alimentazione e al comando delle apparecchiature elettriche. La lunghezza è stata scelta considerando la massima distanza tra il trasformatore degli ausiliari e l'impianto più lontano, prendendo comunque un buon margine di sicurezza, considerando anche che l'area di raccolta di questa linea coincide con l'area di raccolta della struttura stessa. Anche in questo caso si tratta di cavi schermati (tranne per Parma). L'ipotesi che viene fatta è che gli schermi non sono collegati all'impianto di terra. Nella realtà, a Torino, gli schermi dei cavi sono collegati alla maglia di terra della stazione. Si è scelto, in via precauzionale, di ipotizzare comunque il fatto che gli schermi non fossero collegati all'impianto di terra, sovrastimando il rischio. Per le stazioni di Torino questa scelta è stata poi la definitiva poiché i valori di rischio risultanti sono di molto al di sotto dei valori tollerabili. Per le stazioni di Parma non si pone il problema in quanto i cavi non sono schermati, e quindi non collegati alla maglia di terra. Si riportano comunque le informazioni sullo schermo dei cavi BT che sono state utilizzate per le stazioni di Torino in tabella 3.8.

**Tabella 3.8:** Caratteristiche schermi cavi BT

Materiale	Alluminio
Sezione	10 mm <sup>2</sup>
Resistenza	2,83 Ω/km

Rispetto ai casi precedenti, nella linea di bassa tensione si risente dell'effetto benefico dello smorzamento offerto dal trasformatore MT/BT che alimenta gli ausiliari. In questo caso il fattore  $C_T$  viene infatti impostato pari a 0,2.

### **Ipotesi: linee di telecomunicazione**

Le linee di telecomunicazione sono tutte in fibra ottica. Questo fa sì che non ci sia nessun rischio di trasportare sovratensioni all'interno della stazione tramite le linee di telecomunicazioni.

### **3.4.3 Ipotesi: rischi e perdite**

Sotto richiesta di Ireti, i valori di rischio da calcolare sono R1, R2 ed R4. Il valore di rischio R3 non ha nulla a che vedere con le stazioni elettriche, in quanto queste non sono patrimonio culturale insostituibile. Oltre quindi ai valori obbligatori R1 ed R2 è stata richiesta anche la valutazione del rischio R4 di perdita economica riguardo la struttura, il contenuto e la perdita di attività. Sarà poi compito di Ireti valutare l'entità del rischio R4 ed, eventualmente, pensare a delle soluzioni per abbassarlo.

Alcune ipotesi sono state fatte per la scelta dei valori di perdita  $L_T$ ,  $L_F$  ed  $L_O$ , che influenzano i valori di perdita  $L_X$ , cioè l'ammontare medio della perdita (uomini e beni) conseguente ad un determinato tipo di danno dovuto ad un evento pericoloso, riferito al valore complessivo (uomini e beni) della struttura da proteggere. I valori di perdita  $L_T$ ,  $L_F$  ed  $L_O$  hanno un significato diverso in base al rischio che si sta valutando.

Per il rischio R1:

- $L_T$  : è la percentuale media di vittime per elettrocuzione (D1) causato da un evento pericoloso;
- $L_F$  : è la percentuale media di vittime per danno materiale (D2) causato da un evento pericoloso;
- $L_O$  : è la percentuale media di vittime per guasto degli impianti interni (D3) causato da un evento pericoloso.

Per il rischio R2:

- $L_F$  : è la percentuale media tipica di utenti non serviti dovuto al danno materiale conseguente ad un evento pericoloso;
- $L_O$  : è la percentuale media tipica di utenti non serviti dovuto al guasto degli impianti interni conseguente ad un evento pericoloso.

Per il rischio R4:

- $L_T$  : è la percentuale media tipica di tutti i beni danneggiati per elettrocuzione (D1) causato da un evento pericoloso;

- $L_F$  : è la percentuale media tipica di tutti i beni danneggiati per danno materiale (D2) causato da un evento pericoloso;
- $L_O$  : è la percentuale media tipica di tutti i beni danneggiati per guasto degli impianti interni (D3) causato da un evento pericolo.

La maggior parte di questi valori sono stati selezionati a partire dalle indicazioni della norma. Per il rischio R1 sono stati selezionati solo valori contenuti nelle tabelle della norma, facendo riferimento al caso di strutture con rischio di esplosione per due motivi. Il primo perché si è ipotizzata la zona dei trasformatori come una possibile zona a rischio di esplosione, dovuta alla presenza di un alto quantitativo di olio (nonostante le stazioni non siano classificate come luoghi ATEX, ma come luoghi MARCI). La scelta di considerare le zone dei trasformatori come delle zone con rischio di esplosione è nata dalla supposizione che un fulmine che "colpisce" il trasformatore potrebbe causarne un guasto che a sua volta potrebbe provocare un incendio e una possibile esplosione dovuto all'olio contenuto in esso. L'eventuale esplosione potrebbe portare a perdite di vite. Il secondo motivo è perché è il valore più conservativo che la norma propone. In alcuni articoli veniva anche usato un valore  $L_F = 0,33$ , quindi ancora più conservativo. Questo valore faceva riferimento ad un allegato della norma inglese (Allegato NC della BS EN 62305-2) che, a nostro avviso, è un valore estremamente conservativo per poter essere applicato. Anche per il rischio R2 sono stati usati i valori della norma italiana relative alla casistica "Gas, acqua, energia elettrica". Per il rischio R4 invece i valori scelti si discostano leggermente dai valori della norma. Questo per avere dei valori che fossero più adatti al caso in questione, che ricordiamo, non essere direttamente trattato dalla norma. Si riassumono i valori delle tipiche percentuali medie nella tabella 3.9.

**Tabella 3.9:** Valori delle tipiche percentuali medie  $L_T$ ,  $L_F$  e  $L_O$

<b>R1</b>	$L_T$	0,01
	$L_F$	0,01
	$L_O$	0,01
<b>R2</b>	$L_F$	0,1
	$L_O$	0,01
<b>R4</b>	$L_T$	0,00
	$L_F$	0,5
	$L_O$	0,01

Seppure questi siano i valori utilizzati di default in tutta la struttura, in alcune zone si sono utilizzati dei valori diversi, proprio per renderli più coerenti con il caso delle stazioni elettriche. Dove presenti, questi cambiamenti sono messi in evidenza nel paragrafo successivo.

### 3.4.4 Ipotesi: zone

Come anticipato in 3.2.3, la suddivisione in zone è utile per andare a perfezionare il calcolo del rischio. Infatti, considerando la struttura come singola zona, il rischio verrebbe molto oltre il valore tollerabile. Questo è però un valore non corretto poiché si attribuiscono all'intera struttura le condizioni peggiori dal punto di vista della valutazione del rischio, che sono invece limitate a piccoli spazi all'interno della stazione elettrica. Operativamente, per tutte le stazioni elettriche che sono state esaminate, sono state pensate tre differenti zone: Struttura, Trasformatori e Quadri. In questo modo si mettono in evidenza quelli che sono i luoghi principali all'interno della stazione e che presentano delle caratteristiche differenti. Dividere la strutture in più di tre zone era una opzione possibile. Si è deciso di mantenere il numero delle zone pari a tre sia perché il file excel, per come è costruito, è limitato a sole tre zone con impianti interni, e poi anche perché non sarebbe stato troppo utile suddividere ulteriormente la struttura ai fini del calcolo del rischio, in quanto si sarebbero create delle zone con caratteristiche simili se non uguali a quelle già menzionate precedentemente. Oltretutto, così facendo, si ha una corrispondenza diretta con gli "impianti interni" che sono stati scelti per il caso della stazione elettrica come spiegato in 3.4.5. Si riportano adesso le caratteristiche principali delle singole zone e che sono comuni tra tutte le stazioni esaminate.

#### Ipotesi: zona Trasformatori

La zona denominata "Trasformatori" comprende tutte quelle aree/edifici all'interno della quale sono presenti i trasformatori AT/MT oltre che i trasformatori degli ausiliari e i TFN. Tra le caratteristiche generali e valide per tutte le stazioni vi sono:

- Pericoli particolari  $h_Z = 1$ ;
- Rischio incendio elevato  $r_f = 0,1$ ;
- Schermatura interna assente  $K_{S2} = 1$ .

Gli altri parametri cambiano caso per caso.

Degno di nota è invece il calcolo del carico di incendio specifico, utile per stabilire il rischio di incendio della zona. Grazie a [16] è stato possibile conoscere, oltre al potere calorifico dell'olio del trasformatore, anche la formula da usare per il calcolo del carico di incendio specifico. Conoscendo quindi l'estensione della struttura e il quantitativo totale di olio nei trasformatori, cioè il materiale infiammabile, è possibile attuare il calcolo. Il valore ottenuto si confronta poi con i valori indicati nel software FLASH e si sceglie il rischio di incendio corrispondente. Nel caso dei trasformatori, per via degli alti quantitativi di olio, il rischio di incendio in questa

zona è, in tutti i casi analizzati, elevato ( $r_f = 0,1$ ).

Per le stazioni di Torino, il numero di persone presenti nella struttura viene impostato pari a 12, suddividendole equamente nelle tre zone. Per Parma sono invece state considerate 2 persone per zona, per un totale di 6 persone nella stazione. Il tempo in ore all'anno per cui le persone sono presenti nella zona è 150 ore. I dati usati ci sono stati forniti da Ireti.

Per il calcolo del valore L2, è necessario ipotizzare i parametri  $n_Z$  ed  $n_t$ , rispettivamente il numero utenti serviti dalla zona e il numero utenti serviti dalla struttura totale. Questi sono alcuni di quei parametri che risultano "forzati" se interpretati nel caso della stazione elettrica. L'interpretazione più giusta che potrebbe essere fatta è quello di considerare il numero  $n_t$  come il numero di clienti serviti dalla stazione elettrica. Risulta comunque difficile se non impossibile valutare questo numero. Di difficile interpretazione è invece il parametro  $n_Z$ , cioè il numero di utenti serviti dalla zona, in questo caso i trasformatori. I clienti che vengono serviti dalla zona sono infatti serviti grazie al funzionamento simultaneo delle zone della stazione elettrica. Ai fini del calcolo, per cercare di dare meno peso possibile alla scelta di questo parametro è stato selezionato un numero  $n_Z = 1$  per ognuna delle zone, con un totale  $n_t = 3$ .

Per il calcolo del valore L4, è obbligatorio avere un'indicazione del valore della struttura diviso in: valore di eventuali animali (ad esempio per il caso di una fattoria), valore dell'edificio, valore del contenuto e valore degli impianti interni. Ireti ha fornito i dati dei costi menzionando le due sole voci "edificio" e "contenuto". Sono state quindi fatte delle ipotesi riguardo la suddivisione di questi costi tra le diverse zone. La cifra denominata "contenuto" nei documenti di Ireti è stata divisa esattamente a metà ed assegnata a "contenuto" e "impianti interni". La divisione tra le diverse zone è invece illustrata nella tabella 3.10.

**Tabella 3.10:** Suddivisione dei costi nelle zone

<b>Z1: Struttura</b>	Edificio	70%
	Contenuto	80%
	Impianti	50%
<b>Z2: Trasformatori</b>	Edificio	15%
	Contenuto	10%
	Impianti	30%
<b>Z3: Quadri</b>	Edificio	15%
	Contenuto	10%
	Impianti	20%

La seguente suddivisione nasce da un'analisi delle apparecchiature, strumentazioni, edifici all'interno delle singole zone.

Sempre per il valore L4, rispetto ai parametri discussi nel paragrafo 3.4.3, vengono modificati i valori di  $L_F$  ed  $L_O$ . Essendo infatti una zona in cui è presente un quantitativo di olio elevato, vengono scelti i valori corrispondenti ad una zona con rischio di esplosione, riassunti nella tabella 3.11.

**Tabella 3.11:** Valori delle tipiche percentuali medie  $L_F$  e  $L_O$  per la zona "Trasformatori"

<b>R4</b>	$L_F$	1
	$L_O$	0,1

**Ipotesi: zona Quadri**

La zona denominata "Quadri" comprende tutte quelle aree/edifici all'interno della quale sono presenti i quadri di media tensione. Tra le caratteristiche generali e valide per tutte le stazioni vi sono:

- Pericoli particolari  $h_Z = 1$ ;
- Rischio di esplosione assente;
- Rischio incendio ridotto  $r_f = 0,001$ ;
- Schermatura interna assente  $K_{S2} = 1$ .

Gli altri parametri generali cambiano caso per caso.

In riferimento al rischio di incendio della zona, è stato impostato un rischio di incendio ridotto seppur nella zona in questione non ci sia un quantitativo di materiali infiammabili degno di nota. Questo è stato fatto per una questione di sicurezza, ed avere quindi dei valori più conservativi. Valgono le stesse ipotesi fatte per la zona dei trasformatori per il numero delle persone e la permanenza nella zona in questione. Rispetto ai valori specificati nel paragrafo 3.4.3, per il calcolo del valore L1, è stato scelto un valore pari di  $L_O$  pari a 0,001. Il motivo del discostamento dal parametro di default è proprio legato al fatto che in questa zona il rischio di esplosione è più basso. Viene riassunto nella tabella 3.12.

**Tabella 3.12:** Valori della tipica percentuale media  $L_O$  per la zona "Quadri"

<b>R1</b>	$L_O$	0,001
-----------	-------	-------

Per il calcolo del valore L2, anche qui vale lo stesso discorso riguardo i parametri  $n_Z$  ed  $n_t$ .

Per il calcolo del valore L4 si fa riferimento alla suddivisione dei costi presentata nella tabella 3.10.

### **Ipotesi: zona Struttura**

La zona denominata "Struttura" comprende tutte le aree della stazione elettrica che non appartengono alle altre due zone. Tra le caratteristiche generali e valide per tutte le stazioni vi sono:

- Pericoli particolari  $h_Z = 1$ ;
- Rischio di esplosione assente;
- Rischio incendio ridotto  $r_f = 0,001$ ;
- Schermatura interna assente  $K_{S2} = 1$ .

Gli altri parametri generali cambiano caso per caso.

Anche qui, come nel caso della zona "Quadri", il rischio incendio viene considerato ridotto, ma semplicemente in via precauzionale. Valgono le stesse ipotesi fatte per le zone precedenti riguardo il numero delle persone e la permanenza nella zona in questione. Rispetto ai valori specificati nel paragrafo 3.4.3, per il calcolo del valore L1, è stato scelto un valore pari di  $L_O$  pari a 0,00. Il motivo del discostamento dal parametro di default è proprio legato al fatto che in questa zona il rischio di avere delle vittime per via di un guasto degli impianti interni è praticamente assente. Viene riassunto nella tabella 3.13.

**Tabella 3.13:** Valori della tipica percentuale media  $L_O$  per la zona "Struttura"

<b>R1</b>	$L_O$	0,00
-----------	-------	------

Per il calcolo del valore L2, anche qui vale lo stesso discorso riguardo i parametri  $n_Z$  ed  $n_t$ .

Per il calcolo del valore L4 si fa riferimento alla suddivisione dei costi presentata nella tabella 3.10. I valori dell'edificio, del contenuto e degli impianti interni sono più elevati in questa zona per il semplice motivo che questa è la più estesa della stazione elettrica.

### **3.4.5 Ipotesi: impianti**

Uno dei problemi cardine dell'applicazione della CEI EN 62305 alle stazioni elettriche è il fatto che questa considera solo la presenza di impianti di bassa tensione. Al fine di tenere in considerazione anche i possibili contributi di rischio relativi ai possibili guasti dei trasformatori o dei quadri, questi due ultimi elementi sono stati considerati come impianti interni della struttura. Questa ipotesi è molto forte e si allontana da quanto detto nella norma. Tuttavia, è stata una riflessione maturata dalla necessità di tenere in considerazione i pericoli derivanti da

elementi che possono fare aumentare il valore del rischio. La scelta di considerare i trasformatori e i quadri è stata anche una conseguenza diretta delle ipotesi maturate precedentemente sulle linee. Infatti, ogni impianto creato deve essere collegato ad una linea. Se questo non viene fatto è come non aver considerato la linea in ingresso alla struttura. Quindi è stato, oltre che logico, anche necessario considerare la presenza di altre tipologie di impianto proprio per collegare le linee di alta e media tensione alla stazione elettrica. Non è realistico attestare le linee AT ed MT direttamente agli impianti ausiliari BT, ecco quindi spiegata la creazione degli altri due "impianti interni". L'impianto Trasformatori si collega alla linea AT mentre l'impianto Quadri si collega alla linea MT. Oltre questi due impianti è presente anche quello degli ausiliari BT (potenza e segnale) che si collegano alla linea BT creata appositamente per lo scopo. Il motivo di considerare un unico impianto per tipologia (Trasformatori, Quadri ed ausiliari BT) è frutto di un'analisi parametrica di cui se ne parlerà brevemente nel paragrafo 3.4.6. Solo nel caso della stazione di Torino "SUD-OVEST" è presente un numero di impianti superiori (2 impianti quadri MT e 2 impianti Trasformatori e 1 impianto ausiliari). Questo per via dei due livelli di media tensione presenti nella stazione e per via dei due diversi arrivi delle linee AT (cavo e aereo). Di seguito una breve trattazione dei differenti impianti con le caratteristiche comuni a tutte le stazioni elettriche.

### **Ipotesi: impianto Ausiliari**

L'impianto ausiliari comprende tutti quelli che sono gli impianti BT di potenza e segnale necessari per il corretto funzionamento della stazione elettrica. Questo impianto si collega direttamente alla linea BT e serve tutte e tre le zone della stazione (Struttura, Trasformatori e Quadri). Tra le informazioni di Ireti risulta che i cavi sono schermati (tranne per Parma) e con una precauzione nella posa del cavo al fine di evitare spire larghe. Non è presente in nessuna stazione un sistema di SPD a protezione dell'impianto. I parametri principali e comuni a tutte le stazioni vengono riportate in tabella 3.14.

**Tabella 3.14:** Valori generali dell'impianto ausiliari

$U_w$	1000V
$P_{LI}$	1
$P_{LD}$	1
$K_{S3}$	0,0001
$K_{S4}$	1
$P_{SPD}$	1

### **Ipotesi: impianto Trasformatori**

Per l'impianto "Trasformatori", le caratteristiche comuni a tutte le stazioni sono poche. Si presenteranno le caratteristiche degli impianti quando si discuteranno le corrispettive stazioni elettriche. Si può comunque già dire che l'impianto è collegato alla linea AT e che serve esclusivamente la zona "Trasformatori". Nel software Flash il valore di tenuta di tensione degli impianti è impostato a 6000V in tutte le stazioni. Questo ovviamente non rappresenta l'effettivo valore di tenuta dei trasformatori, ma è dovuto al limite operativo del software che è appunto pensato per soli impianti BT. Il problema viene risolto sfruttando il foglio di calcolo excel che permette di bypassare questi limiti numerici. Un'ambiguità si palesa quando nel software Flash si chiede se i cavi dell'impianto sono schermati oppure no, in merito alle caratteristiche dell'impianto. L'ambiguità è dovuta al fatto che l'impianto "Trasformatori" non è inteso come un classico impianto BT, che è quello che considera il software FLASH. Non esistono infatti dei veri e propri cavi. Per risolvere l'ambiguità è possibile comunque fare un'analogia. Se il trasformatore non presenta parti esposte direttamente in aria, allora l'impianto può essere considerato come fosse un cavo schermato, in quanto gli avvolgimenti in tensione sono all'interno di un involucro che li protegge. Nel caso in cui ci fossero i terminali del trasformatore isolati in aria, questa ipotesi non può essere applicata. A protezione dei trasformatori potrebbero esserci degli scaricatori di sovratensione che porterebbero ad una modifica della parametro  $P_{SPD}$ . Successivamente nella trattazione, stazione per stazione, si mettono in evidenza queste informazioni.

### **Ipotesi: impianto Quadri**

L'impianto "Quadri" fa riferimento ai quadri di media tensione all'interno della stazione elettrica. Questo si collega alla linea MT e serve esclusivamente la zona Quadri. Anche qui, come per il caso dei trasformatori, la tensione di tenuta è limitata a 6000V, ma anche in questo caso il problema è aggirabile tramite il foglio di calcolo. Anche per i quadri MT si presenta l'ambiguità dei cavi schermati. I quadri MT possono essere intesi come delle strutture schermate per via dell'involucro metallico che contiene le barrature in tensione. L'impianto Quadri MT viene quindi considerato come un cavo schermato e ciò significa impostare un fattore  $K_{S3} = 0,0001$ . Solo nel caso della stazione SUD-OVEST di Torino nell'impianto Quadri MT (7kV) l'impianto non viene considerato schermato. Questo perché in quella stazione il sistema di barrature MT è all'aperto e senza nessun involucro a proteggerle. Questo comporta un fattore  $K_{S3} = 1$ . Queste informazioni verranno comunque riprese durante la trattazione delle singole stazioni. Per questi impianti, non è mai presente un sistema di SPD. Ciò significa che  $P_{SPD} = 1$ .

### 3.4.6 Analisi parametriche

A questo punto della trattazione sono state già state presentate le principali ipotesi sul come è stato eseguito il calcolo del rischio. Alcune delle ipotesi discusse sono però frutto di analisi approfondite. Tra queste, le più importanti sono state:

1. Analisi sulla connessione linea-impianto;
2. Analisi sull'importanza del numero di linee;
3. Analisi sulla tensione di isolamento;
4. Analisi sull'importanza della tensione di isolamento degli impianti MT ed AT (Quadri e Trasformatori);
5. Analisi sulla schermatura degli impianti "Quadri" e "Trasformatori";
6. Analisi sulla divisione in zone;

Tutte queste analisi sopracitate hanno contribuito ad impostare il calcolo del rischio per la stazione elettrica, permettendo anche, in alcuni casi, di semplificare la procedura della valutazione.

**NB:** tutti i valori di rischi presentati in questa sezione sono da osservare in termini relativi, solo per capire l'andamento di una determinata analisi. Non hanno nulla a che fare con i reali valori di rischio che caratterizzano le stazioni, che verranno presentati successivamente.

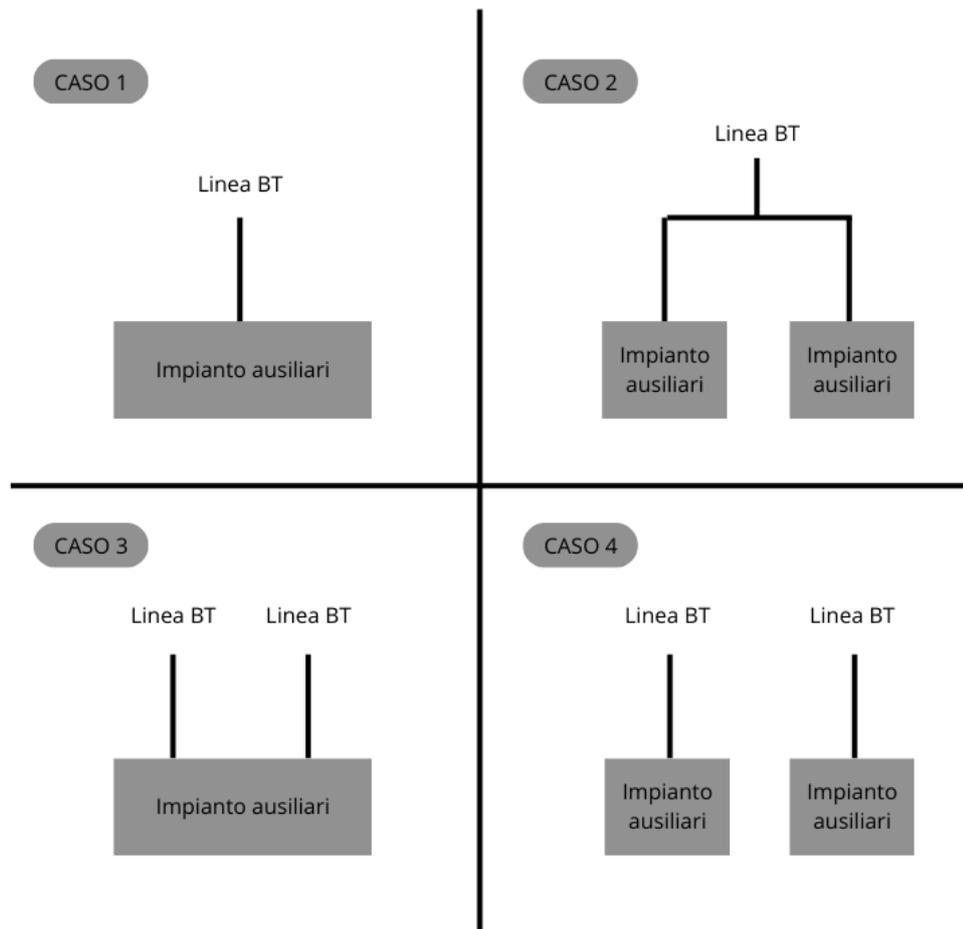
#### Analisi sulla connessione linea-impianto

Questa analisi è stata fatta lavorando sul software FLASH. Lo scopo è quello di capire l'importanza della connessione linea-impianto e se ha senso utilizzare più impianti uguali, connessi ad una o più linee. La stazione di riferimento che si è considerata per fare i calcoli è stata la stazione SUD di Torino. Per l'analisi sono state considerate in totale 4 linee (AT, MT, BT1 e BT2) Le linee BT1 e BT2 sono uguali tra di loro e si riferiscono alle linee che alimentano gli impianti ausiliari di segnale e di potenza. Le linee AT ed MT cambiano solo per la lunghezza e la sezione. L'analisi è stata fatta modificando la connessione tra le linee BT1 e BT2 con gli impianti ausiliari di potenza e di segnale. Gli impianti ausiliari di potenza e di segnale sono uguali tra loro. Le linee AT ed MT sono rispettivamente collegate agli impianti "Quadri" e "Trasformatori", ma non vengono modificate nell'analisi. Gli impianti "Quadri" e "trasformatori" sono uguali. Sono stati esaminati 4 casi:

- **CASO 1:** Un impianto ausiliari (potenza + segnale) connesso ad una sola linea (BT1);  
Per fare questo basta non collegare l'impianto ausiliari segnale alla linea BT2.

- **CASO 2:** Due impianti uguali (potenza e segnali) connessi alla stessa linea (BT1)
- **CASO 3:** Un impianto ausiliari (potenza + segnale) connesso a due linee differenti, ma uguali tra di loro in quanto a caratteristiche (BT1 e BT2); Per fare questo sul FLASH, siccome non si può collegare lo stesso impianto a due linee diverse, ma le linee sono uguali tra di loro, si considera solo una linea con una lunghezza raddoppiata.
- **CASO 4:** Due impianti uguali (potenza e segnali) connessi a due linee differenti, ma uguali tra loro in quanto a caratteristiche (BT1 e BT2).

I risultati sono anche spiegati graficamente nella figura 3.9.



**Figura 3.9:** Spiegazione grafica dei casi dell'analisi sulla connessione linea-impianto

Vengono riassunti i risultati dei 4 casi nella tabella 3.15. Si nota che il **CASO**

**Tabella 3.15:** Risultati analisi connessione linea-impianto

	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R4</b>
<b>CASO 1</b>	$4.996 \times 10^{-5}$	$2.771 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
<b>CASO 2</b>	$4.996 \times 10^{-5}$	$2.771 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
<b>CASO 3</b>	$5.026 \times 10^{-5}$	$2.788 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
<b>CASO 4</b>	$5.026 \times 10^{-5}$	$2.788 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$

**1** è uguale al **CASO 2** poiché gli impianti interni considerati sono uguali tra di loro e la linea in ingresso è una sola e con le stesse caratteristiche i entrambi i casi. Si nota anche che il **CASO 3** è uguale al **CASO 4** poiché gli impianti interni considerati sono uguali tra di loro. Da questi primi due risultati si capisce che *se gli impianti sono uguali tra di loro (impianti BT) e sono connessi alla stessa linea è possibile considerare un solo impianto*. I **CASI 1** e **2** sono diversi dai **CASI 3** e **4** perché cambia il numero di linee afferenti alla struttura, che nei primi due casi è solo una, mentre negli altri sono due. Si capisce anche che per tenere in considerazione più linee è possibile raddoppiare la lunghezza della linea (**CASO 1** con una linea lunga il doppio è uguale al **CASO 3**).

**NB:** Il fatto che si può considerare solo un impianto complessivo vale solo per il caso di linee BT ed impianti BT. Nelle successive analisi infatti si nota come per i livelli di tensione MT ed AT non valga quanto detto in precedenza. Questo per via delle differenti impostazioni delle linee e degli impianti che si selezionano nel software Flash, dovute alle diverse caratteristiche che questi possiedono.

### Analisi sull'importanza del numero di linee

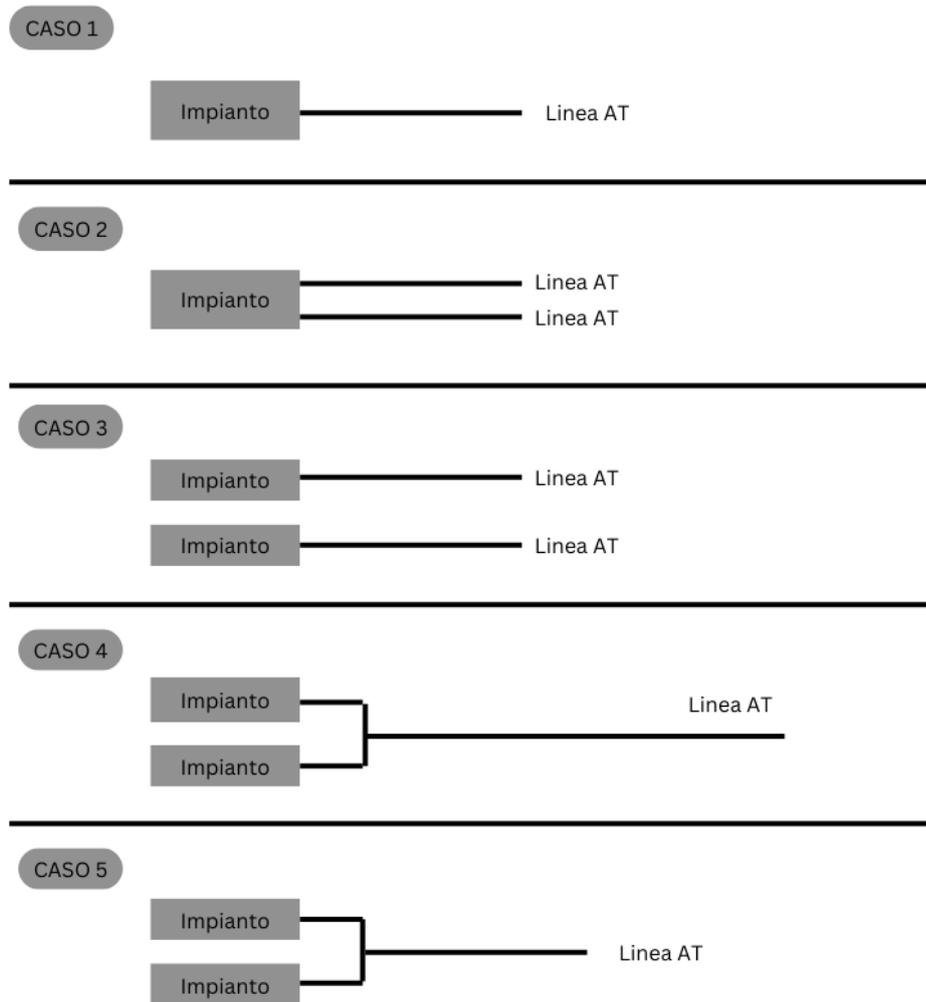
Già dall'analisi precedente si nota come l'aumentare delle linee in ingresso porti ad aumentare il rischio, nonostante le linee siano uguali tra loro. Questo è dovuto al fatto che aumenta l'area di raccolta dei fulmini sulla linea e in prossimità della linea. Anche per questa analisi è stato utilizzato il solo software del CEI prendendo come caso base la stazione SUD di Torino. Le ipotesi di partenza utilizzate sono state: linea AT ed MT che differiscono solo per la lunghezza, gli impianti "Quadri" e "Trasformatori" sono uguali tra di loro e, infine, che si considerano come base dei calcoli tre linee in ingresso (AT, MT e BT) con tre impianti diversi. Sono state trattate separatamente l'influenza delle linee AT e quelle delle linee MT.

Per le linee AT sono stati esaminati 5 casi:

- **CASO 1:** 1 linea AT connessa ad 1 impianto;
- **CASO 2:** 2 linee AT connesse ad 1 impianto (fatto raddoppiando la lunghezza della linea);

- **CASO 3:** 2 linee AT ( $L_{TOT} = 2000m$ ) connesse a 2 impianti;
- **CASO 4:** 2 impianti connessi alla stessa linea AT (Lunghezza=2000m);
- **CASO 5:** 2 impianti connessi alla stessa linea AT (Lunghezza=1000m).

I risultati sono anche spiegati graficamente nella figura 3.10.



**Figura 3.10:** Spiegazione grafica dei casi dell'analisi sull'importanza del numero di linee

Si riassumono i risultati nella tabella 3.16

Dal **CASO 2** e **3** si capisce quanto detto in precedenza, e cioè che non è possibile usare un singolo impianto per i Trasformatori e quindi anche per i Quadri. Il non

**Tabella 3.16:** Risultati analisi sull'importanza del numero di linee - influenza delle linee AT

	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R4</b>
<b>CASO 1</b>	$4.99 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
<b>CASO 2</b>	$5.63 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-3}$
<b>CASO 3</b>	$7.30 \times 10^{-5}$	$4.07 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-3}$
<b>CASO 4</b>	$7.30 \times 10^{-5}$	$4.07 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-3}$
<b>CASO 5</b>	$6.66 \times 10^{-5}$	$3.74 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{-3}$

poterli utilizzare significa che considerare 1 impianto o 2 impianti non fornisce lo stesso risultato di rischio, così come accadeva per il caso BT. Tuttavia, dopo attente riflessioni, si è concluso che il considerare un numero di impianti MT ed AT superiore ad uno per tipo significa sovrastimare il rischio. Quindi anche nel caso in cui ci fossero più linee AT (o MT) in ingresso alla struttura, gli impianti che vengono considerati sono sempre uno per i Trasformatori e uno per i Quadri (**CASO 2**). Si può inoltre concludere che basta una singola linea alla quale si va ad aumentare la lunghezza per tenere in considerazione l'effetto di più linee.

**ATTENZIONE:** nel caso della stazione SUD-OVEST di Torino esistono più impianti "Quadri" e "Trasformatori". Il motivo è che in quel caso cambiano proprio i livelli di tensione e la tipologia di linea che entra in stazione.

Le linee MT sono uguali a quelle AT, cambia solo la lunghezza, quindi, dopo i risultati ottenuti per le linee AT, con le linee MT è stato osservato l'effetto dell'aumento del numero delle linee nel valore del rischio. Infatti, nelle stazioni elettriche, sono le linee MT che possono essere anche molto numerose. Per questa analisi è stato preso come riferimento di impostazione del calcolo il **CASO 4** (che fornisce comunque lo stesso risultato del **CASO 3**). In questo modo, per quanto detto in precedenza, si sovrastima il rischio, perché si considera un numero di impianti sempre maggiore. Ma l'analisi punta semplicemente ad evidenziare come l'aumento del numero delle linee (nel caso in questione l'aumento della lunghezza di una singola linea) influenza i valori di rischio. È quindi come se si abbia una singola linea equivalente che tiene in conto l'effetto della totalità delle linee. La singola linea ha una lunghezza di 400m. I risultati sono riportati nella tabella 3.17.

Osservando i risultati ottenuti si osserva facilmente come all'aumentare del numero delle linee aumenta anche il rischio. Questo è dovuto all'aumento dell'area totale di raccolta delle linee. L'aumento è praticamente lineare. Da questa analisi si capisce quindi come sia necessario considerare il numero totale delle linee, considerando anche le ipotesi trattate in 3.4.2 riguardo la sovrapposizione dell'area di raccolta e il fattore riduttivo.

**Tabella 3.17:** Risultati analisi sull'importanza del numero di linee - influenza delle linee MT

N° LINEE MT	Lunghezza [m]	R1	R2	R4
1	400	$4.99 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
2	800	$6.91 \times 10^{-5}$	$3.87 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-3}$
3	1200	$8.78 \times 10^{-5}$	$4.95 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^{-3}$
4	1600	$1.06 \times 10^{-4}$	$6.00 \times 10^{-3}$	$2.11 \times 10^{-3}$
5	2000	$1.24 \times 10^{-4}$	$7.03 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-3}$
6	2400	$1.41 \times 10^{-4}$	$8.03 \times 10^{-3}$	$2.75 \times 10^{-3}$
7	2800	$1.58 \times 10^{-4}$	$9.01 \times 10^{-3}$	$3.06 \times 10^{-3}$
8	3200	$1.75 \times 10^{-4}$	$9.96 \times 10^{-3}$	$3.36 \times 10^{-3}$
9	3600	$1.91 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-2}$	$3.66 \times 10^{-3}$
10	4000	$2.07 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$3.95 \times 10^{-3}$

### Analisi sulla tensione di isolamento

Questa analisi è stata pensata per capire l'effettivo impatto del valore della tensione di tenuta di un impianto nella valutazione del rischio. Senza ancora usufruire del foglio di calcolo excel, è stato modificato il parametro della tensione di tenuta degli impianti MT e AT entro i limiti del programma, andando ad osservare le variazioni relative del valore del rischio. Anche qui l'analisi è stata fatta partendo da una vecchia versione della stazione SUD di Torino, su di un documento Flash pensato proprio per questa analisi. I risultati sono riassunti nella tabella 3.18 che segue.

**Tabella 3.18:** Risultati analisi sulla tensione di isolamento

$U_w$ impianti MT e AT	R1	R2	R4
1000 V	$8.56 \times 10^{-4}$	$4.97 \times 10^{-2}$	$1.48 \times 10^{-2}$
1500 V	$7.73 \times 10^{-4}$	$4.49 \times 10^{-2}$	$1.34 \times 10^{-2}$
2500 V	$6.20 \times 10^{-4}$	$3.59 \times 10^{-2}$	$1.08 \times 10^{-2}$
4000 V	$3.73 \times 10^{-4}$	$2.15 \times 10^{-2}$	$6.71 \times 10^{-3}$
6000 V	$2.07 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$3.95 \times 10^{-3}$

È possibile anche riportare le variazioni relative, ma si capisce facilmente come all'aumentare della tensione di tenuta degli impianti il rischio diminuisce. Questo è logico, in quanto gli impianti sono in grado di sopportare anche sovratensioni più importanti. Diventa quindi limitante tenere un limite massimo di 6000 V per gli impianti di alta e media tensione che hanno naturalmente un livello di tenuta superiore. Si spiega in questo modo la creazione del foglio di calcolo excel.

### Analisi sull'importanza della tensione di isolamento degli impianti MT ed AT (Quadri e Trasformatori)

Continuando il ragionamento iniziato al paragrafo precedente, si sfrutta il foglio di calcolo excel per valutare l'effetto dell'estensione del valore di tenuta degli impianti MT e AT sul valore del rischio. La stazione di riferimento è sempre la SUD di Torino. Si fa infatti riferimento ai valori di tensione di tenuta reali relativi ai trasformatori e ai quadri MT della stazione in questione. Oltre al valore  $U_w$ , si cambia anche il valore  $P_{LI}$ . Questo viene fatto per valutare l'effetto di questo parametro che, come è stato già detto, è un limite del software se utilizzato per le stazioni elettriche. Il valore di  $P_{LI}$  usato in questa analisi è uguale sia per il caso MT che per il caso AT, e i valori non corrispondono con quanto riportato in tabella 3.1 perché la seguente è stata un'analisi antecedente a quei risultati. I risultati sono sintetizzati nella tabella 3.19. Il valore degli impianti BT è impostato a 1000 V e non cambia tra i diversi casi.

**Tabella 3.19:** Risultati analisi sull'importanza della tensione di isolamento degli impianti MT e AT

	$U_w$ MT [kV]	$U_w$ AT [kV]	$P_{LI}$	R1	R2
<b>CASO 1</b>	6	6	0,1	$5.60 \times 10^{-5}$	$2.98 \times 10^{-3}$
<b>CASO 2</b>	125	125	0,1	$3.84 \times 10^{-5}$	$1.96 \times 10^{-3}$
<b>CASO 3</b>	125	900	0,1	$3.84 \times 10^{-5}$	$1.96 \times 10^{-3}$
<b>CASO 4</b>	125	125	0,001	$1.81 \times 10^{-5}$	$7.72 \times 10^{-4}$
<b>CASO 5</b>	125	900	0,001	$1.80 \times 10^{-5}$	$7.70 \times 10^{-4}$

Come si intuisce, il software FLASH, limitando la scelta della tensione di tenuta degli impianti interni, sovrastima il rischio. Infatti, al crescere delle tensione di tenuta oltre i valori selezionabili sul software, il valore del rischio diminuisce. Si nota anche che la differenza di tensione negli impianti AT non è così tanto marcata. È invece molto importante l'effetto del parametro  $P_{LI}$ . Questi risultati giustificano quindi il voler usare il foglio di calcolo excel per curare maggiormente la valutazione del rischio bypassando i limiti del software proposto dal CEI.

### Analisi sulla schermatura degli impianti "Quadri" e "Trasformatori"

Come discusso nel paragrafo 3.4.5, con questa analisi si osserva l'effetto della schermatura per gli impianti "Quadri" e "Trasformatori". È stato anticipato come, sotto alcune particolari condizioni, nonostante questi impianti si discostino dalla rappresentazione di impianto così come lo intende il software Flash, i Quadri e i Trasformatori possano essere considerati come dei "cavi schermati". I risultati mostrati nella tabella 3.20 riassumono diverse casistiche in cui sono considerati

schermati, o meno, gli impianti MT e AT. La stazione di riferimento è sempre la SUD di Torino in cui sono considerati tre impianti (Ausiliari, Quadri e Trasformatori) collegato a tre linee (BT, MT e AT) e dove la linea BT viene considerata sempre schermata. Gli impianti Quadri e Trasformatori sono comunque uguali tra di loro. Le prove sono state eseguite sul software FLASH.

**Tabella 3.20:** Risultati analisi sulla schermatura degli impianti "Quadri" e "Trasformatori"

	Sch. MT	Sch. AT	R1	R2	R4
<b>CASO 1</b>	NO	NO	$5.01 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$
<b>CASO 2</b>	SI	NO	$3.30 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-3}$	$8.12 \times 10^{-4}$
<b>CASO 3</b>	NO	SI	$3.30 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-3}$	$8.12 \times 10^{-4}$
<b>CASO 4</b>	SI	SI	$1.54 \times 10^{-5}$	$7.48 \times 10^{-4}$	$5.19 \times 10^{-4}$

Da questa analisi si capisce che se si considerano schermati gli impianti MT e AT si riesce ad ottenere una notevole riduzione del rischio. Da questa analisi derivano quindi le ipotesi discusse in 3.4.5.

### Analisi sulla divisione in zone

Prima di confermare l'ipotesi sulla divisione in zone per curare maggiormente la valutazione del rischio, è stata compiuta la seguente analisi che ha come scopo quello di osservare l'effettiva efficacia di tale scelta. Sono stati esaminati due differenti casi:

- CASO 1: Struttura raggruppata in una singola zona;
- CASO 2: Struttura divisa in tre zone ("Struttura", "Quadri" e "Trasformatori").

I risultati si riportano nella tabella 3.21

**Tabella 3.21:** Risultati analisi sulla divisione in zone

	R1	R2	R4
<b>CASO 1</b>	$5.60 \times 10^{-5}$	$2.98 \times 10^{-3}$	$1.43 \times 10^{-3}$
<b>CASO 2</b>	$1.11 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-3}$	$4.19 \times 10^{-4}$

Da questa analisi, come già detto in precedenza, si nota che la divisione in zone abbassa il rischio. Il motivo è che con la divisione in zone non tutta la struttura viene considerata pericolosa allo stesso modo. Risulta quindi vantaggioso e più preciso suddividere la stazione in più zone con caratteristiche diverse.

## Capitolo 4

# Valutazione del rischio di fulminazione

In questo capitolo si discutono le ipotesi e i risultati della valutazione del rischio fatta sulle stazioni elettriche in esame. Il calcolo viene fatto su tre stazioni di Torino (SUD, SUD-OVEST, Arbarello) e su un'unica stazione di Parma, la SPIP. Con i dati forniti da Ireti, integrati con i dati recuperati dai sopralluoghi, è stato possibile calcolare il rischio. Operativamente, il calcolo è stato dapprima eseguito tramite l'ausilio del software FLASH. Come già detto in precedenza, il software sovrastima il rischio. Proprio per questo motivo è stato creato il foglio di calcolo excel che permette di superare i limiti numerici del software. Dopo aver ottenuto i valori di rischio tramite il FLASH, si imposta lo stesso calcolo nel foglio di calcolo, assicurandosi che tutti i risultati vengano esattamente uguali tra di loro (anche i risultati intermedi). In questo modo si può "convalidare" il foglio di calcolo, cioè autocertificare che questo dia gli stessi risultati del software del CEI, un software ufficiale e riconosciuto ai fini della valutazione del rischio. Solo dopo la convalida del foglio di calcolo excel si esegue la modifica dei parametri di interesse per bypassare i limiti del software. Una volta modificati i parametri è possibile quindi visionare tramite il foglio di lavoro tutti i risultati, così come nel FLASH. Si capisce quindi se il rischio è al di sopra o al di sotto del rischio tollerabile, con la possibilità di fare tutti i ragionamenti del caso. Adesso si entra nel vivo del calcolo, presentando caso per caso tutte le stazioni elettriche che sono state esaminate.

## 4.1 Stazione SUD di Torino

La stazione SUD di Torino è ubicata in via Olivero 7. È stata oggetto di lavori recenti di potenziamento. È GIS (Gas Insulated Station), tranne gli stalli AT in aria presenti sul piazzale che sono stati installati per mantenere 2 trasformatori preesistenti (1 e 2). In totale ci sono tre trasformatori AT/MT. Ci sono 3 sezioni MT: gialla verde e rossa. La stazione è composta da due edifici. Il principale e quello più alto si trova entrando dal cancello sulla destra. Al primo piano si trova la sala controllo dove il pavimento flottante è in materiale plastico. Al piano terra dello stesso edificio c'è il quadro MT della sezione gialla, gli organi di manovra e protezione AT (GIS) ed il trasformatore 3 che viene raffreddato da uno scambiatore giallo nel piazzale e che ha gli ingressi di AT isolati in  $SF_6$ . Il locale del trasformatore è dotato di sistemi antincendio a  $CO_2$  automatici. Gli altri locali hanno semplici estintori. Il pavimento del piano terra è tutto in cemento. Facente parte dello stesso edificio, ma entrando da un altro ingresso, ci sono i locali che ospitano gli altri due trasformatori. Anche qui sono presenti i sistemi per lo spegnimento automatico dell'incendio in  $CO_2$ . L'olio dei trasformatori esce tramite dei tubi grigi all'esterno del locale in uno scambiatore esterno. Davanti allo scambiatore ci sono dei pannelli fonoassorbenti. Sul tetto di questo edificio il pavimento è in materiale isolante. Sono presenti delle scale metalliche e linee di alimentazione per l'illuminazione esterna dell'edificio. Al piano interrato dello stesso edificio è presente un locale dedicato al passaggio dei cavi. Entrando dal cancello, si accede direttamente al piazzale esterno dove sono presenti: i 3 TFN (uno per ciascuna sezione MT), un trasformatore per i servizi ausiliari, uno scambiatore giallo dedicato al trasformatore AT/MT numero 3 ed gli stalli AT in aria che alimentano i trasformatori 1 e 2. Il secondo edificio si trova sulla sinistra del cancello. Il locale ospita i quadri MT (sezione verde e rossa). Il pavimento è in cemento. Nella vicinanza della struttura, che si trova in una zona urbana, sono presenti elementi più alti (bandiere, alberi ed edifici).

### 4.1.1 Caratteristiche stazione SUD di Torino

Dopo aver descritto gli elementi principali della stazione elettrica SUD, si presentano in questo paragrafo le ipotesi specifiche che sono state utilizzate oltre quelle generali che sono state precedentemente discusse. Queste verranno presentate nello stesso ordine delle ipotesi generali.

#### **Ipotesi: struttura**

La stazione si trova in una zona urbana circondato da un edificio abitativo di altezza superiore lato est, bandiere con altezza maggiore lato sud, alberi lato ovest e



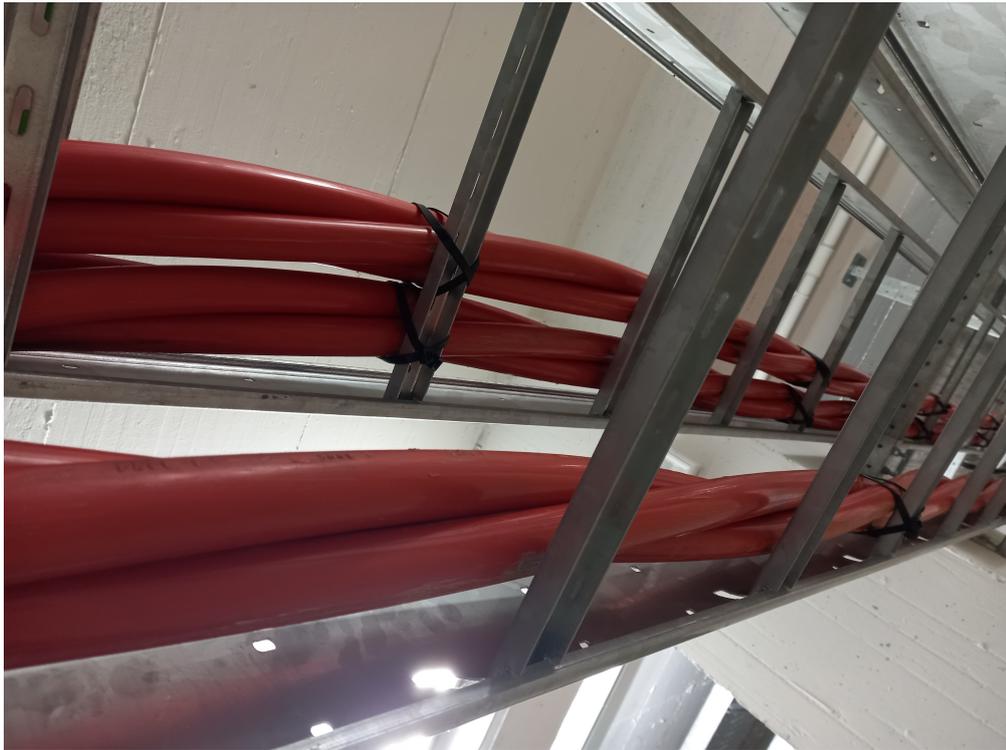
**Figura 4.1:** Piazzale interno stazione SUD

edificio lato nord. Il coefficiente di posizione della struttura scelto è stato  $C_D = 0,50$  inerente ad una struttura alta ma non isolata. È stato recuperato il dato inerente il valore di densità di fulmini a terra  $N_g$  dalla banca dati del CEI. In quella posizione geografica il valore di  $N_g$  è pari a 4,82. L'edificio non presenta nessun sistema LPS. Grazie al tool grafico del software Flash è stato possibile disegnare la stazione e calcolare automaticamente i valori delle aree di raccolta. Si riporta in figura 4.5 la struttura, semplificata, disegnata tramite il software e in figura 4.6 una foto dal satellite.

In verde più scuro è rappresentata l'area di raccolta dei fulmini sulla struttura  $A_D$ , mentre in verde più chiaro si rappresenta l'area di raccolta dei fulmini in prossimità della struttura  $A_M$ . Quest'ultima è molto estesa, infatti non è interamente rappresentata nella figura.

### **Ipotesi: linee**

Così come detto nel capitolo precedente, le linee considerate in questa stazione elettrica sono 3: linea AT, linea MT e linea BT. Le linee sono all'interno di un contesto urbano con edifici che difficilmente raggiungono i 20 metri. Il coefficiente di



**Figura 4.2:** Cavi MT stazione SUD

posizione scelto per tutte le linee è per questo motivo  $C_E = 0,10$ . In totale ci sono due ingressi in cavo AT. La lunghezza totale della linea nel software Flash è infatti 2000 metri (vedi paragrafo 3.4.6). I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.5. Le linee entranti non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata a monte del GIS e relativamente ai cavi.

Le linee MT afferenti alla stazione sono in totale 32. Applicando il fattore riduttivo di cui parlato precedentemente e considerando una lunghezza di ogni linea pari a 400 metri, la lunghezza della linea MT equivalente è stata presa pari a 8800 metri. I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.7. In questa stazione, come in tutte le altre stazioni site in Torino, gli schermi dei cavi MT sono collegati all'impianto di terra ambo le estremità. Le linee non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata relativamente ai cavi.

Per la linea BT si confermano le ipotesi utilizzate nella parte delle ipotesi generali. Gli schermi non vengono considerati collegati all'impianto di terra della stazione. Per quanto riguarda le protezioni, le linee vengono considerate prive di sistemi SPD e con nessun'altra tipologia di protezione relativamente ai cavi.



**Figura 4.3:** Trasformatore AT/MT stazione SUD

### **Ipotesi: zone**

Così come detto nel capitolo precedente, le zone considerate in questa stazione elettrica sono 3: Struttura, Trasformatori e Quadri. Rispetto alle ipotesi generali valide per tutte le stazioni, è necessario aggiungere qualche altra piccola informazione. Come dati di zona è sufficiente aggiungere le informazioni sulla pavimentazione nelle diverse zone e sulle misure antincendio che vengono adottate. Sono riassunte, divise per zone, nella tabella 4.1.

Mancano anche le informazioni sul valore dell'edificio, del contenuto e degli impianti interni delle zone. Sfruttando la suddivisione di cui in 3.10, si riassumono i precisi valori di costi in tabella 4.2.

Il valore complessivo dell'intera stazione si attesta a 13,5 milioni di euro.



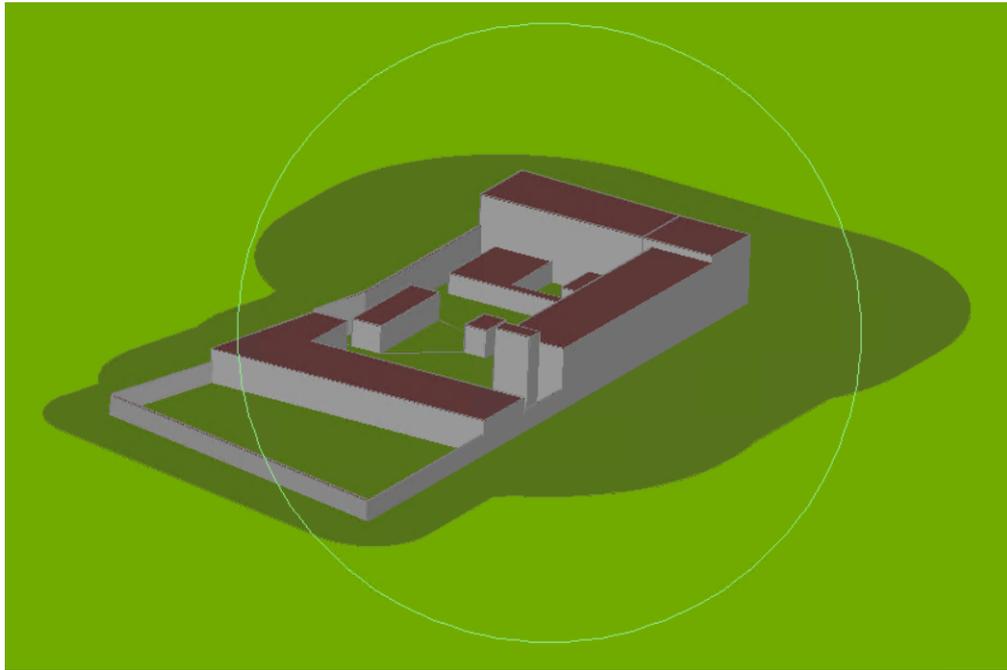
**Figura 4.4:** Terminali in aria dei trasformatori AT/MT stazione SUD

**Tabella 4.1:** Informazioni zone Stazione SUD di Torino

<b>Z1: Struttura</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]
<b>Z2: Trasformatori</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni automatiche [ $r_p = 0,2$ ]
<b>Z3: Quadri</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]

### Ipotesi: impianti

Così come detto nel capitolo precedente, gli impianti considerati in questa stazione elettrica sono 3: Ausiliari, Quadri MT e Trasformatori. Per l'impianto degli ausiliari



**Figura 4.5:** Rappresentazione stazione SUD di Torino

**Tabella 4.2:** Suddivisione dei costi stazione SUD di Torino

<b>Z1: Struttura</b>	Edificio	$2.45 \times 10^6 \text{ €}$
	Contenuto	$4.00 \times 10^6 \text{ €}$
	Impianti	$2.50 \times 10^6 \text{ €}$
<b>Z2: Trasformatori</b>	Edificio	$5.25 \times 10^5 \text{ €}$
	Contenuto	$5.00 \times 10^5 \text{ €}$
	Impianti	$1.50 \times 10^6 \text{ €}$
<b>Z3: Quadri</b>	Edificio	$5.25 \times 10^5 \text{ €}$
	Contenuto	$5.00 \times 10^5 \text{ €}$
	Impianti	$1.00 \times 10^6 \text{ €}$

valgono esattamente le ipotesi che sono state formulate nel capitolo precedente e riassunte in 3.14.

Per l'impianto Trasformatori è invece necessario specificare le caratteristiche specifiche di questa stazione. Si riportano direttamente i valori numerici usati per il calcolo tramite foglio excel, senza quindi considerare i valori limitanti che vengono usati software Flash. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso 4.3.

Il valore della tensione di tenuta è relativo al trasformatore meno performante



**Figura 4.6:** Stazione SUD di Torino [17]

**Tabella 4.3:** Valori impianto Trasformatori stazione SUD di Torino

$U_w$	900kV
$P_{LI}$	0,0006187
$P_{LD}$	0,02
$K_{S3}$	1
$K_{S4}$	0,00111
$P_{SPD}$	1

dal punto di vista della tensione di tenuta all'impulso atmosferico. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . Per via della presenza di una parte del trasformatore in aria, questo non viene considerato come "schermato", segue quindi il valore  $K_{S3}$  in tabella. Non sono inoltre presenti scaricatori a monte dei trasformatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

Per l'impianto Quadri MT è necessario implementare alcune informazioni mancanti. Anche in questo caso si riportano direttamente i valori numerici utilizzati nel calcolo finale della valutazione del rischio. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso al paragrafo 4.4.

Il valore della tensione di tenuta è relativo ai quadri MT. L'informazione è stata

**Tabella 4.4:** Valori impianto Quadri stazione SUD di Torino

$U_w$	125kV
$P_{LI}$	0,0045
$P_{LD}$	0,1
$K_{S3}$	0,0001
$K_{S4}$	0,008
$P_{SPD}$	1

ottenuta mediante ricerche sul web e confermata dai dati forniti da IRETI. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . L'impianto Quadri, come spiegato in precedenza, può essere considerato schermato, segue quindi il valore  $K_{S3}$  in tabella. Non sono inoltre presenti scaricatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

#### 4.1.2 Modifiche al foglio di calcolo excel

Al fine di ottenere gli stessi risultati del software Flash, e quindi "validare" il foglio di calcolo creato in excel, sono state apportate delle modifiche nei calcoli, diverse da stazione a stazione. Il foglio di calcolo excel è stato creato a partire dagli esempi proposti dalla norma CEI EN 62305-2. L'input grafico e anche il modo in cui i calcoli vengono eseguiti seguono esattamente quanto riportato nell'allegato E. Se infatti vengono ricreati i casi di quell'allegato nel foglio di calcolo, i risultati sono uguali tra di loro. Nel momento dell'applicazione del foglio di calcolo al caso delle stazioni elettriche si è però notata una leggera discrepanza tra i risultati. Il motivo riguardava una errata considerazione degli impianti presenti nelle diverse zone. Infatti, per come era stato impostato il foglio excel, anche se una zona non conteneva un impianto, si otteneva una componente di rischio  $R_x$  relativa a quell'impianto in quella zona non nullo. Il problema è stato presto risolto banalmente moltiplicando per zero le componenti di rischio che dovevano essere nulle per via dell'assenza di quell'impianto nella zona. L'operazione di moltiplicazione per zero quindi differisce da stazione a stazione, in base agli impianti che sono presenti nelle diverse zone. Tramite questa operazione è stato quindi possibile validare il foglio di calcolo excel e procedere poi con la modifica dei parametri di tensione di tenuta e quelli connessi a questo. Per semplicità non si riporta l'elenco dettagliato dei parametri che sono stati moltiplicati per zero.

#### 4.1.3 Risultati stazione SUD di Torino

Inserendo tutti gli input nel foglio di calcolo e attuando tutte le modifiche del caso, è possibile visualizzare i risultati della valutazione del rischio. Tramite il file excel

è possibile visionare tutti i risultati intermedi del calcolo. Per i fini del seguente lavoro si riportano solo i valori finali della valutazione del rischio. Per il rischio **R1** i risultati sono riassunti in tabella 4.5.

**Tabella 4.5:** Risultati rischio R1 stazione SUD di Torino

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	$1.47 \times 10^{-8}$	$1.47 \times 10^{-8}$	$1.47 \times 10^{-8}$	$4.41 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>B</sub></b>	$7.35 \times 10^{-10}$	$2.94 \times 10^{-8}$	$7.35 \times 10^{-10}$	$3.09 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>C</sub></b>	0.00	$1.47 \times 10^{-6}$	$1.47 \times 10^{-7}$	$1.62 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>M</sub></b>	0.00	$3.16 \times 10^{-10}$	$2.54 \times 10^{-13}$	$3.17 \times 10^{-10}$
<b>R<sub>U</sub></b>	$8.25 \times 10^{-13}$	$3.03 \times 10^{-12}$	$4.92 \times 10^{-11}$	$5.31 \times 10^{-11}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$4.13 \times 10^{-12}$	$6.05 \times 10^{-10}$	$2.46 \times 10^{-10}$	$8.56 \times 10^{-10}$
<b>R<sub>W</sub></b>	0.00	$3.03 \times 10^{-8}$	$4.92 \times 10^{-8}$	$7.95 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	0.00	$2.48 \times 10^{-7}$	$2.48 \times 10^{-8}$	$2.72 \times 10^{-7}$
<b>R1</b>	$1.54 \times 10^{-8}$	$1.79 \times 10^{-6}$	$2.37 \times 10^{-7}$	<b><math>2.05 \times 10^{-6}</math></b>

La componente di rischio che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_C$  che fa riferimento al rischio dovuto al fulmine sulla struttura (S1) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti degli impianti interni (D3). Il contributo maggiore è quello della zona "Trasformatori". Quello della zona "Struttura" è pari a zero per via del parametro  $L_O$  impostato a zero per questa precisa zona. Comunque, il rischio R1 è molto al di sotto del rischio tollerabile RT. Questo significa che, per quanto riguarda il rischio di perdita di vita umana, la struttura può definirsi protetta.

I risultati del rischio R2 sono riassunti nella tabella 4.6.

Anche qui la componente che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_C$ . I contributi sono equamente attribuiti alle tre zone. Anche in questo caso il rischio R2 è al di sotto del rischio tollerabile. La struttura risulta quindi protetta.

I risultati del rischio R4 sono riassunti nella tabella 4.7.

Come per i rischi precedenti, anche qui la componente percentualmente più pesante è la  $R_C$ . Il valore del rischio R4 non deve essere confrontato con nessun

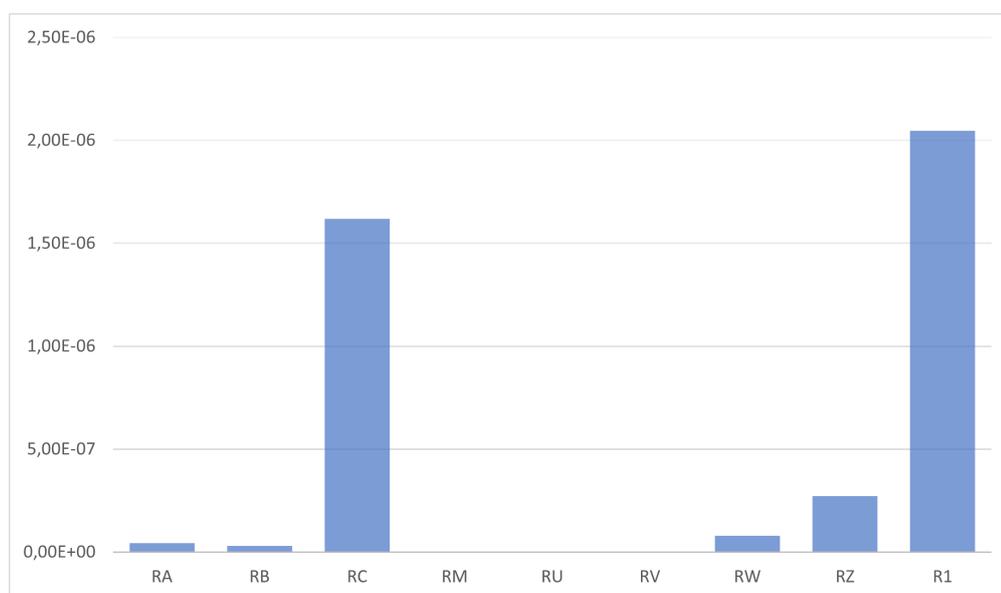
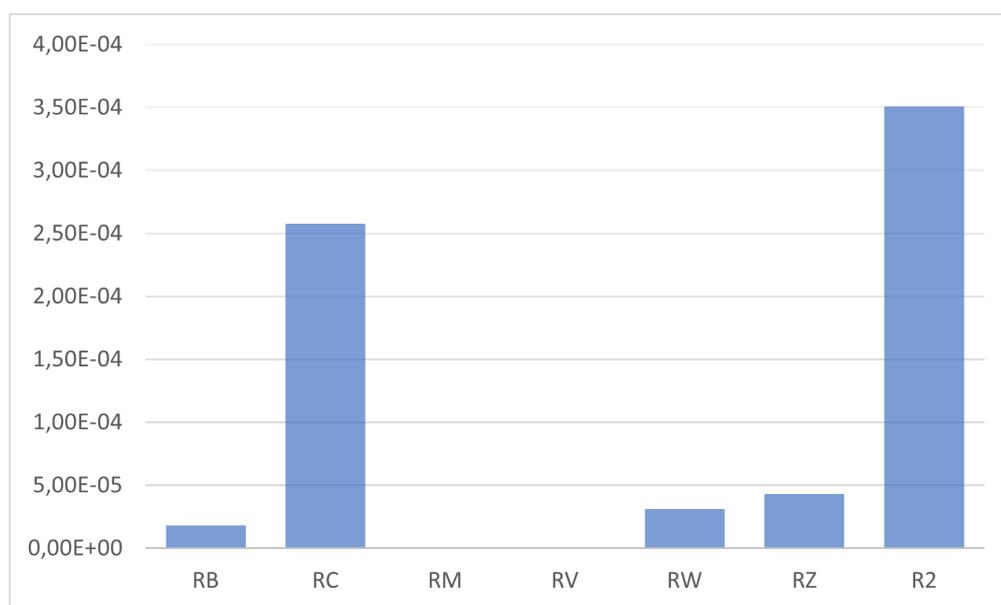


Figura 4.7: Componenti rischio R1 stazione SUD di Torino

Tabella 4.6: Risultati rischio R2 stazione SUD di Torino

	Z1: Struttura	Z2: Trasformatori	Z3: Quadri	TOT
<b>R<sub>B</sub></b>	$4.29 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-5}$	$4.29 \times 10^{-7}$	$1.80 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$8.59 \times 10^{-5}$	$8.59 \times 10^{-5}$	$8.59 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$1.49 \times 10^{-10}$	$1.85 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-10}$	$1.88 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$2.41 \times 10^{-9}$	$3.53 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-7}$	$5.00 \times 10^{-7}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$4.82 \times 10^{-7}$	$1.77 \times 10^{-6}$	$2.88 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$1.45 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-5}$	$4.34 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>2</sub></b>	$1.01 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$	<b><math>3.51 \times 10^{-4}</math></b>

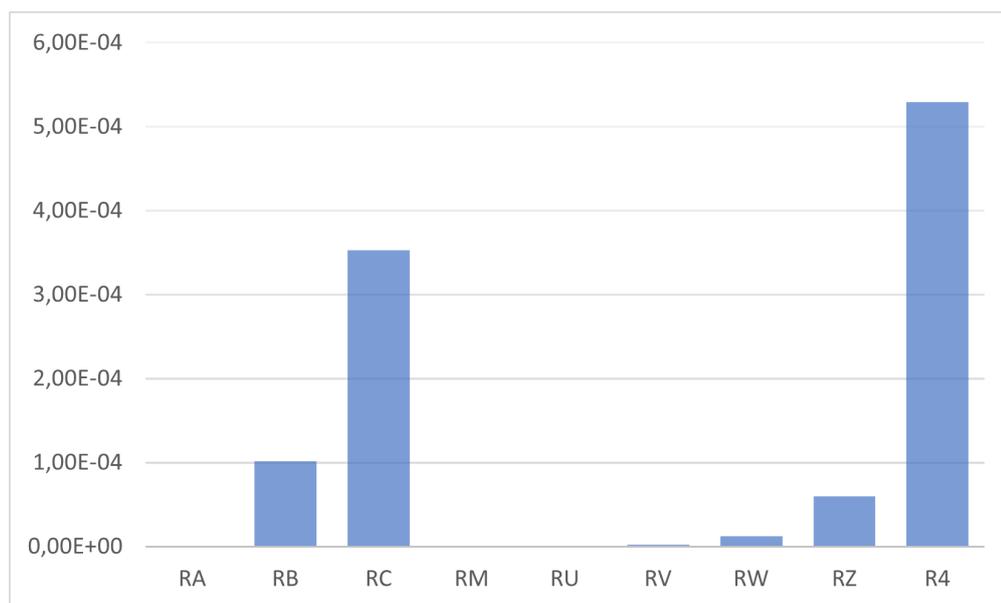
rischio tollerabile definito dalla norma. Per questi infatti, la CEI EN 62305 non definisce la protezione obbligatoria. È compito del committente, in questo caso IRETI, interpretare il valore numerico del rischio e valutare se è conveniente o meno installare delle protezioni contro il fulmine. Si conclude che la stazione SUD di Torino è una **STRUTTURA PROTETTA** contro il fulmine.



**Figura 4.8:** Componenti rischio R2 stazione SUD di Torino

**Tabella 4.7:** Risultati rischio R4 stazione SUD di Torino

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>B</sub></b>	$4.27 \times 10^{-6}$	$9.64 \times 10^{-5}$	$9.66 \times 10^{-7}$	$1.02 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$4.77 \times 10^{-5}$	$2.86 \times 10^{-4}$	$1.91 \times 10^{-5}$	$3.53 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$8.25 \times 10^{-11}$	$6.16 \times 10^{-8}$	$3.30 \times 10^{-11}$	$6.17 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>U</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>V</sub></b>	$2.40 \times 10^{-8}$	$1.98 \times 10^{-6}$	$3.24 \times 10^{-7}$	$2.33 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$2.68 \times 10^{-7}$	$5.89 \times 10^{-6}$	$6.39 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$8.03 \times 10^{-6}$	$4.82 \times 10^{-5}$	$3.21 \times 10^{-6}$	$5.94 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>4</sub></b>	$6.03 \times 10^{-5}$	$4.39 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-5}$	<b><math>5.92 \times 10^{-4}</math></b>



**Figura 4.9:** Componenti rischio R4 stazione SUD di Torino

## 4.2 Stazione ARBARELLO di Torino

La stazione ARBARELLO di Torino è ubicata in Via Bertola 48 BIS. La stazione si sviluppa interamente sottoterra, al di sotto di piazza Arbarello, in pieno centro di Torino. Per forza di cose la stazione è quindi GIS, senza nessuna parte isolata in aria. In totale sono presenti solo due trasformatori, uguali tra loro, con le due sezioni MT annesse (verde e rossa). Tramite le rampe è possibile accedere al primo piano interrato, a 4 metri al di sotto della strada. Già in questo primo piano interrato sono presenti una serie di locali importanti. Tra i primi locali che si incontrano, vi sono i locali adibiti a meeting room e a sala controllo della stazione. Qui il pavimento è flottante in legno trattato. Nello stesso piano sono anche presenti due locali contenenti rispettivamente i trasformatori di conversione e i quadri di distribuzione a 600V in corrente continua. Questi due locali sono adibiti all'alimentazione delle linee tranviarie. Il dato della presenza di questo locale è puramente a scopo informativo; non viene infatti tenuta in considerazione la possibile influenza di queste linee afferenti alla struttura sulla valutazione del rischio, dato che queste hanno uno scopo che è diverso dalla alimentazione di utenti allacciati alla rete pubblica. Inoltre sono anche protette da scaricatori. Il resto della pavimentazione di questo piano è principalmente in cemento, così come per il resto della struttura. Tramite le rampe o tramite delle scale metalliche si accede al secondo piano interrato, che si trova dieci metri sotto il livello della strada. In questo piano interrato si trovano i componenti più importanti della stazione. Sono presenti i locali che ospitano i due trasformatori AT/MT, con sistema di spegnimento automatico dell'incendio in  $CO_2$ . C'è il locale contenente il GIS 245 kV e poi ancora un locale con il sistema di gestione del neutro e i locali con i quadri di distribuzione MT (sezione rossa e verde). Scendendo ancora nell'ultimo piano interrato che si trova 13 metri sotto il livello della strada si trova il locale adibito al passaggio cavi. Qui si riesce a notare, anche in maniera molto evidente, il fatto che i cavi di AT facciano delle ampie curvature e siano in generale più lunghi rispetto al necessario. Il motivo è da associarsi al bilanciamento delle induttanze di fase sulle tratte trasposte. Questi infatti subiscono due trasposizioni lungo il percorso. La disposizione dei cavi in modo da avere quelle ampie curvature serve proprio a garantire che la lunghezza dell'ultima sezione trasposta sia equivalente alle altre sezioni. Nell'ultimo piano interrato sono anche presenti gli scambiatori dei trasformatori che garantiscono un corretto funzionamento e raffreddamento del trasformatore.

### 4.2.1 Caratteristiche stazione ARBARELLO di Torino

Dopo aver descritto gli elementi principali della stazione elettrica ARBARELLO, si presentano in questo paragrafo le ipotesi specifiche che sono state utilizzate



**Figura 4.10:** Trasformatore AT/MT stazione ARBARELLO

oltre quelle generali che sono state precedentemente discusse. Queste verranno presentate nello stesso ordine delle ipotesi generali.

### **Ipotesi: struttura**

La stazione si trova in una zona urbana. La piazza al di sotto della quale è presente la stazione è circondata interamente da edifici che hanno un'altezza considerevole, anche maggiore di 20 metri. Il coefficiente di posizione scelto è stato per questo motivo  $C_D = 0,25$  inerente ad una struttura bassa. Il valore di questo parametro probabilmente sovrastima il rischio, essendo la stazione e gli elementi sensibili al di sotto del livello della strada. È stato recuperato il dato inerente il valore di densità di fulmini a terra  $N_g$  dalla banca dati di TuttoNormel. In quella posizione



**Figura 4.11:** Quadri MT stazione ARBARELLO

geografica il valore di  $N_g$  è pari a 4,46. L'edificio, per ovvie ragioni, non presenta nessun sistema LPS. Grazie al tool grafico del software Flash è stato possibile disegnare la stazione e calcolare in maniera automatica i valori delle aree di raccolta. Essendo, in questo caso sottoterra, la stazione è stata simbolicamente rappresentata come un parallelepipedo. Questo corrisponde alla piazza sopra la stazione e quindi la parte esposta ad eventuali scariche di fulmine. Si riposta comunque in figura 4.14 la struttura, disegnata tramite il software.

Rispetto al caso della stazione SUD, qui l'area di raccolta dei fulmini sulla struttura  $A_D$  è molto ridotta. Il motivo è che l'altezza del parallelepipedo, che rappresenta la struttura, è stata ipotizzata molto piccola, precisamente pari a 2,50 metri, corrispondente all'altezza delle recinzioni poste negli ingressi della stazione.

### **Ipotesi: linee**

Le linee considerate in questa stazione elettrica sono 3: linea AT, linea MT e linea BT. Le linee sono all'interno di un contesto urbano con edifici che in alcuni casi raggiungono anche i 20 metri. Il coefficiente di posizione scelto per tutte le linee è per questo motivo  $C_E = 0,01$ . In totale ci sono due ingressi in cavo

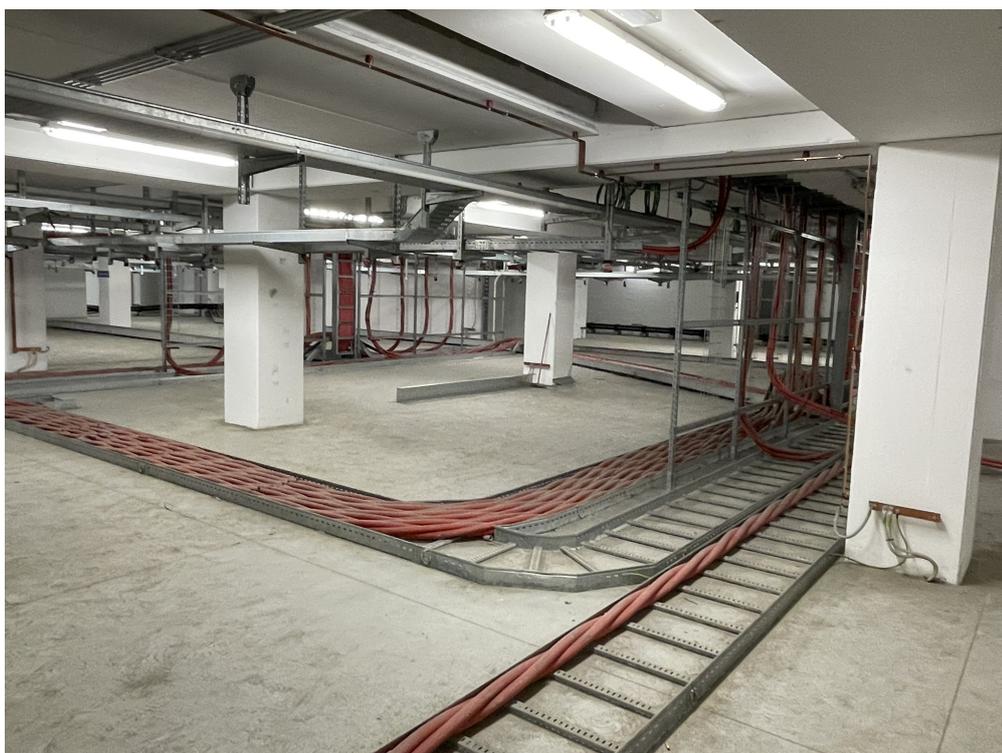


**Figura 4.12:** Cavi MT stazione ARBARELLO

AT. La lunghezza totale della linea nel software Flash è infatti 2000 metri (vedi 3.4.6). I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.5. Le linee entranti non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata a monte del GIS e relativamente ai cavi.

Le linee MT afferenti alla stazione sono in totale 20. Applicando il fattore riduttivo di cui parlato precedentemente e considerando una lunghezza di ogni linea, dalla cabina primaria alla prima cabina di rete, pari a 400 metri, la lunghezza della linea MT equivalente è stata presa pari a 5600 metri. I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.7. In questa stazione, come in tutte le altre stazioni site in Torino, gli schermi dei cavi MT sono collegati all'impianto di terra ambo le estremità. Le linee non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata relativamente ai cavi.

Per la linea BT si confermano le ipotesi utilizzate nella parte delle ipotesi generali. Gli schermi non vengono considerati collegati all'impianto di terra della stazione. Per quanto riguarda le protezioni, le linee vengono considerate prive di sistemi SPD e con nessun'altra tipologia di protezione relativamente ai cavi.



**Figura 4.13:** Locale passaggio cavi stazione ARBARELLO

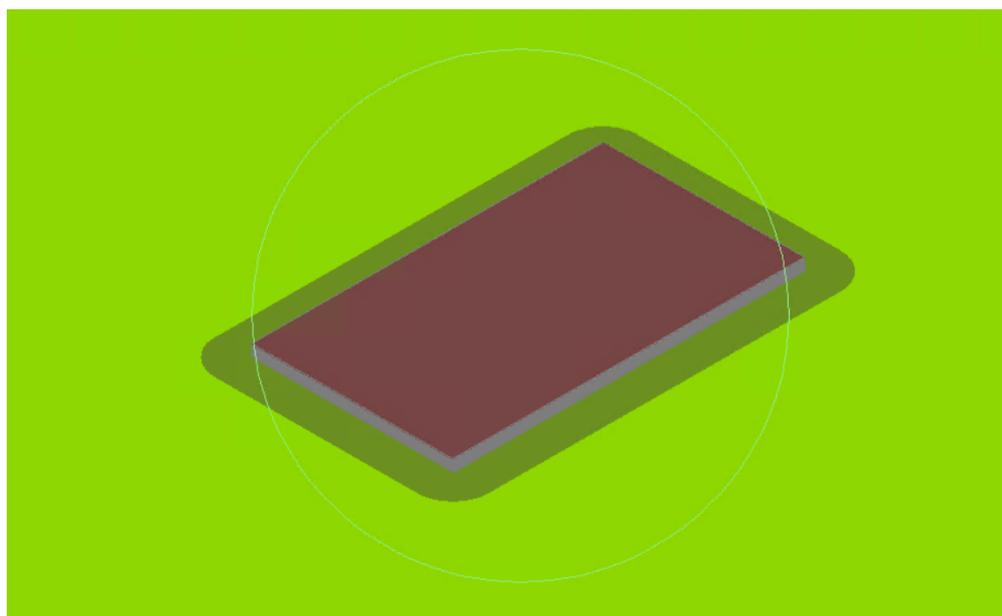
**Ipotesi: zone**

Le zone considerate in questa stazione elettrica sono 3: Struttura, Trasformatori e Quadri. Rispetto alle ipotesi generali valide per tutte le stazioni, è necessario aggiungere qualche altra piccola informazione. Come dati di zona è sufficiente aggiungere le informazioni sulla pavimentazione nelle diverse zone e sulle misure antincendio che vengono adottate. Sono riassunte, divise per zone, nella tabella 4.8.

**Tabella 4.8:** Informazioni zone Stazione ARBARELLO di Torino

<b>Z1: Struttura</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]
<b>Z2: Trasformatori</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni automatiche [ $r_p = 0,2$ ]
<b>Z3: Quadri</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]

Mancano anche le informazioni sul valore dell'edificio, del contenuto e degli



**Figura 4.14:** Rappresentazione stazione ARBARELLO di Torino

impianti interni delle zone. Sfruttando la suddivisione di cui in 3.10, si riassumono i precisi valori di costi in tabella 4.9.

**Tabella 4.9:** Suddivisione dei costi stazione ARBARELLO di Torino

<b>Z1: Struttura</b>	Edificio	$4.20 \times 10^6$ €
	Contenuto	$4.00 \times 10^6$ €
	Impianti	$2.50 \times 10^6$ €
<b>Z2: Trasformatori</b>	Edificio	$9.00 \times 10^5$ €
	Contenuto	$5.00 \times 10^5$ €
	Impianti	$1.50 \times 10^6$ €
<b>Z3: Quadri</b>	Edificio	$9.00 \times 10^5$ €
	Contenuto	$5.00 \times 10^5$ €
	Impianti	$1.00 \times 10^6$ €

Il valore complessivo dell'intera stazione si attesta a 16 milioni di euro.

### **Ipotesi: impianti**

Gli impianti considerati in questa stazione elettrica sono 3: Ausiliari, Quadri MT e Trasformatori. Il GIS è "contenuto" all'interno dell'impianto "Trasformatori" in quanto le caratteristiche in termini di tensione di tenuta all'impulso atmosferico

sono comparabili. Per l'impianto degli ausiliari valgono esattamente le ipotesi che sono state formulate nel capitolo precedente e riassunte in 3.14.

Per l'impianto Trasformatori è invece necessario specificare le caratteristiche di questa stazione. Si riportano direttamente i valori numerici usati per il calcolo tramite foglio excel, senza quindi considerare i valori limitanti che vengono usati dal software Flash. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso nel paragrafo 4.10.

**Tabella 4.10:** Valori impianto Trasformatori stazione ARBARELLO di Torino

$U_w$	1050kV
$P_{LI}$	0,00053035
$P_{LD}$	0,02
$K_{S3}$	0,0001
$K_{S4}$	0,00095238
$P_{SPD}$	1

Il valore della tensione di tenuta all'impulso atmosferico è uguale nei due trasformatori. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . I terminali dei trasformatori sono interamente isolati in SF6. Questo permette di considerare il trasformatore "schermato" e quindi segue il valore di  $K_{S3}$  in tabella. Non sono inoltre presenti scaricatori a monte dei trasformatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

Per l'impianto Quadri MT è necessario implementare alcune informazioni mancanti. Anche in questo caso si riportano direttamente i valori numerici utilizzati nel calcolo finale della valutazione del rischio. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso nel paragrafo 4.11.

**Tabella 4.11:** Valori impianto Quadri stazione ARBARELLO di Torino

$U_w$	125kV
$P_{LI}$	0,0045
$P_{LD}$	0,1
$K_{S3}$	0,0001
$K_{S4}$	0,008
$P_{SPD}$	1

Il valore della tensione di tenuta è relativo ai quadri di media. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . L'impianto Quadri, come spiegato in precedenza, può essere considerato schermato, segue quindi il valore  $K_{S3}$  in tabella. Non sono inoltre presenti scaricatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

## 4.2.2 Modifiche al foglio di calcolo excel

Anche per questa stazione, al fine di validare il foglio di calcolo, sono state apportate delle modifiche nei calcoli. Anche in questo caso, si è notata una leggera discrepanza tra i risultati ottenuti dal software con quelli del foglio di calcolo. Il motivo è il medesimo della stazione SUD: una errata considerazione degli impianti presenti nelle diverse zone. Infatti, per come era stato impostato il foglio excel, anche se una zona non conteneva un impianto, si otteneva una componente di rischio  $R_x$  relativa a quell'impianto in quella zona non nullo. Come prima, il problema si risolve moltiplicando per zero le componenti di rischio che dovevano essere nulle per via dell'assenza di quell'impianto nella zona. Tramite questa operazione è stato quindi possibile validare il foglio di calcolo excel e procedere poi con la modifica dei parametri di tensione di tenuta e quelli connessi a questo. Per semplicità non si riporta l'elenco dettagliato dei parametri che sono stati moltiplicati per zero.

## 4.2.3 Risultati stazione ARBARELLO di Torino

Inserendo tutti gli input nel foglio di calcolo e attuando tutte le modifiche del caso, è possibile visualizzare i risultati della valutazione del rischio. Tramite il file excel è possibile visionare tutti i risultati intermedi del calcolo. Per i fini del seguente lavoro si riportano solo i valori finali della valutazione del rischio. Per il rischio **R1** i risultati sono riassunti in tabella 4.12.

La componente di rischio che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_C$  che fa riferimento al rischio dovuto al fulmine sulla struttura (S1) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti degli impianti interni (D3). Il contributo maggiore è quello della zona "Trasformatori". Quello della zona "Struttura è pari a zero per via del parametro  $L_O$  impostato a zero per questa precisa zona. Comunque, il rischio R1 è molto al di sotto del rischio tollerabile RT. Questo significa che, per quanto riguarda il rischio di perdita di vita umana, la struttura può definirsi protetta.

I risultati del rischio R2 sono riassunti nella tabella 4.13.

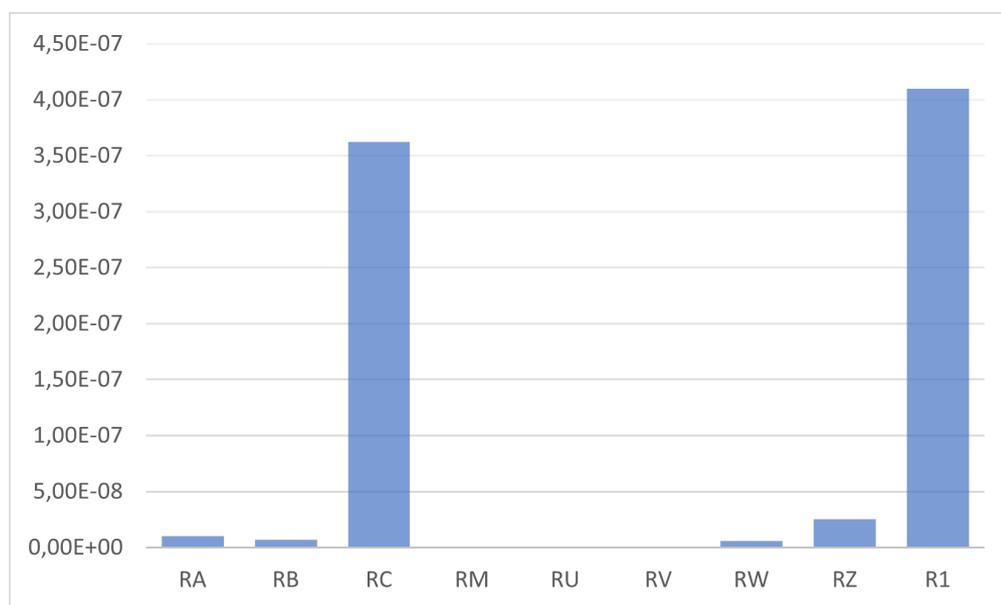
Anche qui la componente che percentualmente ha il peso maggiore e la componente  $R_C$ . I contributi sono equamente attribuiti alle tre zone. Anche in questo caso il rischio R2 è al di sotto del rischio tollerabile. La struttura risulta quindi protetta.

I risultati del rischio R4 sono riassunti nella tabella 4.14.

Come per i rischi precedenti, anche qui la componente percentualmente più pesante è la  $R_C$ , a cui segue la componente  $R_B$ . Il valore del rischio R4 non deve essere confrontato con nessun rischio tollerabile definito dalla norma. Per il rischio R4 infatti, la CEI EN 62305 non definisce la protezione obbligatoria. È compito del committente, in questo caso IRETI, interpretare il valore numerico del rischio e valutare se è conveniente o meno installare delle protezioni contro il

**Tabella 4.12:** Risultati rischio R1 stazione ARBARELLO di Torino

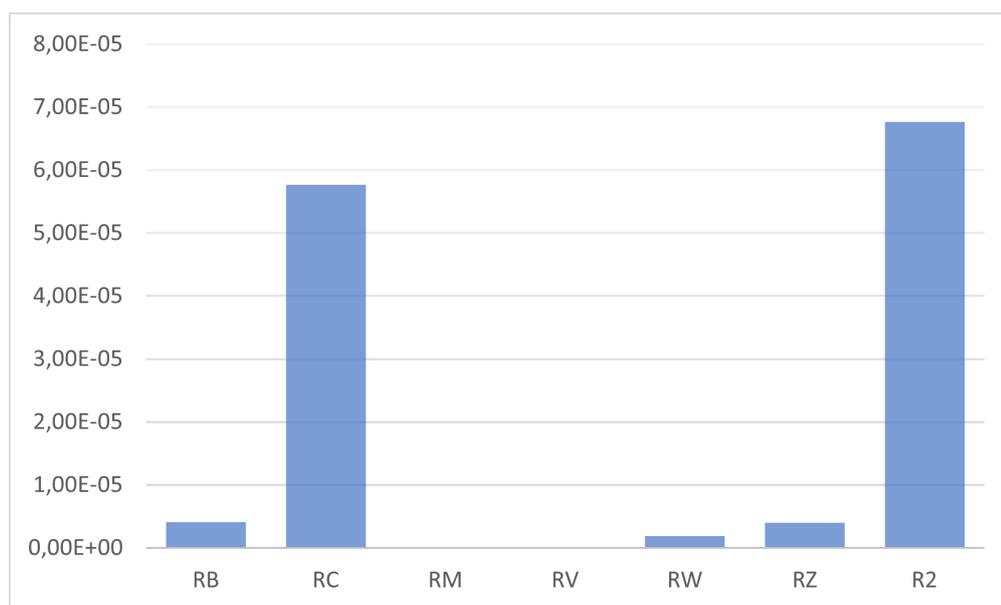
	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	$3.29 \times 10^{-9}$	$3.29 \times 10^{-9}$	$3.29 \times 10^{-9}$	$9.87 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>B</sub></b>	$1.65 \times 10^{-10}$	$6.58 \times 10^{-9}$	$1.65 \times 10^{-10}$	$6.91 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>C</sub></b>	0.00	$3.29 \times 10^{-7}$	$3.29 \times 10^{-8}$	$3.62 \times 10^{-7}$
<b>R<sub>M</sub></b>	0.00	$2.31 \times 10^{-12}$	$2.31 \times 10^{-13}$	$2.54 \times 10^{-12}$
<b>R<sub>U</sub></b>	$7.64 \times 10^{-14}$	$2.80 \times 10^{-13}$	$2.93 \times 10^{-12}$	$3.28 \times 10^{-12}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$3.82 \times 10^{-13}$	$5.60 \times 10^{-11}$	$1.46 \times 10^{-11}$	$7.10 \times 10^{-11}$
<b>R<sub>W</sub></b>	0.00	$2.80 \times 10^{-9}$	$2.93 \times 10^{-9}$	$5.73 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	0.00	$2.29 \times 10^{-8}$	$2.29 \times 10^{-9}$	$2.52 \times 10^{-8}$
<b>R1</b>	$3.46 \times 10^{-9}$	$3.65 \times 10^{-7}$	$4.16 \times 10^{-8}$	<b><math>4.10 \times 10^{-7}</math></b>



**Figura 4.15:** Componenti rischio R1 stazione ARBARELLO di Torino

**Tabella 4.13:** Risultati rischio R2 stazione ARBARELLO di Torino

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>B</sub></b>	$9.61 \times 10^{-8}$	$3.84 \times 10^{-6}$	$9.61 \times 10^{-8}$	$4.04 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$1.92 \times 10^{-5}$	$1.92 \times 10^{-5}$	$1.92 \times 10^{-5}$	$5.77 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$1.35 \times 10^{-10}$	$1.35 \times 10^{-10}$	$1.35 \times 10^{-10}$	$4.04 \times 10^{-10}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$2.23 \times 10^{-10}$	$3.27 \times 10^{-8}$	$8.55 \times 10^{-9}$	$4.15 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$4.46 \times 10^{-8}$	$1.64 \times 10^{-7}$	$1.71 \times 10^{-6}$	$1.92 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$1.34 \times 10^{-6}$	$1.34 \times 10^{-6}$	$1.34 \times 10^{-6}$	$4.01 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>2</sub></b>	$2.07 \times 10^{-5}$	$2.46 \times 10^{-5}$	$2.24 \times 10^{-5}$	<b><math>6.77 \times 10^{-5}</math></b>

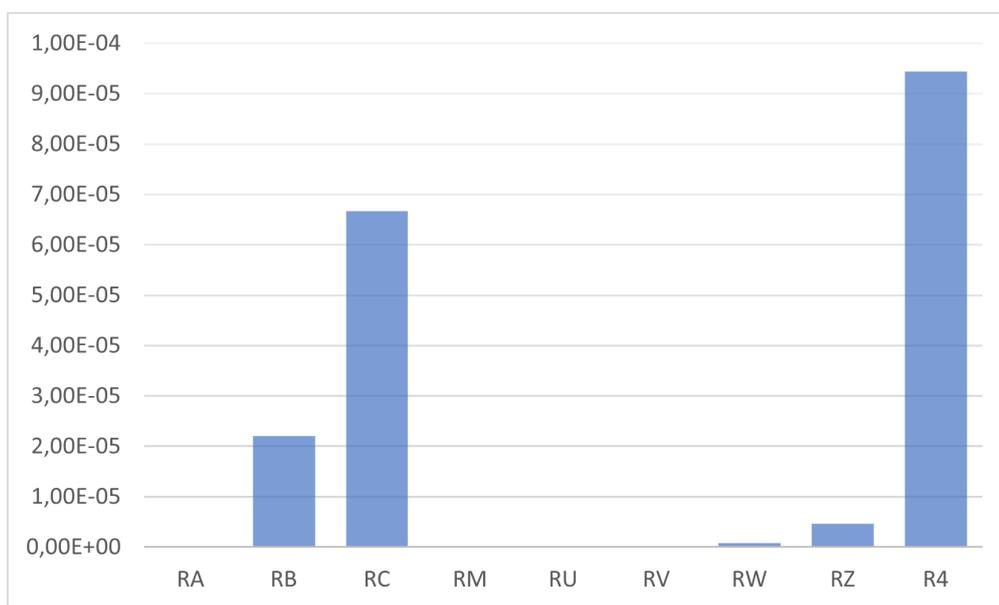


**Figura 4.16:** Componenti rischio R2 stazione ARBARELLO di Torino

fulmine. Si conclude che la stazione ARBARELLO di Torino è una **STRUTTURA PROTETTA** contro il fulmine.

**Tabella 4.14:** Risultati rischio R4 stazione ARBARELLO di Torino

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>B</sub></b>	$9.64 \times 10^{-7}$	$5.41 \times 10^{-5}$	$2.16 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$9.01 \times 10^{-6}$	$5.41 \times 10^{-5}$	$3.60 \times 10^{-6}$	$6.67 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$6.32 \times 10^{-11}$	$3.79 \times 10^{-10}$	$2.53 \times 10^{-11}$	$4.67 \times 10^{-10}$
<b>R<sub>U</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>V</sub></b>	$2.24 \times 10^{-9}$	$1.78 \times 10^{-7}$	$1.92 \times 10^{-8}$	$1.99 \times 10^{-7}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$2.09 \times 10^{-8}$	$4.60 \times 10^{-7}$	$3.21 \times 10^{-7}$	$8.01 \times 10^{-7}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$6.27 \times 10^{-7}$	$3.76 \times 10^{-6}$	$2.51 \times 10^{-7}$	$4.64 \times 10^{-6}$
<b>R4</b>	$1.06 \times 10^{-5}$	$7.94 \times 10^{-5}$	$4.41 \times 10^{-6}$	<b><math>9.44 \times 10^{-5}</math></b>



**Figura 4.17:** Componenti rischio R4 stazione ARBARELLO di Torino

## 4.3 Stazione SUD-OVEST di Torino

La stazione SUD-OVEST di Torino si trova in via Guido Reni 192. La stazione si trova all'interno di un contesto prettamente urbano. Dal punto di vista elettrico, la parte AT è di proprietà di Terna. Loro hanno l'arrivo in cavo, un GIS e poi il piazzale in aria dalla quale partono le linee che entrano all'interno della proprietà di Ireti. Le linee sono sia aeree che in cavo interrato. Il numero di trasformatori presenti nella stazione è pari a 6. Questi alimentano diverse sezioni di sbarre MT a 27, 22 e 7 kV. Il livello di tensione 7 kV viene ottenuto a partire dal livello a 27 kV. Nel piazzale di Ireti, gli elementi dello stallo sono tutti isolati in aria. Entrando nella stazione, si accede ad un primo piazzale con qualche albero di grandi dimensioni. Dall'ingresso si incontra un primo edificio, anch'esso di grandi dimensioni. Una parte di questo era adibito ad officina per la riparazione di apparecchiature elettriche. Adesso invece, parte dell'edificio è adibita a scuola, usata comunque molto raramente. Oltre a questi usi, la struttura ospita al piano terra la cabina a 7kV totalmente in aria. Nel tetto dell'edificio è presente un parapetto in ferro e anche antenne TV. Attraversando la struttura, si arriva nei pressi del piazzale in cui sono situate tutte le apparecchiature elettriche della stazione. È presente anche un prefabbricato con all'interno una cabina MT/BT. Il piazzale ospita la sezione 27 kV in aria e tutti i trasformatori, anche i TFN. Sotto il piazzale è presente, interrata, il locale con i quadri MT a 22kV. All'interno del piazzale è presente anche un deposito di olio esausto. Principalmente la pavimentazione è in cemento misto a terra. Nella zona dei trasformatori non sono stati visti né sistemi di spegnimento automatico dell'incendio né estintori. Per il rischio incendio si fa comunque fede a quanto riportato nella Valutazione Rischio Incendio (VRI) fornita da Ireti. È importante anche tenere in considerazione la presenza di una struttura di altezza elevata nel lato nord della stazione. Questa infatti, insieme ai palazzi, per via della loro altezza, abbassano il rischio di fulminazione diretta della stazione stessa.

### 4.3.1 Caratteristiche stazione SUD-OVEST di Torino

Dopo aver descritto gli elementi principali della stazione elettrica SUD-OVEST, si presentano in questo paragrafo le ipotesi specifiche che sono state utilizzate oltre quelle generali che sono state precedentemente discusse. Queste verranno presentate nello stesso ordine delle ipotesi generali.

#### **Ipotesi: struttura**

La stazione si trova in una zona prettamente urbana, nonostante sia lontana dal centro di Torino. La zona attorno alla quale si trova la stazione presenta palazzi e strutture che hanno un'altezza considerevole, anche maggiore di 20 metri. Il



**Figura 4.18:** Trasformatore AT/MT stazione SUD-OVEST

coefficiente di posizione scelto per la struttura è stato  $C_D = 0,50$  inerente ad una struttura bassa alta, ma non isolata. È stato recuperato il dato inerente il valore di densità di fulmini a terra  $N_g$  dalla banca dati del CEI. In quella posizione geografica il valore di  $N_g$  è pari a 4,82. L'edificio non presenta nessun sistema LPS. Grazie al tool grafico del software Flash e alle planimetrie, è stato possibile disegnare la stazione e calcolare in maniera automatica i valori delle aree di raccolta. Si riporta comunque in figura 4.22 la struttura, disegnata tramite il software e in figura 4.23 l'immagine dal satellite.

In verde più scuro è rappresentata l'area di raccolta dei fulmini sulla struttura  $A_D$ , mentre in verde più chiaro si rappresenta l'area di raccolta dei fulmini in prossimità della struttura  $A_M$ . Quest'ultima è molto estesa, infatti non è interamente rappresentata nella figura. Così come chiarito nelle ipotesi generali, gli elementi dello stallo vengono considerati come "struttura" sulla quale può colpire il fulmine. Questo spiega l'immagine 4.22 che oltre a rappresentare gli edifici veri e propri all'interno della stazione, schematizza anche lo stallo all'aperto e gli altri componenti elettrici come fossero un edificio.



**Figura 4.19:** Sezione 27kV in aria stazione SUD-OVEST

#### **Ipotesi: linee**

Diversamente da come detto nelle ipotesi generali, per questa stazione sono state considerate in totale 5 linee: 2 linee AT, 2 linee MT e la linea BT. Sono state create 2 linee AT poiché in questo modo si rappresentano in modo diverso le linee in cavo e le linee aeree. La stazione presenta infatti in ingresso 2 linee in cavo AT e due linee aeree AT. Le due linee MT servono invece per rappresentare i diversi livelli di tensione MT, che hanno caratteristiche diverse. Una di questa fa riferimento al livello di tensione 7 kV, mentre l'altra rappresenta le caratteristiche dei livelli 27 e 22 kV. La linea BT ha lo stesso significato dei casi precedenti. Le linee sono all'interno di un contesto urbano con edifici che raggiungono anche i 20 metri. Il coefficiente di posizione scelto per tutte le linee è per questo motivo  $C_E = 0,01$ . La linea AT aerea rappresenta in realtà 2 linee aeree. Essendo l'estensione di queste linee ridotta per via della vicinanza della parte di Terna, la lunghezza per ogni singola linea è stata assunta pari a 200 metri. Questo fa sì che la lunghezza totale della linea AT aerea è di 400 metri. La diretta conseguenza è che, rispetto ai casi precedenti, si ha una diminuzione della componente di rischio legata alle linee AT. I conduttori di questa linea sono nudi, senza schermo. Su queste linee è presente



**Figura 4.20:** Quadri MT stazione SUD-OVEST

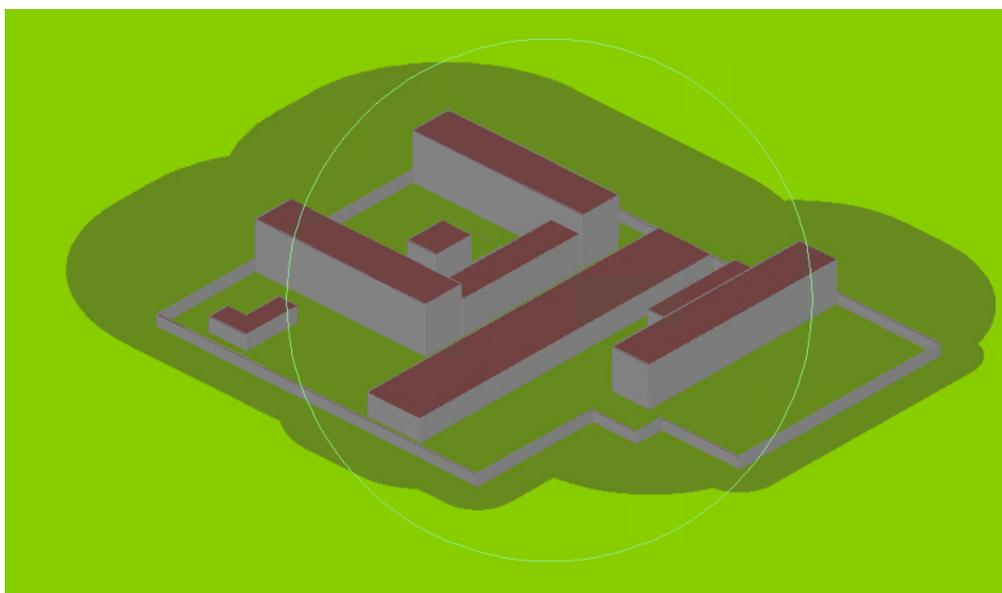
uno scaricatore in ingresso ai trasformatori. L'informazione della presenza degli scaricatori è stata inserita tuttavia inserita nella sezione "impianti" essendo che gli scaricatori sono dei dispositivi che vanno a proteggere i trasformatori che nel nostro caso sono gli "impianti" della stazione. Per questo motivo nella voce "Sistema SPD su linea entrante" è stato selezionato "Sistema SPD assente" che corrisponde ad un valore di  $P_{EB}$  unitario.

La linea AT cavo rappresenta anche questa le 2 linee in cavo in ingresso alla stazione. Vale lo stesso discorso per la lunghezza di quello della linea aerea. I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.5. Per quanto riguarda gli scaricatori, vale lo stesso discorso della linea aerea.

Le linee MT a 22 e 27 kV sono in totale 25. Applicando il fattore riduttivo e considerando una lunghezza di ogni linea pari a 400 metri, la lunghezza della linea MT equivalente è stata presa pari a 7200 metri. I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.7. In questa stazione, come in tutte le altre stazioni site in Torino, gli schermi dei cavi MT sono collegati all'impianto di terra ambo le estremità. Le linee non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata relativamente ai cavi.



**Figura 4.21:** Arrivo linea AT da stazione Terna a stazione SUD-OVEST



**Figura 4.22:** Rappresentazione stazione SUD-OVEST di Torino



**Figura 4.23:** Stazione SUD-OVEST di Torino

Per la linea MT a 7kV è stata invece considerata una lunghezza complessiva di 3000 metri, visto il numero di linee ridotto. I cavi sono schermati. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 4.15.

Materiale	Alluminio
Sezione	16 $mm^2$
Resistenza	1,77 $\Omega/km$

**Tabella 4.15:** Caratteristiche schermi cavi MT (7kV)

Anche questi schermi sono stati considerati collegati all'impianto di terra ad ambo le estremità. Le linee non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata relativamente ai cavi. Per la linea BT si confermano le ipotesi utilizzate nella parte delle ipotesi generali. Gli schermi non vengono considerati collegati all'impianto di terra della stazione. Per quanto riguarda le protezioni, le linee vengono considerate prive di sistemi SPD e con nessun'altra tipologia di protezione relativamente ai cavi.

### **Ipotesi: zone**

Le zone considerate in questa stazione elettrica sono 3: Struttura, Trasformatori e Quadri. Rispetto alle ipotesi generali valide per tutte le stazioni, è necessario aggiungere qualche altra piccola informazione. Come dati di zona è sufficiente aggiungere le informazioni sulla pavimentazione nelle diverse zone e sulle misure antincendio che vengono adottate. Esse sono riassunte, divise per zone, nella tabella 4.16.

**Tabella 4.16:** Informazioni zone Stazione SUD-OVEST di Torino

<b>Z1: Struttura</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]
<b>Z2: Trasformatori</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Nessuna protezione [ $r_p = 1,00$ ]
<b>Z3: Quadri</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]

Sfruttando la suddivisione di cui in 3.10, si riassumono i precisi valori sul valore dell'edificio, del contenuto e degli impianti interni delle zone in tabella 4.17.

**Tabella 4.17:** Suddivisione dei costi stazione SUD-OVEST di Torino

<b>Z1: Struttura</b>	Edificio	$1.40 \times 10^6$ €
	Contenuto	$2.40 \times 10^6$ €
	Impianti	$1.50 \times 10^6$ €
<b>Z2: Trasformatori</b>	Edificio	$3.00 \times 10^5$ €
	Contenuto	$3.00 \times 10^5$ €
	Impianti	$9.00 \times 10^5$ €
<b>Z3: Quadri</b>	Edificio	$3.00 \times 10^5$ €
	Contenuto	$3.00 \times 10^5$ €
	Impianti	$6.00 \times 10^5$ €

Il valore complessivo dell'intera stazione si attesta a 8 milioni di euro.

### **Ipotesi:impianti**

Per essere coerenti con il numero di linee che sono state introdotte nel paragrafo precedente ed essere in linea con quanto detto nel paragrafo 3.4.6, sono stati considerati 5 impianti. Il motivo, come detto in 3.4.6 è che tra un impianto e l'altro cambiano proprio i livelli di tensione e la tipologia di linea che entra in stazione. Gli impianti sono così denominati: Ausiliari, Quadri MT (7kV), Quadri MT, Trasformatori Aerea e Trasformatori cavo.

Per l'impianto degli ausiliari valgono esattamente le ipotesi che sono state formulate nel capitolo precedente e riassunte in 3.14.

Per l'impianto "Trasformatori Aerea" è invece necessario specificare le caratteristiche specifiche di questa stazione. Si riportano direttamente i valori numerici usati per il calcolo tramite foglio excel, senza quindi considerare i valori limitanti che vengono usati nel software Flash. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso al paragrafo 4.18.

**Tabella 4.18:** Valori impianto "Trasformatori Aerea" stazione SUD-OVEST di Torino

$U_w$	650kV
$P_{LI}$	0,00085693
$P_{LD}$	1
$K_{S3}$	1
$K_{S4}$	0,00153846
$P_{SPD}$	0,05

Il valore della tensione di tenuta all'impulso atmosferico è uguale nei due trasformatori ai quali si attestano le linee AT aeree. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$  e  $K_{S4}$ . Il valore di  $P_{LD}$  è unitario perché queste linee non hanno lo schermo. Il trasformatore non può essere considerato schermato in quanto i terminali sono isolati in aria. Segue il valore di  $K_{S3}$  in tabella. Sono presenti gli scaricatori a monte dei trasformatori quindi il valore di  $P_{SPD}$  è pari a 0,05. Questo valore corrisponde ad utilizzare degli scaricatori con un LPL di classe III o IV. Come detto quindi in precedenza, l'informazione dello scaricatore viene aggiunto nella sezione riguardante l'impianto.

Per l'impianto "Trasformatori cavo" i valori che sono stati utilizzati sono riportati nella tabella 4.19.

**Tabella 4.19:** Valori impianto "Trasformatori cavo" stazione SUD-OVEST di Torino

$U_w$	650kV
$P_{LI}$	0,00085693
$P_{LD}$	0,02
$K_{S3}$	1
$K_{S4}$	0,00153846
$P_{SPD}$	0,05

Il valore della tensione di tenuta all'impulso atmosferico è uguale nei due trasformatori. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . Il trasformatore non può essere considerato schermato in quanto i terminali sono isolati in aria. Segue il valore di  $K_{S3}$  in tabella. Sono presenti gli scaricatori a monte dei trasformatori quindi il valore di  $P_{SPD}$  è pari a 0,05. Questo valore corrisponde ad utilizzare degli scaricatori con un LPL di classe III o IV. Come detto quindi in precedenza, l'informazione dello scaricatore viene aggiunto nella sezione riguardante l'impianto.

Per l'impianto "Quadri MT" è necessario implementare alcune informazioni mancanti. Anche in questo caso si riportano direttamente i valori numerici utilizzati nel calcolo finale della valutazione del rischio. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso al paragrafo 4.20.

**Tabella 4.20:** Valori impianto "Quadri MT" stazione SUD-OVEST di Torino

$U_w$	125kV
$P_{LI}$	0,0045
$P_{LD}$	0,1
$K_{S3}$	0,0001
$K_{S4}$	0,008
$P_{SPD}$	1

Il valore della tensione di tenuta è relativo ai quadri di media tensione. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . L'impianto Quadri, come spiegato in precedenza, può essere considerato schermato, segue quindi il valore  $K_{S3}$  in tabella. Non sono inoltre presenti scaricatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

Per l'impianto "Quadri MT (7kV)" i valori utilizzati sono riportati nella tabella 4.21.

**Tabella 4.21:** Valori impianto "Quadri MT (7kV)" stazione SUD-OVEST di Torino

$U_w$	75kV
$P_{LI}$	0,0075
$P_{LD}$	0,1
$K_{S3}$	1
$K_{S4}$	0,01333
$P_{SPD}$	1

Il valore della tensione di tenuta è relativo ai quadri a 7kV. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . L'impianto Quadri MT (7kV) non può essere considerato schermato, segue quindi il valore  $K_{S3}$  in tabella. Questo perché si tratta di quadri in aria, di vecchia concezione. Non sono inoltre presenti scaricatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

### 4.3.2 Modifiche al foglio di calcolo excel

Anche per questa stazione, al fine di validare il foglio di calcolo, sono state apportate delle modifiche nei calcoli. Anche in questo caso, si è notata una leggera discrepanza

tra i risultati ottenuti dal software con quelli del foglio di calcolo. Il motivo è il medesimo della stazione SUD e della stazione ARBARELLO: una errata considerazione degli impianti presenti nelle diverse zone. Infatti, per come era stato impostato il foglio excel, anche se una zona non conteneva un impianto, si otteneva una componente di rischio  $R_x$  relativa a quell'impianto in quella zona non nullo. Come prima, il problema si risolve moltiplicando per zero le componenti di rischio che dovevano essere nulle per via dell'assenza di quell'impianto nella zona. Per semplicità non si riporta l'elenco dettagliato dei parametri che sono stati moltiplicati per zero. Oltre alle modifiche di cui si è parlato sopra, per la stazione SUD-OVEST è stato necessario apportare altri cambiamenti al foglio di calcolo. Il primo è stato conseguenza del fatto che il valore  $P_{TU}$ , cioè il valore relativo alle protezioni dalle tensioni di contatto, non è uguale per tutte le linee. È stato quindi modificato il foglio di calcolo in modo da consentire la scelta differente di questo parametro per ciascuna linea.

L'altro cambiamento è stato necessario per via della presenza degli scaricatori. Osservando attentamente i risultati ottenuti tramite il software Flash, si è notata una formula non coerente con quanto riportato nella norma. Nel calcolo della componente di rischio  $R_U$  per il rischio R1, più nello specifico nel calcolo della probabilità  $P_U$ , la formula che viene usata nel software, e cioè:

$$P_U = P_{LD} \times C_{LD} \times P_{TU} \times P_{SPD}$$

è diversa da quella riportata nella CEI EN 62305-2, e cioè:

$$P_U = P_{LD} \times C_{LD} \times P_{TU} \times P_{EB}$$

Dopo aver consultato il CEI per avere dei chiarimenti in merito all'ambiguità di cui sopra, la scelta che è stata fatta è stata quella di seguire il risultato numerico del software Flash, e questo ha reso necessario la modifica di qualche parametro nel foglio di calcolo excel. Sono stati, per l'occasione, moltiplicati i valori di  $P_U$  di interesse per il valore di  $P_{SPD}$ , in questo caso pari sempre a 0,05.

Tramite queste operazioni è stato quindi possibile validare il foglio di calcolo excel e procedere poi con la modifica dei parametri di tensione di tenuta e quelli connessi a questo.

### 4.3.3 Risultati stazione SUD-OVEST di Torino

Inserendo tutti gli input nel foglio di calcolo e attuando tutte le modifiche del caso, è possibile visualizzare i risultati della valutazione del rischio. Tramite il file excel è possibile visionare tutti i risultati intermedi del calcolo. Per i fini del seguente lavoro si riportano solo i valori finali della valutazione del rischio. Per il rischio **R1** i risultati sono riassunti in tabella 4.22.

**Tabella 4.22:** Risultati rischio R1 stazione SUD-OVEST di Torino

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	$3.03 \times 10^{-8}$	$3.03 \times 10^{-8}$	$3.03 \times 10^{-8}$	$9.10 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>B</sub></b>	$1.52 \times 10^{-9}$	$3.03 \times 10^{-7}$	$1.52 \times 10^{-9}$	$3.06 \times 10^{-7}$
<b>R<sub>C</sub></b>	0.00	$3.03 \times 10^{-6}$	$3.03 \times 10^{-7}$	$3.34 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>M</sub></b>	0.00	$6.86 \times 10^{-11}$	$4.94 \times 10^{-9}$	$5.01 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>U</sub></b>	$8.25 \times 10^{-14}$	$2.21 \times 10^{-11}$	$5.69 \times 10^{-12}$	$2.79 \times 10^{-11}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$4.13 \times 10^{-13}$	$4.53 \times 10^{-9}$	$2.85 \times 10^{-11}$	$4.56 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>W</sub></b>	0.00	$3.05 \times 10^{-9}$	$5.69 \times 10^{-9}$	$8.74 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	0.00	$2.49 \times 10^{-8}$	$2.48 \times 10^{-9}$	$2.74 \times 10^{-8}$
<b>R1</b>	$3.18 \times 10^{-8}$	$3.40 \times 10^{-6}$	$3.48 \times 10^{-7}$	<b><math>3.78 \times 10^{-6}</math></b>

La componente di rischio che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_C$  che fa riferimento al rischio dovuto al fulmine sulla struttura (S1) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti degli impianti interni (D3). Il contributo maggiore è quello della zona "Trasformatori". Quello della zona "Struttura è pari a zero per via del parametro  $L_O$  impostato a zero per questa precisa zona. Comunque, il rischio R1 è molto al di sotto del rischio tollerabile RT. Questo significa che, per quanto riguarda il rischio di perdita di vita umana, la struttura può definirsi protetta.

I risultati del rischio R2 sono riassunti nella tabella 4.23.

Anche qui la componente che percentualmente ha il peso maggiore e la componente  $R_C$ . I contributi sono equamente attribuiti alle tre zone. Anche in questo caso il rischio R2 è al di sotto del rischio tollerabile. La struttura risulta quindi protetta.

I risultati del rischio R4 sono riassunti nella tabella 4.24.

Qui la componente che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_B$ , cioè la componente di rischio dovuto al fulmine sulla struttura (S1) e in particolar modo la componente relativa al danno materiale (D2). Il contributo maggiore è quello della zona trasformatori. Segue poi la componente  $R_C$  che ha un peso non indifferente all'interno del rischio R4. Questo non deve essere confrontato con

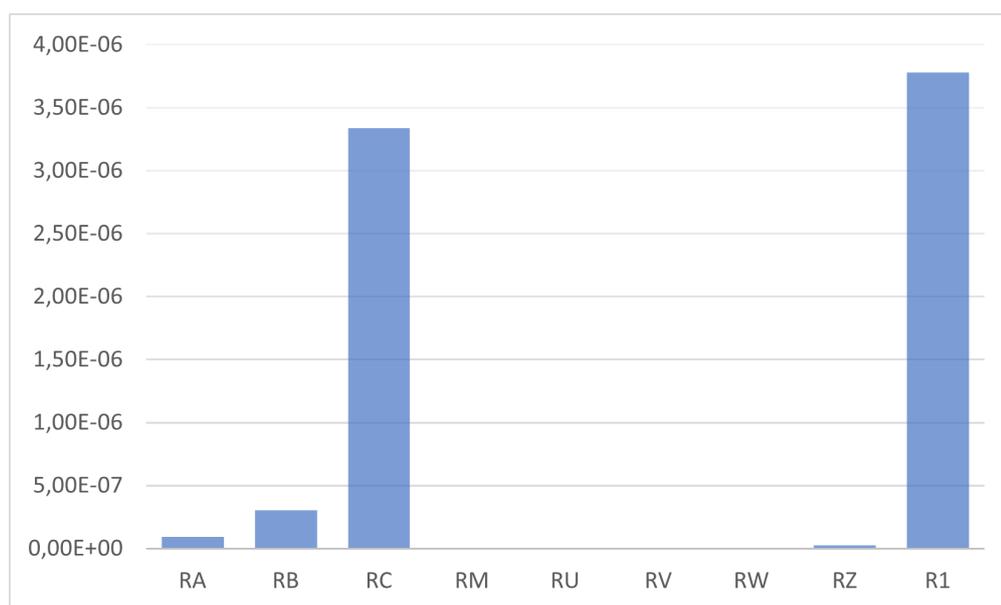
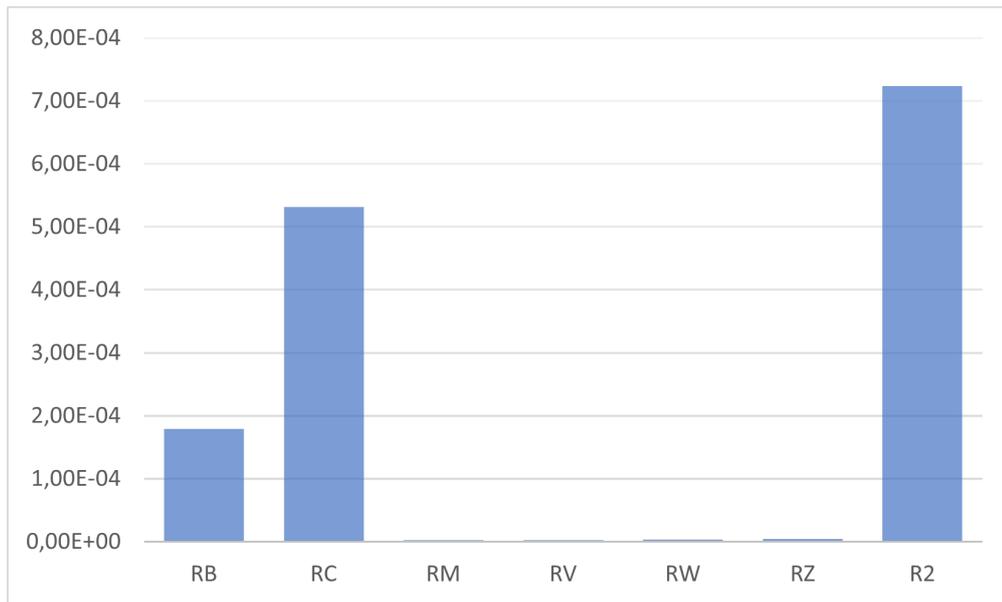


Figura 4.24: Componenti rischio R1 stazione SUD-OVEST di Torino

Tabella 4.23: Risultati rischio R2 stazione SUD-OVEST di Torino

	Z1: Struttura	Z2: Trasformatori	Z3: Quadri	TOT
<b>R<sub>B</sub></b>	$8.86 \times 10^{-7}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$8.86 \times 10^{-7}$	$1.79 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$1.77 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$5.31 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$1.62 \times 10^{-10}$	$4.01 \times 10^{-9}$	$2.89 \times 10^{-6}$	$2.89 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$2.41 \times 10^{-10}$	$2.64 \times 10^{-6}$	$1.66 \times 10^{-8}$	$2.66 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$4.82 \times 10^{-8}$	$1.78 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-6}$	$3.55 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$1.45 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-6}$	$4.35 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>2</sub></b>	$1.80 \times 10^{-4}$	$3.59 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^{-4}$	<b><math>7.24 \times 10^{-4}</math></b>

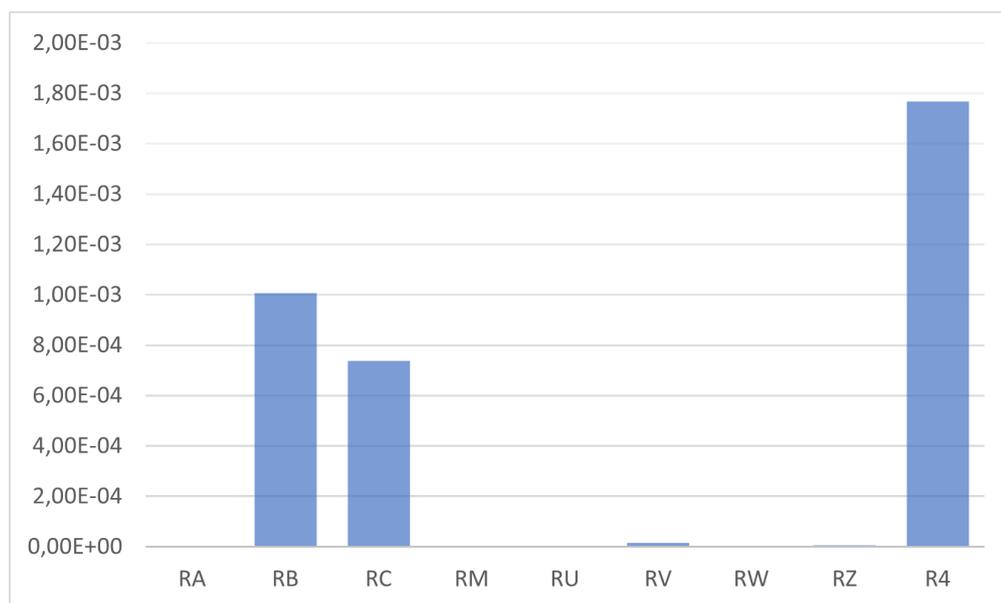
nessun rischio tollerabile definito dalla norma. Per il rischio R4 infatti, la CEI EN 62305 non definisce la protezione obbligatoria. È compito del committente, in questo caso IRETI, interpretare il valore numerico del rischio e valutare se è conveniente o meno installare delle protezioni contro il fulmine. Si conclude che la



**Figura 4.25:** Componenti rischio R2 stazione SUD-OVEST di Torino

**Tabella 4.24:** Risultati rischio R4 stazione SUD-OVEST di Torino

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>B</sub></b>	$8.80 \times 10^{-6}$	$9.96 \times 10^{-4}$	$1.99 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-3}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$9.96 \times 10^{-5}$	$5.98 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-5}$	$7.37 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$9.13 \times 10^{-11}$	$1.35 \times 10^{-8}$	$6.50 \times 10^{-7}$	$6.63 \times 10^{-7}$
<b>R<sub>U</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>V</sub></b>	$2.39 \times 10^{-9}$	$1.49 \times 10^{-5}$	$3.74 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$2.71 \times 10^{-8}$	$6.01 \times 10^{-7}$	$7.48 \times 10^{-7}$	$1.38 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$8.13 \times 10^{-7}$	$4.92 \times 10^{-6}$	$3.25 \times 10^{-7}$	$6.06 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>4</sub></b>	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-3}$	$4.36 \times 10^{-5}$	<b><math>1.77 \times 10^{-3}</math></b>



**Figura 4.26:** Componenti rischio R4 stazione SUD-OVEST di Torino

stazione SUD-OVEST di Torino è una **STRUTTURA PROTETTA** contro il fulmine.

## 4.4 Stazione SPIP di Parma

La stazione SPIP di Parma è situata lungo Strada della Lupa. La stazione è situata all'interno della zona industriale di Parma, lontano dalla zona abitata della città. Dal punto di vista elettrico, la stazione si sviluppa all'aperto. L'arrivo AT è in cavo interrato, poi sono presenti i classici elementi di uno stallo di una stazione. Particolarità di questa stazione è la presenza di moduli ibridi in SF<sub>6</sub>, che condensano in poco spazio trasformatori di misura, interruttore e sezionatori. Seguono poi gli scaricatori e i trasformatori di potenza. In totale la stazione ha tre trasformatori di potenza, rosso verde e bianco. Due di questi (rosso e verde) sono quelli che alimentano i rispettivi quadri MT della stazione. Quello più piccolo (bianco) serve invece a collegare un impianto di cogenerazione con la rete (arrivo a 15kV dal termovalorizzatore). L'asfalto e terra prevalgono come pavimentazione dello stallo. Oltre al piazzale, in cui sono presenti gli elementi elettrici appena descritti e i TFN, all'interno del recinto è presente un prefabbricato in cemento armato. Al suo interno sono presenti alcune sale: la sala relè con le apparecchiature per il funzionamento della stazione, una sala contenente il trasformatore degli ausiliari ed infine la sala contenente i quadri MT. All'interno dell'edificio il pavimento è flottante in materiale plastico con alcune zone piastrellate (locale quadri). Nel seminterrato dell'edificio è presente il locale adibito al passaggio dei cavi. Il pavimento è in cemento e sono presenti delle pompe per il drenaggio dell'acqua nel caso in cui questa si accumulasse. All'interno dell'edificio e del piazzale sono presenti estintori per lo spegnimento di incendi. Tutto attorno al perimetro della stazione sono piantati alberi di altezza modesta. Nessun elemento di altezza rilevante è presente nelle zone adiacenti alla stazione SPIP.

Nel seguente lavoro di tesi, solo la stazione SPIP è stata esaminata ai fini della valutazione del rischio tra le stazioni di Parma. Il motivo è che tutte le stazioni di Parma hanno più o meno le stesse caratteristiche costruttive: stallo all'aperto con edificio prefabbricato che ospita i quadri. Piuttosto che eseguire la valutazione del rischio a tutte le stazioni si è preferito attuare il calcolo solo per la stazione SPIP. Questo perché la stazione SPIP, tra tutte, è quella che sembra essere la più critica, sia come posizionamento geografico, sia come quantità di linee da considerare.

### 4.4.1 Caratteristiche stazione SPIP di Parma

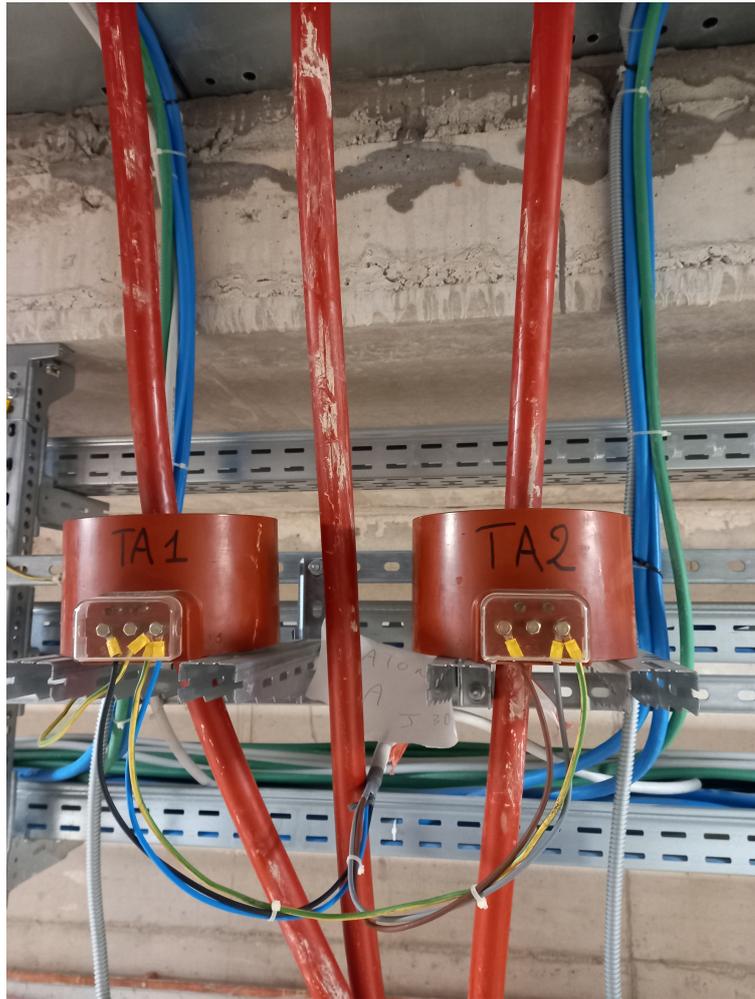
Dopo aver descritto gli elementi principali della stazione elettrica SPIP, si presentano in questo paragrafo le ipotesi specifiche che sono state utilizzate oltre quelle generali che sono state precedentemente discusse. Queste verranno presentate nello stesso ordine delle ipotesi generali.



**Figura 4.27:** Quadro MT stazione SPIP

### **Ipotesi: struttura**

La stazione si trova in una zona industriale, al di fuori della parte abitata della città di Parma. La zona attorno alla quale si trova la stazione è abbastanza povera di edifici, soprattutto alti. Il coefficiente di posizione scelto per la struttura è stato  $C_D = 1,00$  inerente ad una struttura isolata. È stato recuperato il dato inerente il valore di densità di fulmini a terra  $N_g$  dalla banca dati di TuttoNormel. In quella posizione geografica il valore di  $N_g$  è pari a 2,68. L'edificio non presenta nessun sistema LPS. Grazie al tool grafico del software Flash, è stato possibile disegnare la stazione e calcolare in maniera automatica i valori delle aree di raccolta. Si riporta comunque in figura 4.31 la struttura, disegnata tramite il software e in figura 4.32 l'immagine dal satellite.



**Figura 4.28:** Cavi MT con TA stazione SPIP

In verde più scuro è rappresentata l'area di raccolta dei fulmini sulla struttura  $A_D$ , mentre in verde più chiaro si rappresenta l'area di raccolta dei fulmini in prossimità della struttura  $A_M$ . Quest'ultima è molto estesa, infatti non è interamente rappresentata nella figura. Così come chiarito nelle ipotesi generali, gli elementi dello stallo vengono considerati come "struttura" sulla quale può colpire il fulmine. Questo spiega l'immagine 4.31 che oltre a rappresentare gli edifici veri e propri all'interno della stazione, schematizza anche lo stallo all'aperto e gli altri componenti elettrici come fossero un edificio.



**Figura 4.29:** Modulo ibrido stazione SPIP

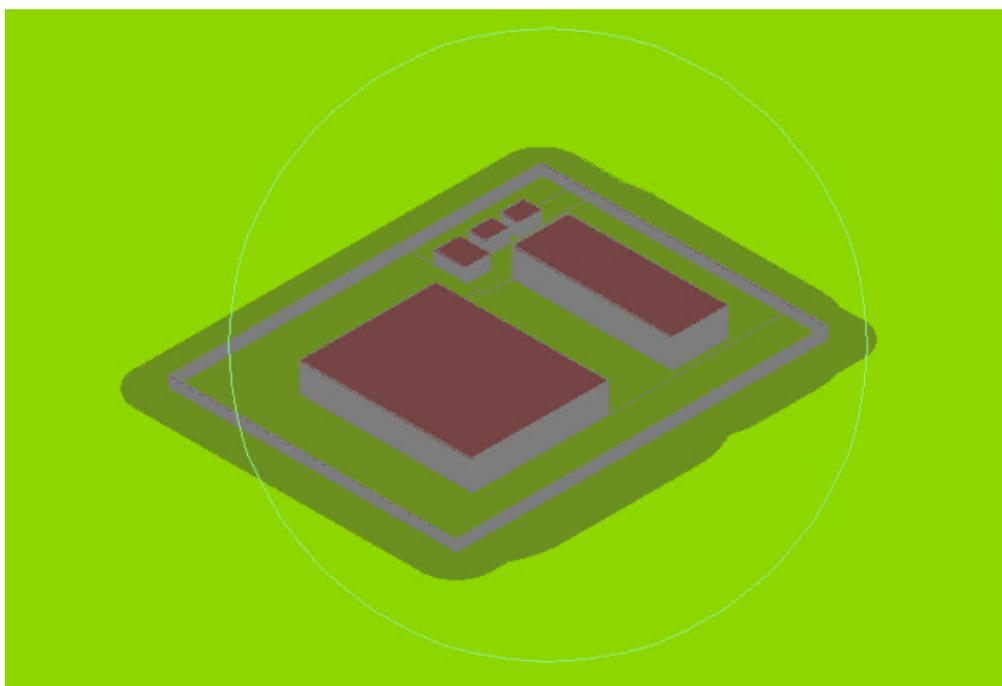
**Ipotesi: linee**

Così come detto nel capitolo precedente, le linee considerate in questa stazione elettrica sono 3: linea AT, linea MT e linea BT. Le linee sono all'interno di un



**Figura 4.30:** Arrivo cavi AT stazione SPIP

contesto suburbano con attorno pochi edifici e soprattutto poco alti. Il coefficiente di posizione scelto per tutte le linee è per questo motivo  $C_E = 0,50$ . In totale ci sono due ingressi in cavo AT. La lunghezza totale della linea nel software Flash



**Figura 4.31:** Rappresentazione stazione SPIP di Parma



**Figura 4.32:** Stazione SPIP di Parma

è infatti 2000 metri (vedi 3.4.6). I cavi sono schermati, con schermo connesso all'impianto di terra. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.5. Su queste linee è presente uno scaricatore in ingresso ai trasformatori. L'informazione della presenza degli scaricatori è stata tuttavia inserita nella sezione "impianti" essendo che gli scaricatori sono dei dispositivi che vanno a proteggere i trasformatori che nel nostro caso sono gli "impianti" della stazione. Per questo motivo nella voce "Sistema SPD su linea entrante" è stato selezionato "Sistema SPD assente" che corrisponde ad un valore di  $P_{EB}$  unitario.

Le linee MT considerate per la stazione sono state in totale 22. Applicando il fattore riduttivo di cui parlato precedentemente e considerando una lunghezza di ogni linea pari a 400 metri, la lunghezza della linea MT equivalente è stata presa pari a 6400 metri. I cavi sono schermati, ma lo schermo non è connesso alla maglia di terra della stazione. Le informazioni sullo schermo sono quelle riportate nella tabella 3.7. Le linee non presentano scaricatori in ingresso alla stazione e nessun'altra tipologia di protezione viene considerata relativamente ai cavi.

Per la linea BT si confermano le ipotesi utilizzate nella parte delle ipotesi generali. I cavi non presentano lo schermo, segue quindi che non possono essere collegati all'impianto di terra della cabina. Per quanto riguarda le protezioni, le linee vengono considerate prive di sistemi SPD e con nessun'altra tipologia di protezione relativamente ai cavi.

### Ipotesi: zone

Così come detto nel capitolo precedente, le zone considerate in questa stazione elettrica sono 3: Struttura, Trasformatori e Quadri. Rispetto alle ipotesi generali valide per tutte le stazioni, è necessario aggiungere qualche altra piccola informazione. Come dati di zona è sufficiente aggiungere le informazioni sulla pavimentazione nelle diverse zone e sulle misure antincendio che vengono adottate. Sono riassunte, divise per zone, nella tabella 4.25.

**Tabella 4.25:** Informazioni zone Stazione SPIP di Parma

<b>Z1: Struttura</b>	Pavimentazione	Agricolo [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]
<b>Z2: Trasformatori</b>	Pavimentazione	Cemento [ $r_t = 0,01$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]
<b>Z3: Quadri</b>	Pavimentazione	Ceramica [ $r_t = 0,001$ ]
	Antincendio	Protezioni manuali [ $r_p = 0,5$ ]

Mancano anche le informazioni sul valore dell'edificio, del contenuto e degli impianti interni delle zone. Sfruttando la suddivisione di cui in 3.10, si riassumono i precisi valori di costi in tabella 4.26.

**Tabella 4.26:** Suddivisione dei costi stazione SPIP di Parma

<b>Z1: Struttura</b>	Edificio	$3.50 \times 10^5 \text{ €}$
	Contenuto	$1.00 \times 10^6 \text{ €}$
	Impianti	$6.25 \times 10^5 \text{ €}$
<b>Z2: Trasformatori</b>	Edificio	$7.50 \times 10^4 \text{ €}$
	Contenuto	$1.25 \times 10^5 \text{ €}$
	Impianti	$3.75 \times 10^5 \text{ €}$
<b>Z3: Quadri</b>	Edificio	$7.50 \times 10^4 \text{ €}$
	Contenuto	$1.25 \times 10^5 \text{ €}$
	Impianti	$2.50 \times 10^5 \text{ €}$

Il valore complessivo dell'intera stazione si attesta a 3 milioni di euro.

### Ipotesi: impianti

Così come detto nel capitolo precedente, gli impianti considerati in questa stazione elettrica sono 3: Ausiliari, Quadri MT e Trasformatori. Per l'impianto degli ausiliari valgono esattamente le ipotesi che sono state formulate nel capitolo precedente e riassunte in 3.14. L'unica differenza che si ha è nel valore  $K_{S3}$ . Questo valore è pari a 0,2 nel caso di Parma poiché qui non si considera schermato l'impianto BT. Per l'impianto Trasformatori è invece necessario specificare le caratteristiche specifiche di questa stazione. Si riportano direttamente i valori numerici usati per il calcolo tramite foglio excel, senza quindi considerare i valori limitanti che vengono usati software Flash. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso nel paragrafo 4.27.

**Tabella 4.27:** Valori impianto Trasformatori stazione SPIP di Parma

$U_w$	550kV
$P_{LI}$	0,001
$P_{LD}$	0,00073137
$K_{S3}$	1
$K_{S4}$	0,00181818
$P_{SPD}$	0,05

Il valore della tensione di tenuta all'impulso atmosferico è uguale per i tre trasformatori. Da quel parametro si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$ ,  $P_{LD}$  e  $K_{S4}$ . Il trasformatore non può essere considerato schermato in quanto i terminali sono isolati in aria. Segue il valore di  $K_{S3}$  in tabella. Sono presenti gli scaricatori a monte dei trasformatori quindi il valore di  $P_{SPD}$  è pari a 0,05. Questo valore

corrisponde ad utilizzare degli scaricatori con un LPL di classe III o IV. Come detto quindi in precedenza, l'informazione dello scaricatore viene aggiunto nella sezione riguardante l'impianto.

Per l'impianto Quadri MT è necessario implementare alcune informazioni mancanti. Anche in questo caso si riportano direttamente i valori numerici utilizzati nel calcolo finale della valutazione del rischio. Tutti i valori che verranno di seguito riportati sono frutto delle analisi di cui precedentemente discusso nel paragrafo 4.28.

**Tabella 4.28:** Valori impianto Quadri stazione SPIP di Parma

$U_w$	50kV
$P_{LI}$	0,0112
$P_{LD}$	1
$K_{S3}$	0,0001
$K_{S4}$	0,02
$P_{SPD}$	1

Il valore della tensione di tenuta è relativo ai quadri di media, ed in particolar modo all'informazione sulla tensione di tenuta all'impulso atmosferico degli interruttori di media tensione. Di conseguenza si ottengono gli altri valori  $P_{LI}$  e  $K_{S4}$ . Il valore di  $P_{LD}$  è unitario perché le linee che alimentano l'impianto non hanno gli schermi collegati alla maglia di terra. L'impianto Quadri, come spiegato in precedenza, può essere considerato schermato, segue quindi il valore  $K_{S3}$  in tabella. Non sono inoltre presenti scaricatori, quindi il valore di  $P_{SPD}$  è unitario.

#### 4.4.2 Modifiche al foglio di calcolo excel

Anche per questa stazione, al fine di validare il foglio di calcolo, sono state apportate delle modifiche nei calcoli. Anche in questo caso, si è notata una leggera discrepanza tra i risultati ottenuti dal software con quelli del foglio di calcolo. Il motivo è il medesimo delle stazioni precedenti: una errata considerazione degli impianti presenti nelle diverse zone. Infatti, per come era stato impostato il foglio excel, anche se una zona non conteneva un impianto, si otteneva una componente di rischio  $R_x$  relativa a quell'impianto in quella zona non nullo. Come prima, il problema si risolve moltiplicando per zero le componenti di rischio che dovevano essere nulle per via dell'assenza di quell'impianto nella zona. Per semplicità non si riporta l'elenco dettagliato dei parametri che sono stati moltiplicati per zero. Oltre alle modifiche di cui si è parlato sopra, per la stazione SPIP è stato necessario apportare un altro cambiamento al foglio di calcolo, per lo stesso problema che si è presentato nella

stazione SUD-OVEST, cioè per via della presenza degli scaricatori. Osservando attentamente i risultati ottenuti tramite il software Flash, si è notata una formula non coerente con quanto riportato nella norma. Nel calcolo della componente di rischio  $R_U$  per il rischio R1, più nello specifico nel calcolo della probabilità  $P_U$ , la formula che viene usata nel software, e cioè:

$$P_U = P_{LD} \times C_{LD} \times P_{TU} \times P_{SPD}$$

è diversa da quella riportata nella CEI EN 62305-2, e cioè:

$$P_U = P_{LD} \times C_{LD} \times P_{TU} \times P_{EB}$$

Dopo aver consultato il CEI per avere dei chiarimenti in merito all'ambiguità di cui sopra, la scelta che è stata fatta è stata quella di prendere come riferimento il risultato numerico del software Flash, e questo ha reso necessario la modifica di qualche parametro nel foglio di calcolo excel. Sono stati, per l'occasione, moltiplicati i valori di  $P_U$  di interesse per il valore di  $P_{SPD}$ , in questo caso pari sempre a 0,05. Tramite queste operazioni è stato quindi possibile validare il foglio di calcolo excel e procedere poi con la modifica dei parametri di tensione di tenuta e quelli connessi a questo.

#### 4.4.3 Risultati stazione SPIP di Parma

Inserendo tutti gli input nel foglio di calcolo e attuando tutte le modifiche del caso, è possibile visualizzare i risultati della valutazione del rischio. Tramite il file excel è possibile visionare tutti i risultati intermedi del calcolo. Per i fini del seguente lavoro si riportano solo i valori finali della valutazione del rischio. Per il rischio **R1** i risultati sono riassunti in tabella 4.29.

La componente di rischio che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_M$  che fa riferimento al rischio dovuto al fulmine in prossimità della struttura (S2) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti negli impianti interni (D3). Il contributo maggiore è quello della zona "Trasformatori". Quello della zona "Struttura è pari a zero per via del parametro  $L_O$  impostato a zero per questa precisa zona. Segue poi la componente  $R_Z$  che costituisce circa il 25% del valore totale del rischio calcolato. Questa fa riferimento al rischio dovuto a fulmini in prossimità di una linea connessa alla struttura (S4) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti negli impianti interni (D3). A differenza delle altre stazioni, qui il rischio **R1** è leggermente al di sopra del rischio tollerabile. Si è calcolato un rischio **R1** =  $1.15 \times 10^{-5}$  contro **RT** =  $1 \times 10^{-5}$  di rischio tollerabile. Questo potrebbe non rappresentare un grosso problema. Al fine di limitare il rischio infatti, oltre a prevedere l'uso di sistemi di protezione contro il fulmine, è possibile ridurre il rischio, ed addirittura annullarlo, predisponendo dei divieti

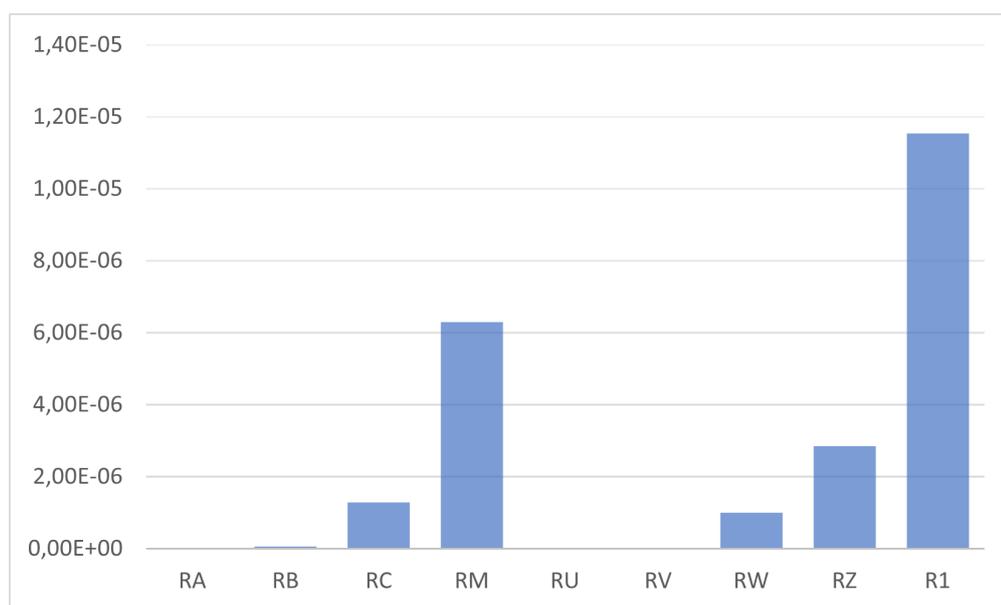
**Tabella 4.29:** Risultati rischio R1 stazione SPIP di Parma

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	$1.18 \times 10^{-8}$	$1.18 \times 10^{-8}$	$1.18 \times 10^{-9}$	$2.47 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>B</sub></b>	$5.88 \times 10^{-10}$	$5.88 \times 10^{-8}$	$5.88 \times 10^{-10}$	$6.00 \times 10^{-8}$
<b>R<sub>C</sub></b>	0.00	$1.18 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-7}$	$1.29 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>M</sub></b>	0.00	$5.72 \times 10^{-6}$	$5.72 \times 10^{-7}$	$6.30 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>U</sub></b>	$2.29 \times 10^{-12}$	$2.31 \times 10^{-12}$	$9.81 \times 10^{-11}$	$1.03 \times 10^{-10}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$1.15 \times 10^{-11}$	$1.26 \times 10^{-9}$	$4.91 \times 10^{-9}$	$6.18 \times 10^{-9}$
<b>R<sub>W</sub></b>	0.00	$2.31 \times 10^{-8}$	$9.81 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	0.00	$2.29 \times 10^{-6}$	$5.58 \times 10^{-7}$	$2.85 \times 10^{-6}$
<b>R1</b>	$1.24 \times 10^{-8}$	$9.29 \times 10^{-6}$	$2.24 \times 10^{-6}$	<b><math>1.15 \times 10^{-5}</math></b>

di intervento nelle stazioni elettriche in caso di forti temporali. La riduzione del personale nelle stazioni, soprattutto all'esterno e nelle zone più a rischio, porta infatti ad un abbassamento del valore del rischio molto considerevole.

I risultati del rischio R2 sono riassunti nella tabella 4.30.

Anche qui la componente di rischio che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_M$  che fa riferimento al rischio dovuto al fulmine in prossimità della struttura (S2) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti negli impianti interni (D3). Circa il 41% del rischio  $R2$  è infatti relativo alla componente  $R_M$ . Le tre zone partecipano equamente alla seguente componente. Seguono poi le componenti  $R_Z$  e  $R_W$  che costituiscono circa il 24% l'uno del valore totale del rischio calcolato. Queste fanno rispettivamente riferimento al rischio dovuto a fulmini in prossimità di una linea connessa alla struttura (S4) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti negli impianti interni (D3), e al rischio dovuto a fulmini su una linea connessa alla struttura (S3) e in particolar modo alla componente relativa ai guasti negli impianti interni (D3). A differenza delle altre stazioni, qui il rischio **R2** è al di sopra del rischio tollerabile. Si è calcolato un rischio **R2**=  $2.42 \times 10^{-3}$  contro **RT**=  $1 \times 10^{-3}$  di rischio tollerabile. La protezione è quindi necessaria. Si ricorda che questo lavoro è comunque frutto di ipotesi che sono state ragionate sulla base della norma CEI EN 62305 e sulla base del poco



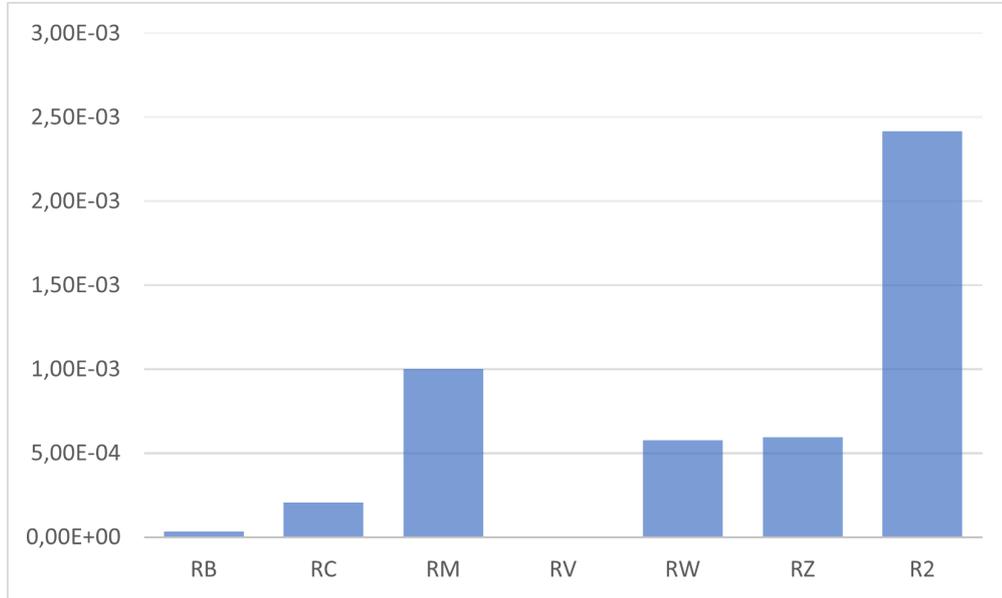
**Figura 4.33:** Componenti rischio R1 stazione SPIP di Parma

**Tabella 4.30:** Risultati rischio R2 stazione SPIP di Parma

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>B</sub></b>	$3.43 \times 10^{-7}$	$3.43 \times 10^{-5}$	$3.43 \times 10^{-7}$	$3.50 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$6.87 \times 10^{-5}$	$6.87 \times 10^{-5}$	$6.87 \times 10^{-5}$	$2.06 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$3.34 \times 10^{-4}$	$3.34 \times 10^{-4}$	$3.34 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-3}$
<b>R<sub>V</sub></b>	$6.70 \times 10^{-9}$	$7.35 \times 10^{-7}$	$2.87 \times 10^{-6}$	$3.61 \times 10^{-6}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$1.34 \times 10^{-6}$	$1.35 \times 10^{-6}$	$5.73 \times 10^{-4}$	$5.76 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$1.34 \times 10^{-4}$	$1.34 \times 10^{-4}$	$3.26 \times 10^{-4}$	$5.94 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>2</sub></b>	$5.39 \times 10^{-4}$	$5.73 \times 10^{-4}$	$1.31 \times 10^{-3}$	<b><math>2.42 \times 10^{-3}</math></b>

materiale scientifico trovato sull'argomento complicato della valutazione del rischio su stazioni elettriche. Questo significa che, secondo il seguente lavoro di tesi, la stazione SPIP di Parma non risulta essere autoprotetta contro il fulmine se si fa riferimento al rischio di perdita di servizio pubblico (R2). Non è comunque detto

che la protezione sia effettivamente necessaria, proprio perché questo lavoro di tesi non utilizza solo le nozioni della norma CEI EN 62305, ma sfrutta anche delle ipotesi maturate da ricerche scientifiche, che non sono validate dal CEI.



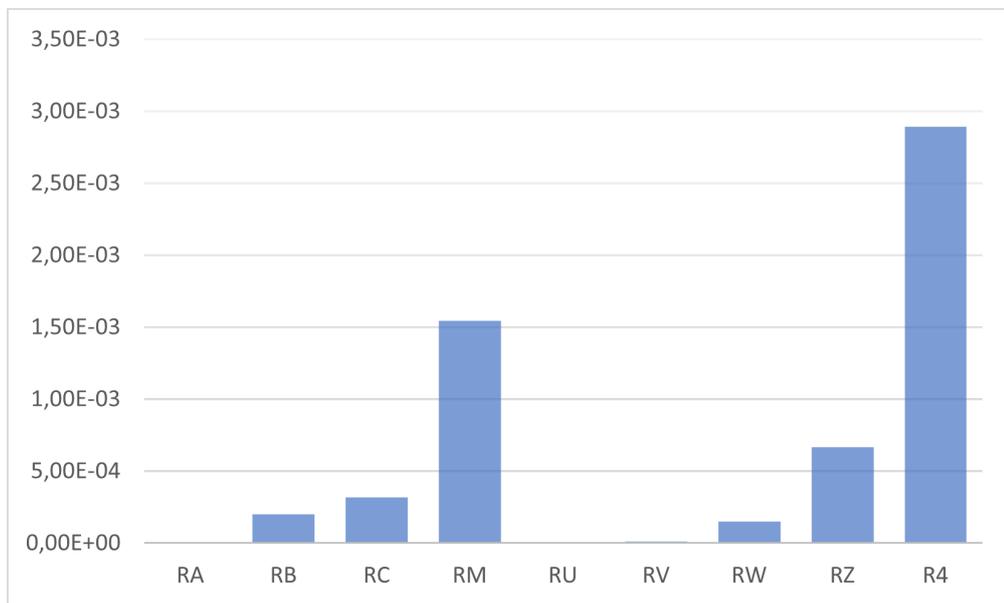
**Figura 4.34:** Componenti rischio R2 stazione SPIP di Parma

I risultati del rischio R4 sono riassunti nella tabella 4.31.

Anche qui la componente che percentualmente ha il peso maggiore è la componente  $R_M$ . Il contributo maggiore è quello della zona trasformatori. Segue poi la componente  $R_Z$  che ha anch'essa un peso non indifferente all'interno del rischio R4. Il valore del rischio R4 non deve essere confrontato con nessun rischio tollerabile definito dalla norma. Per il rischio R4 infatti, la CEI EN 62305 non definisce la protezione obbligatoria. È compito del committente, in questo caso IRETI, interpretare il valore numerico del rischio e valutare se è conveniente o meno installare delle protezioni contro il fulmine. Si conclude che la stazione SPIP di Parma risulta essere una **STRUTTURA NON PROTETTA** contro il fulmine.

**Tabella 4.31:** Risultati rischio R4 stazione SPIP di Parma

	<b>Z1: Struttura</b>	<b>Z2: Trasformatori</b>	<b>Z3: Quadri</b>	<b>TOT</b>
<b>R<sub>A</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>B</sub></b>	$3.39 \times 10^{-6}$	$1.97 \times 10^{-4}$	$7.73 \times 10^{-7}$	$2.02 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>C</sub></b>	$4.29 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>M</sub></b>	$2.09 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$8.36 \times 10^{-5}$	$1.55 \times 10^{-3}$
<b>R<sub>U</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>R<sub>V</sub></b>	$6.62 \times 10^{-8}$	$4.23 \times 10^{-6}$	$6.45 \times 10^{-6}$	$1.07 \times 10^{-5}$
<b>R<sub>W</sub></b>	$8.38 \times 10^{-7}$	$5.05 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.49 \times 10^{-4}$
<b>R<sub>Z</sub></b>	$8.38 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-4}$	$8.15 \times 10^{-5}$	$6.68 \times 10^{-4}$
<b>R4</b>	$3.40 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-3}$	$3.33 \times 10^{-4}$	<b><math>2.89 \times 10^{-3}</math></b>



**Figura 4.35:** Componenti rischio R4 stazione SPIP di Parma

## 4.5 Considerazioni finali

Il lavoro di tesi ha avuto un duplice obiettivo: valutare l'applicabilità della norma CEI-EN 62305 alle stazioni elettriche e valutare il rischio legato al fulmine per quattro stazioni proprietà di Ireti.

Dal punto di vista dell'applicabilità si può concludere che la norma CEI EN 62305 non è propriamente indicata per valutare il rischio di fulminazione sulle stazioni di trasformazione AT/MT. Il problema principale del calcolo del rischio applicato alle stazioni elettriche è proprio una mancanza di linee guida per l'impostazione del calcolo. La norma è infatti pensata per applicazioni ad edifici con impianti elettrici in bassa tensione. Questo rende complicata l'applicazione della stessa alle stazioni. Di conseguenza, anche il software Flash contiene una serie di parametri privi di senso se applicati al caso della stazione elettrica. Alcuni di questi sono stati corretti e adeguati al caso in esame, modificandoli rispetto a quelli proposti dalla norma, mentre per altri sono state fatte delle ipotesi più o meno impattanti, rivalutando anche le definizioni di "struttura", "linea" ed "impianto" della CEI EN 62305. Le correzioni dei parametri sono state valutate attraverso analisi numeriche ed analisi di sensitività per valutarne l'effettiva importanza, mentre le ipotesi utilizzate sono state formulate prendendo spunto dalla norma e dai pochi articoli scientifici che trattano l'argomento. Essendo però delle ipotesi, nonostante esse siano state formulate a partire da un ragionamento critico, i calcoli derivanti potrebbero non essere molto affidabili, e potrebbero non rappresentare l'effettivo rischio che deriva dal fulmine. Tra gli altri obiettivi, l'elaborato esorta quindi il CEI a prendere spunto dalle ipotesi formulate nella tesi ed aggiornare la norma ed il software Flash, in modo tale da avere la possibilità di applicare con facilità la norma CEI EN 62305 anche ai casi più complicati come quello delle stazioni di trasformazioni AT/MT. Eseguendo i calcoli con quanto riportato precedentemente, si può concludere che tra le quattro stazioni oggetto dello studio solo la stazione SPIP di Parma risulta essere critica. Le stazioni site in Torino (SUD, SUD-OVEST, ARBARELLO) hanno un valore di rischio che risulta essere abbondantemente al di sotto del valore tollerabile. Questo per via della loro posizione all'interno di un contesto prettamente urbano. Per la stazione SPIP di Parma i valori calcolati risultano superiori a quelli tollerabili presenti nella norma CEI EN 62305. Al fine di rendere la struttura protetta, Ireti ha il compito di valutare le protezioni contro il fulmine da mettere in campo per la riduzione del rischio a valori accettabili.

# Bibliografia

- [1] Met Office. *10 striking facts about lightning*. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/thunder-and-lightning/facts-about-lightning> (cit. a p. 1).
- [2] Z. Kasza e K. Kovacs. «Risk Analysis About Lightning Protection for Buildings Focusing on Risk of Loss of Human Life». In: The 12th International Conference Interdisciplinary in Engineering (2019), pp. 458–465 (cit. a p. 1).
- [3] V. Carrescia e G. Lo Piparo. *ElettroQuesiti 3: Fulmini e Parafulmini 2a edizione*. 1996 (cit. alle pp. 3, 4).
- [4] C. L. Siow C. S. Ong e E. E. Ngu. «Lightning Risk Assessment on Outdoor HV Substations Based on IEC 62305-2: A Case Study». In: 2021 IEEE 19th Student Conference on Research and Development (SCOReD) (2021), pp. 218–223 (cit. alle pp. 5, 22, 23, 32–34, 36).
- [5] H. Abulaban e C. L. Siow. «Recent Progress on Lightning Risk Assessment and its Applications in Malaysia». In: International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.) Vol.16 (2021) (cit. a p. 5).
- [6] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 1: Principi generali*. Rapp. tecn. 2013 (cit. alle pp. 5, 6).
- [7] Riadh W. Y. Habash e Voicu Groza. «Lightning Risk Assessment of Power Systems». In: IEEE Electrical Power & Energy Conference (2010) (cit. a p. 5).
- [8] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 2: Valutazione del rischio*. Rapp. tecn. 2013 (cit. a p. 6).
- [9] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone*. Rapp. tecn. 2013 (cit. a p. 6).
- [10] Norma CEI EN 62305. *Protezione contro i fulmini Parte 4: Impianto elettrici ed elettronici*. Rapp. tecn. 2013 (cit. a p. 6).
- [11] O. Chang Shen S. Chun Lim e N. Eng Eng. «An Integrated Lightning Risk Assessment of Outdoor Air-Insulated HV Substations». In: *Energies*, vol 15 (2022) (cit. a p. 22).

- [12] L. Arevalo J. Hernandez-Guiteras e H.Hammarsten. «Applicability of the risk assessment in International Standards to HVDC converter stations». In: 34th International Conference on Lightning Protection (2018) (cit. a p. 22).
- [13] C. K. Huat A. K. K. Hing L. K. Ten H. L. Cheun e S. Chia. «A Comprehensive Reliability and Sensitivity Analysis of MS IEC 62305-2: 2007 Lightning Risk Assessment Compliant Software». In: 12th Asia-Pacific Conference on Lightning (2023) (cit. a p. 22).
- [14] O. A. Hashem Mohamed S. Chun Lim e C.Gomes. «Sensitivity Analysis of the Parameters for Lightning Risk Assessment». In: 36th International Conference on Lighyning Protection (2022) (cit. a p. 22).
- [15] Oleg Y. Glebov, Denys G. Koliushko, Svitlana V. Kiprych e Serhii S. Rudenko. «The Problem of Determining the Level of Lightning Protection for Electrical Substations by the Risk Assessment Method». In: IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (2022) (cit. a p. 22).
- [16] Certifico Srl. *Potere calorifico materiali*. URL: <https://www.certifico.com/component/attachments/download/25673> (cit. a p. 41).
- [17] Google Earth. URL: <https://www.google.it/earth/> (cit. a p. 62).