

**Protezione contro i fulmini:
dalla stregoneria all'ingegneria**

Collegio dei Periti Industriali
e dei Periti Industriali Laureati
delle Province di Bari - B.A.T.

Il fenomeno della scarica atmosferica: aspetti scientifici e normativi

Prof. Ing. Carlo Alberto Nucci

Università di Bologna - Presidente del CT 81 del CEI

15 dicembre 2017

Aula Magna "E. Orabona" - Politecnico di Bari - Via Edoardo Orabona, 4 - Bari

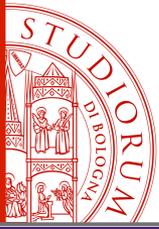
Fenomenologia della fulminazione



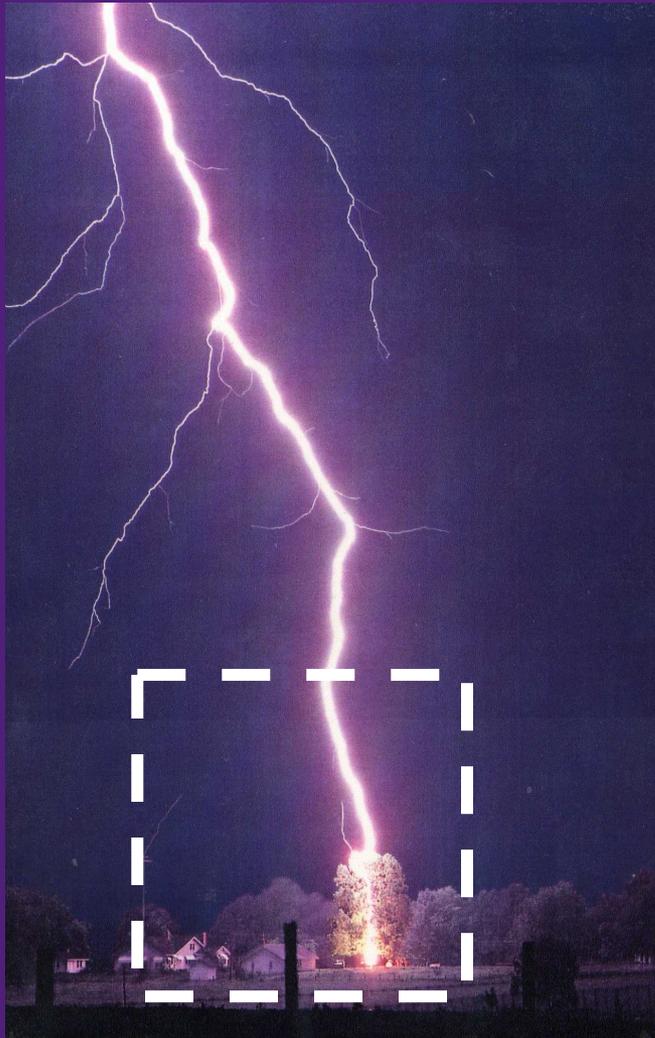
E' la conseguenza dell'accumulo progressivo di cariche nelle nubi temporalesche note col nome di nembo-cumuli

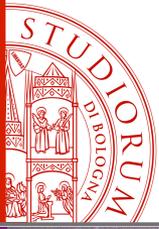
Il fulmine è una scarica elettrica lunga alcuni chilometri associata ad un impulso transitorio di corrente avente grande ampiezza





Fenomenologia della fulminazione





Fenomenologia della fulminazione



St Michael's Cemetery, Toronto
Leon Konigsthal, Jr. Summer 1990

Ma ci sono le eccezioni

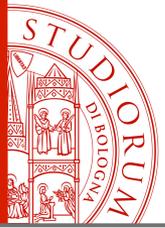


Fenomenologia della fulminazione

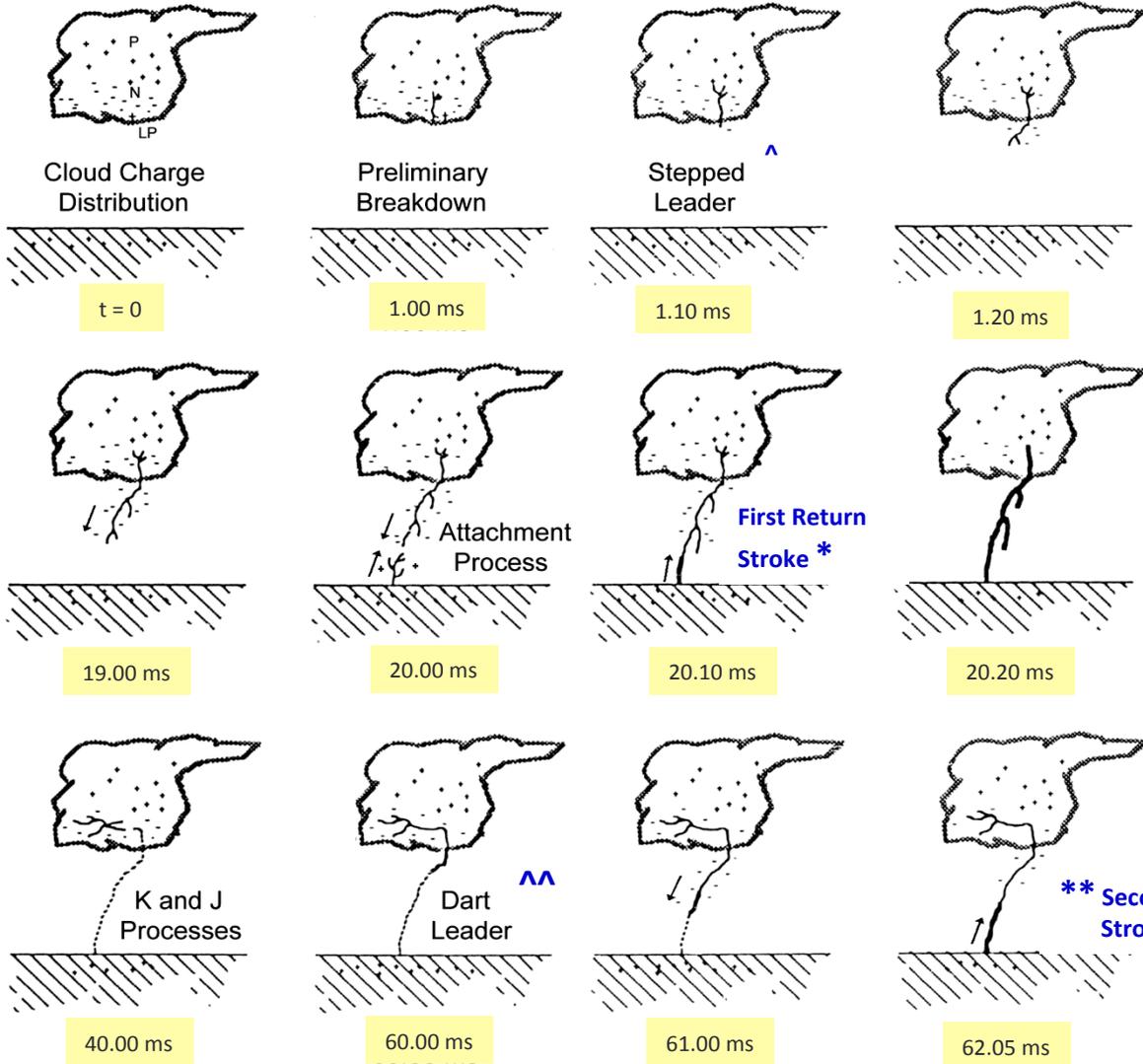
La separazione delle cariche elettriche in una nube è prodotta sostanzialmente da:

- vento,
- temperatura
- differenze di pressione (specialmente per nuvole la cui sommità raggiunge i 10 km)





Fenomenologia della fulminazione



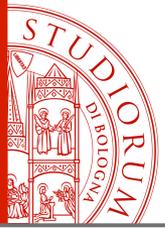
^ Canale di *leader*

* Primo colpo di ritorno

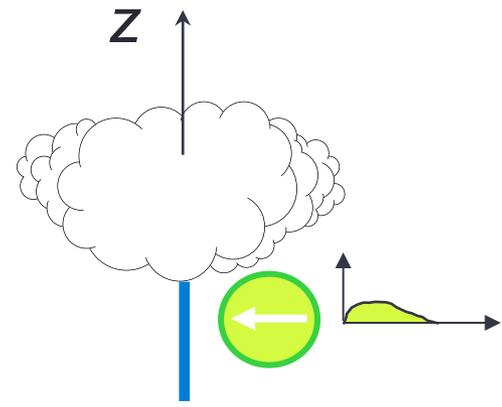
^^ Tracciamento oscuro

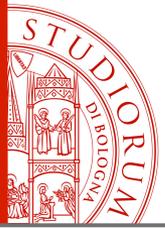
** Colpo di ritorno seguente

10 – 100 C di carica

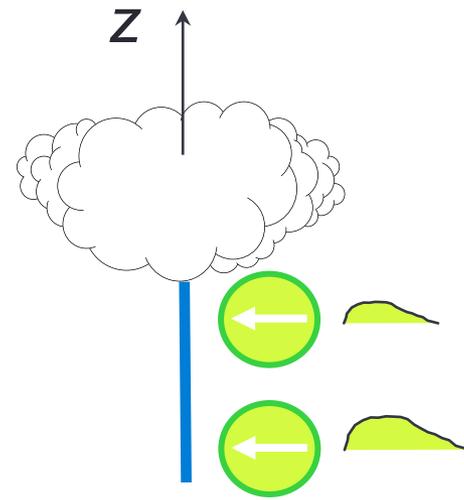


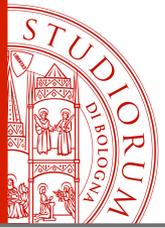
Una semplice modellazione di quanto avviene



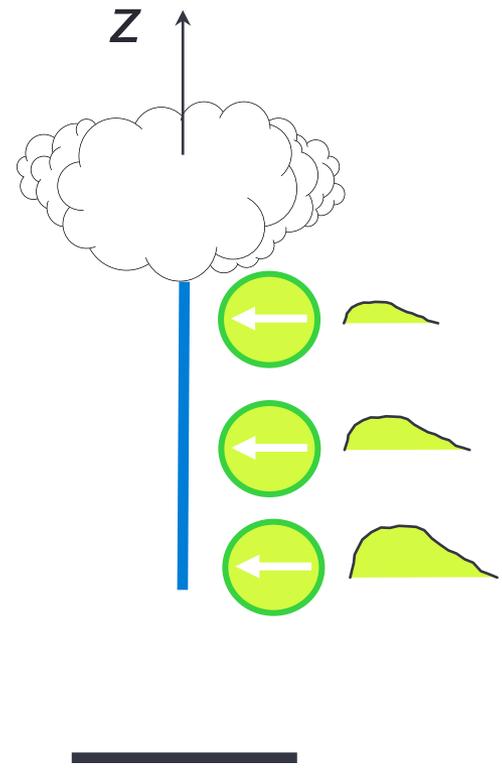


Una semplice modellazione di quanto avviene

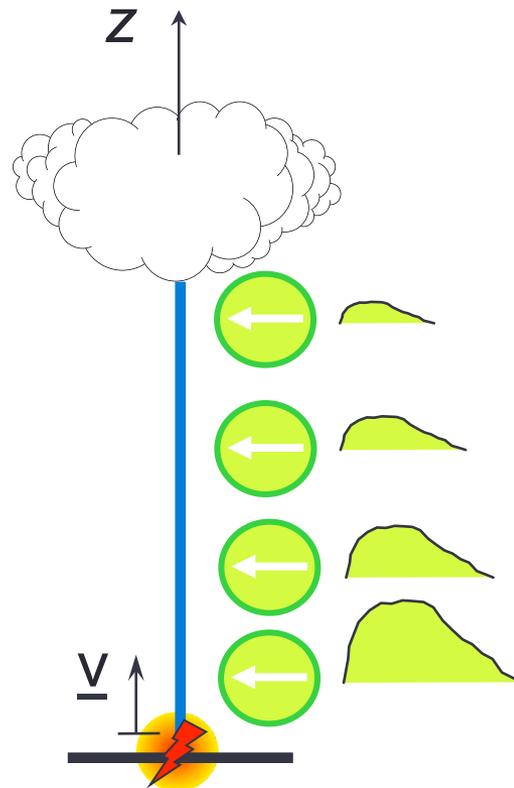


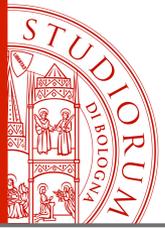


Una semplice modellazione di quanto avviene

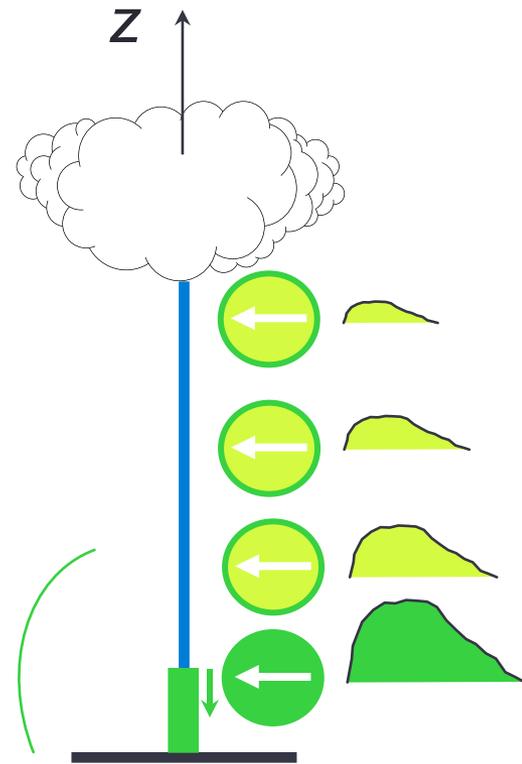


Una semplice modellazione di quanto avviene



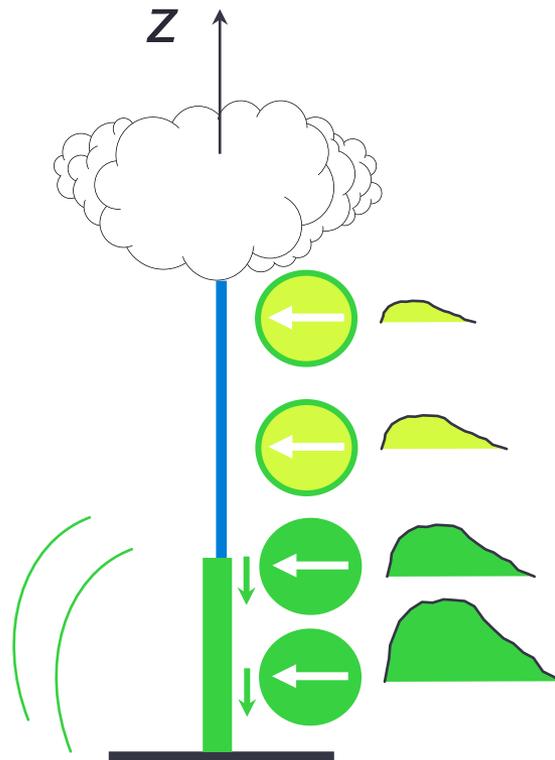


Una semplice modellazione di quanto avviene

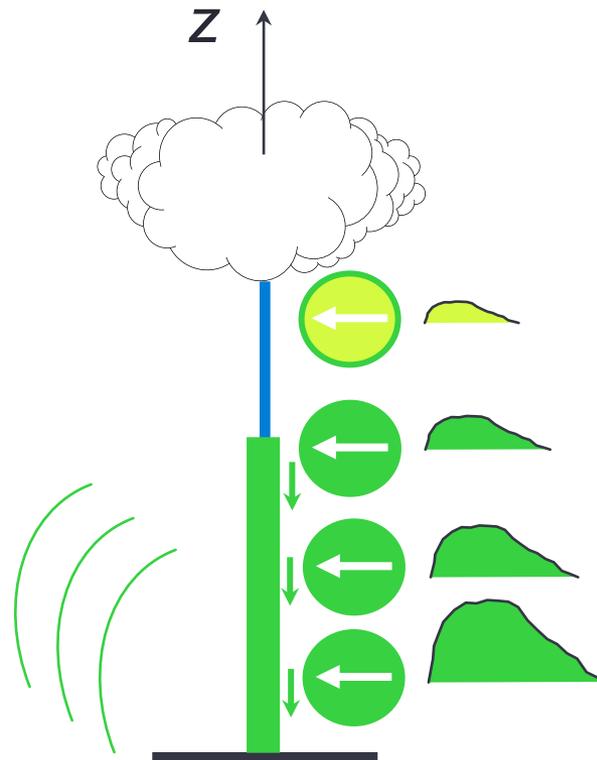




Una semplice modellazione di quanto avviene

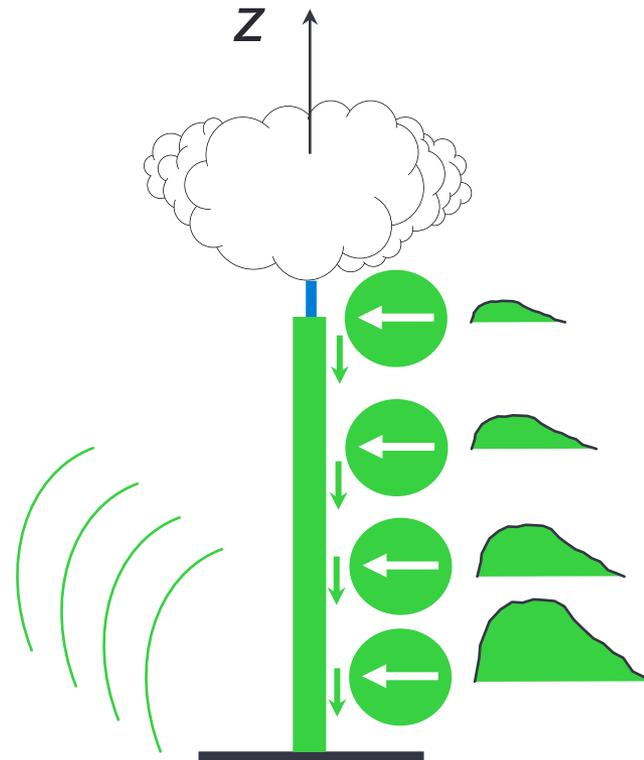


Una semplice modellazione di quanto avviene



Una semplice modellazione di quanto avviene

<http://www.youtube.com/watch?gl=IT&v=A0XkNfTyR9A>



ELECTRA

Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques
à haute tension

International Conference on Large High Voltage
Electric Systems

CIGRÉ

N° 41 — JUILLET-JULY 1975

PAPERS

PARAMETERS OF LIGHTNING FLASHES

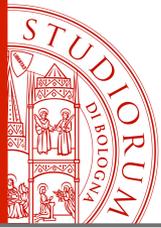
by K. BERGER, R.B. ANDERSON
and H. KRÖNINGER
of Study Committee No. 33
(*Overvoltages and Insulation Co-ordination*)

Paper published at the request
of the Chairman of the Committee

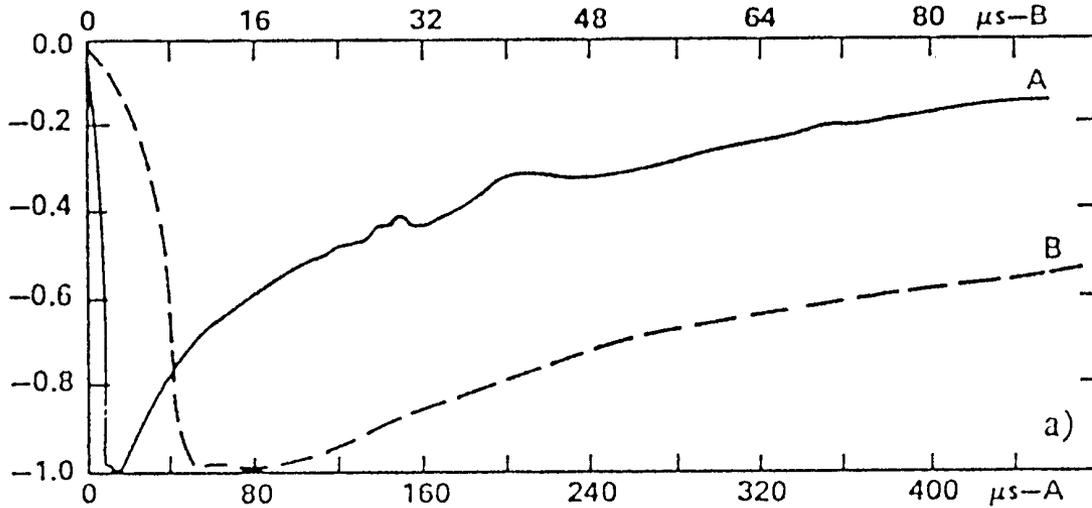
Mr. V. PALVA

1. — Introduction.

Ever since 1943 the Swiss high-voltage research committee has been maintaining a lightning measurement station on the Monte San Salvatore near Lugano, Switzerland. The main purpose of these measurements was to record current shapes of lightning flashes striking two television towers on the mountain. During the night photographs were taken of lightning flashes occurring in the vicinity, and more recently recordings of the electric field during a thunderstorm were also made. Reports on the measuring installation and the results obtained were published first by Berger in 1955 [1, 2], and later by Berger and Vogelsanger in 1965 [3] and again in 1966 [4]. In 1967 Berger contributed one of the five articles on lightning for a special edition of the Franklin Institute Journal [5].



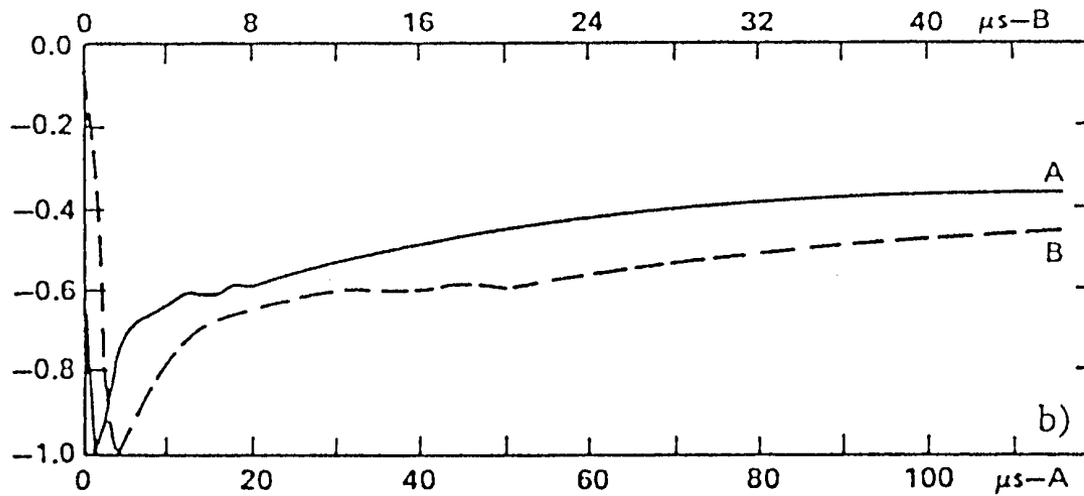
Corrente di fulmine



Forme d'onda tipiche normalizzate della corrente del

a) primo colpo

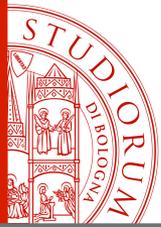
(*) Ottenute mediante misurazione "diretta" da torri di rilevamento



b) colpi di ritorno seguenti

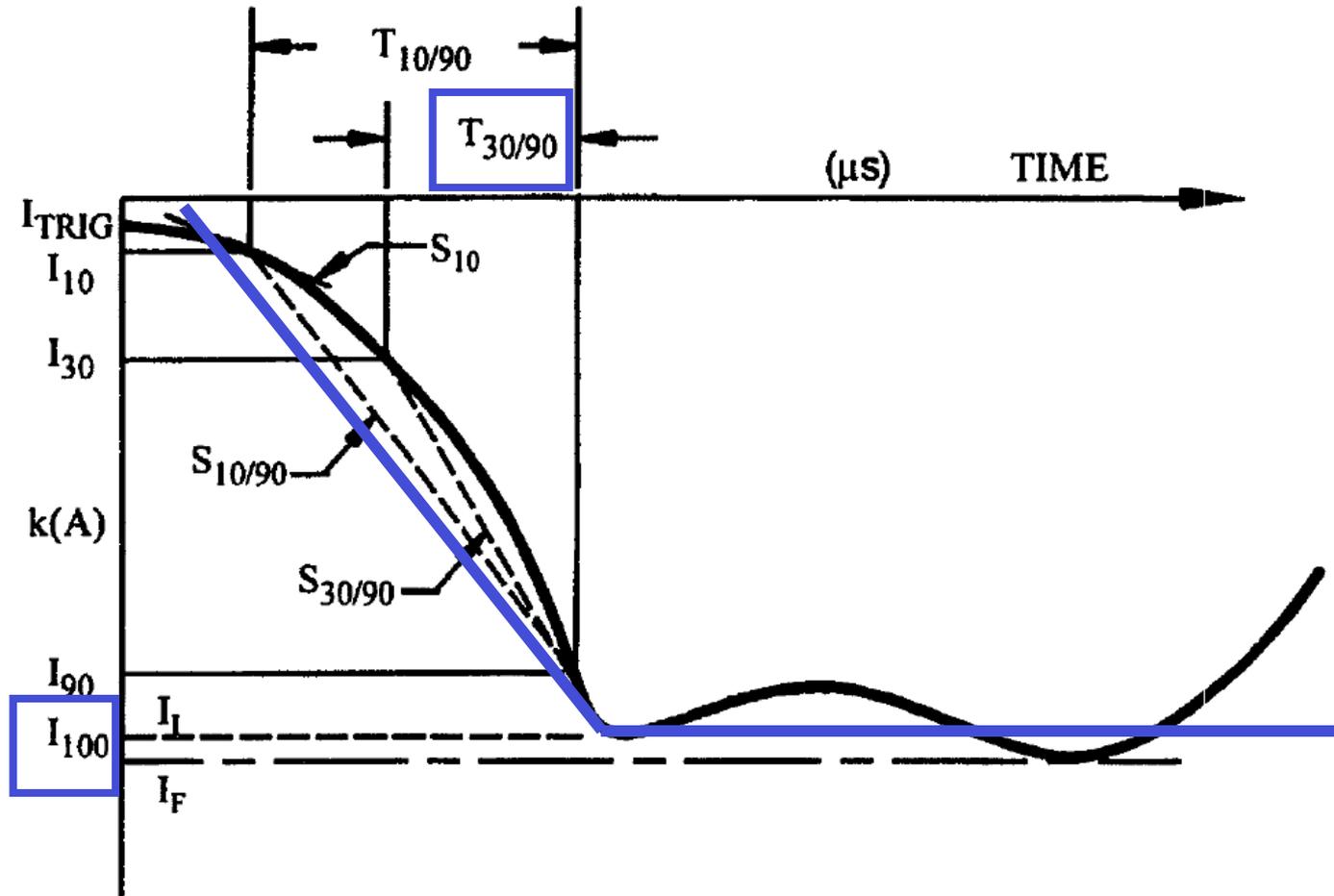
(*)

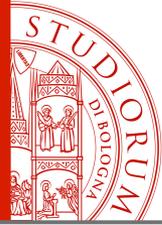
Adattata da *Berger et al.*, [1975].



Corrente di fulmine

from *Andersson and Eriksson, Electra*, 1980





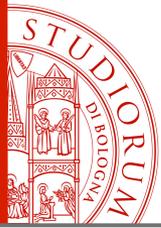
Statistique parametrique fulmine

TABLEAU 1 – TABLE 1
Résumé des paramètres du front
Summary of front shape parameters

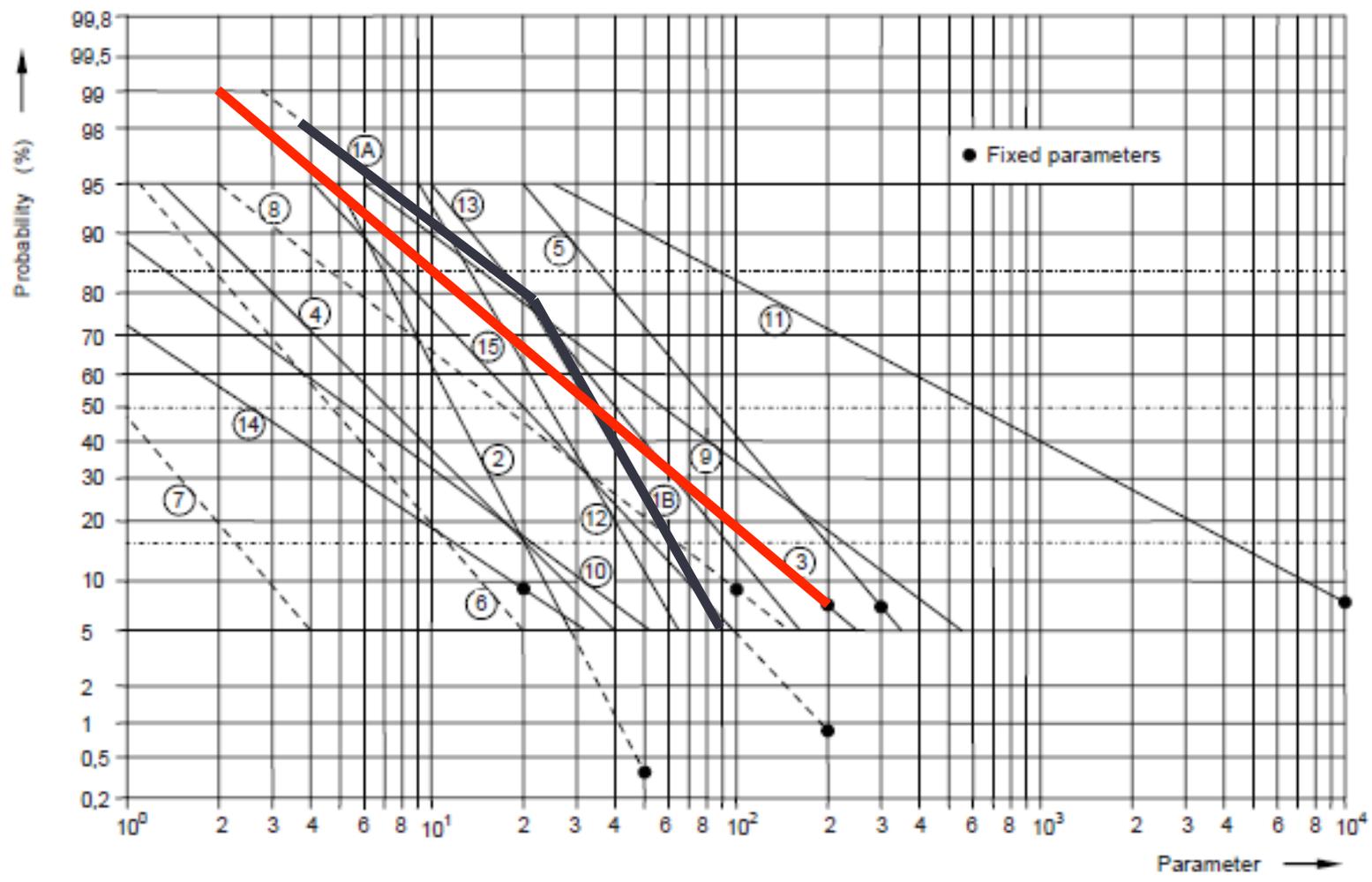
Paramètre <i>Parameter</i>	N <i>N</i>	Unités <i>Units</i>	Approximation par une distribution log-normale <i>Approximation by log-normal distribution</i>			Pourcentage de cas où la valeur du tableau est dépassée <i>Percent of cases exceeding tabulated value</i>		
			μ	σ log	Test positif <i>Positive test</i>	95 %	50 %	5 %
Décharges principales <i>First stroke</i>								
T-10	80	μ s	4,5	0,25	non	1,8	4,5	11,3
T-30	80	μ s	2,3	0,24	no	0,9	2,3	5,8
TAN-10	75	kA/ μ s	2,6	0,40	oui	0,6	2,6	11,8
S-10	75	kA/ μ s	5,0	0,28	non	1,7	5,0	14,1
S-30	73	kA/ μ s	7,2	0,27	oui	2,6	7,2	20,0
TAN-G	75	kA/ μ s	24,3	0,26	yes	9,1	24,3	65,0
PEAK-1	75	kA	27,7	0,20	oui	12,9	27,7	59,5
PEAK	80	kA	31,1	0,21	yes	14,1	31,1	68,5
RATIO (P-1)/P	–	–	0,9	0,10	non	–	–	–
Décharges secondaires <i>Subsequent strokes</i>								
T-10	114	μ s	0,6	0,40	no	0,1	0,6	2,8
T-30	114	μ s	0,4	0,44	non	0,1	0,4	1,8
TAN-10	108	kA/ μ s	18,9	0,61	no	1,9	18,9	187,4
S-10	114	kA/ μ s	15,4	0,41	oui	3,3	15,4	72,0
S-30	114	kA/ μ s	20,1	0,42	yes	4,1	20,1	98,5
TAN G	113	kA/ μ s	39,9	0,37	oui	9,9	39,9	161,5
PEAK-1	114	kA	11,8	0,23	yes	4,9	11,8	28,6
PEAK	114	kA	12,3	0,23	oui	5,2	12,3	29,2
RATIO (P-1)/P	–	–	0,9	0,09	yes			

Remarque : Dans chaque cas, les distributions sont exprimées en base 10.

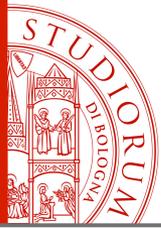
Note : In each case, the above log-normal distributions are expressed in terms of the base 10.



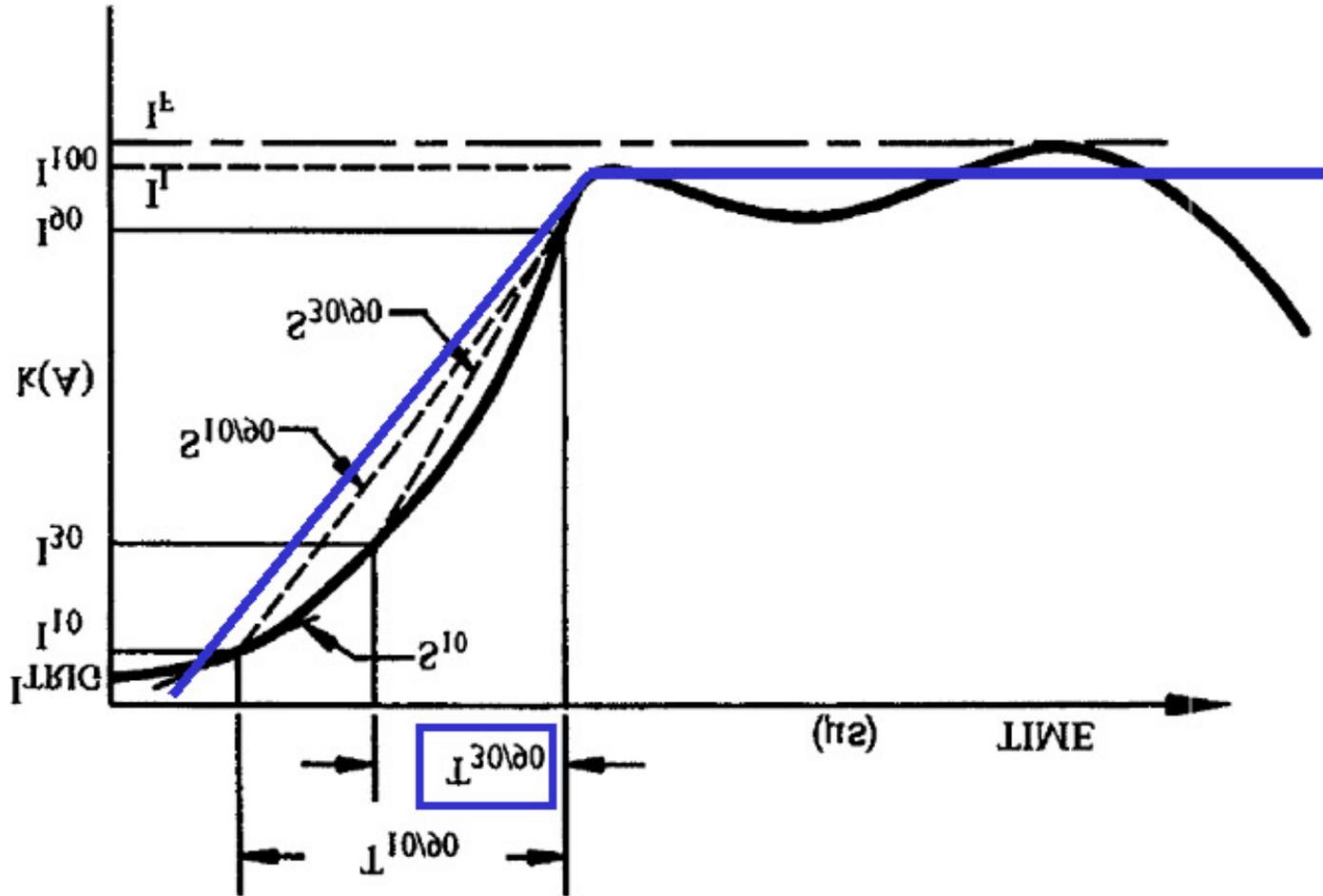
Statistiche parametri fulmine



The peak-current statistical distribution of positive strokes has a median value close to the one of negative strokes, but the corresponding standard deviation is much larger

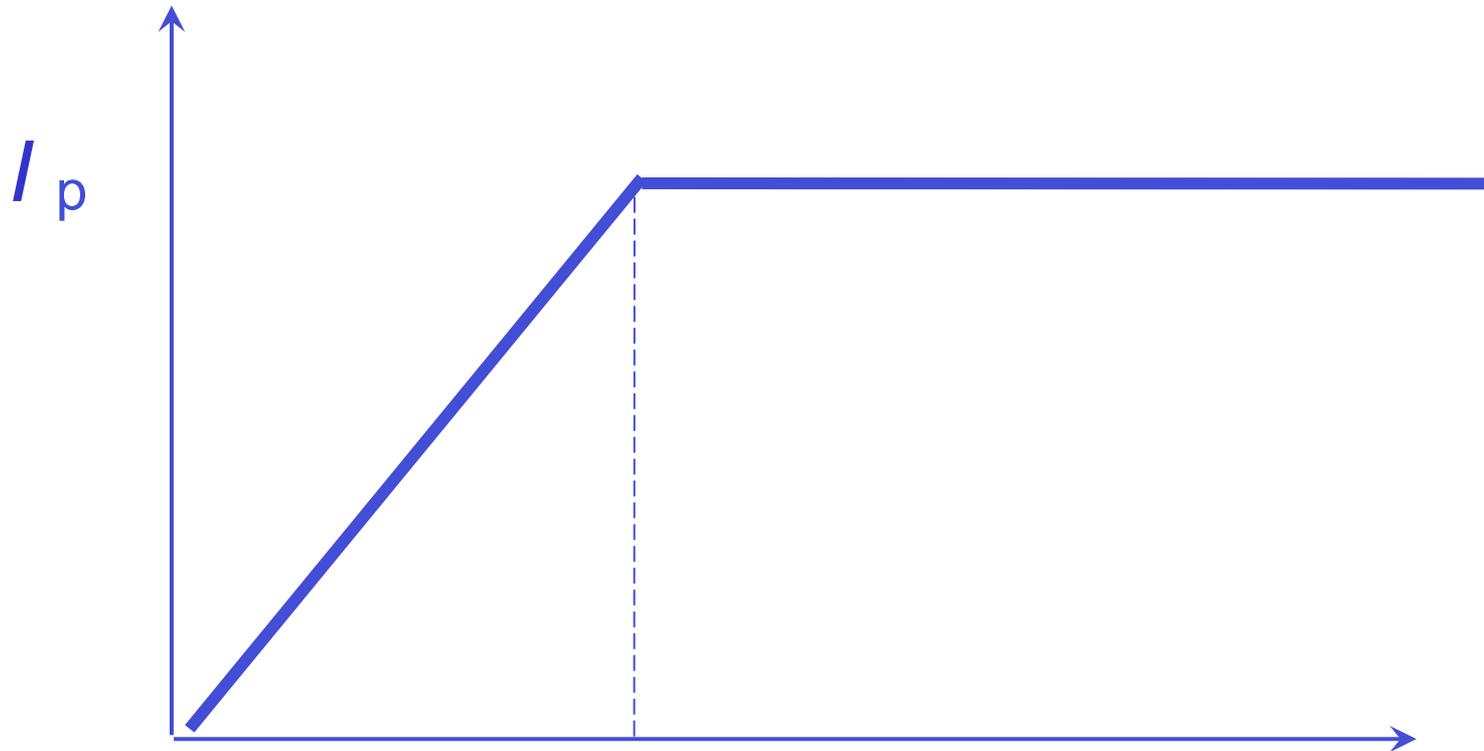


Corrente di fulmine

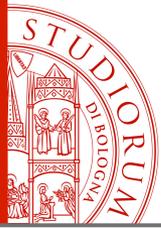




Corrente di fulmine



$$t_f = T_{30/90} / 0.6$$

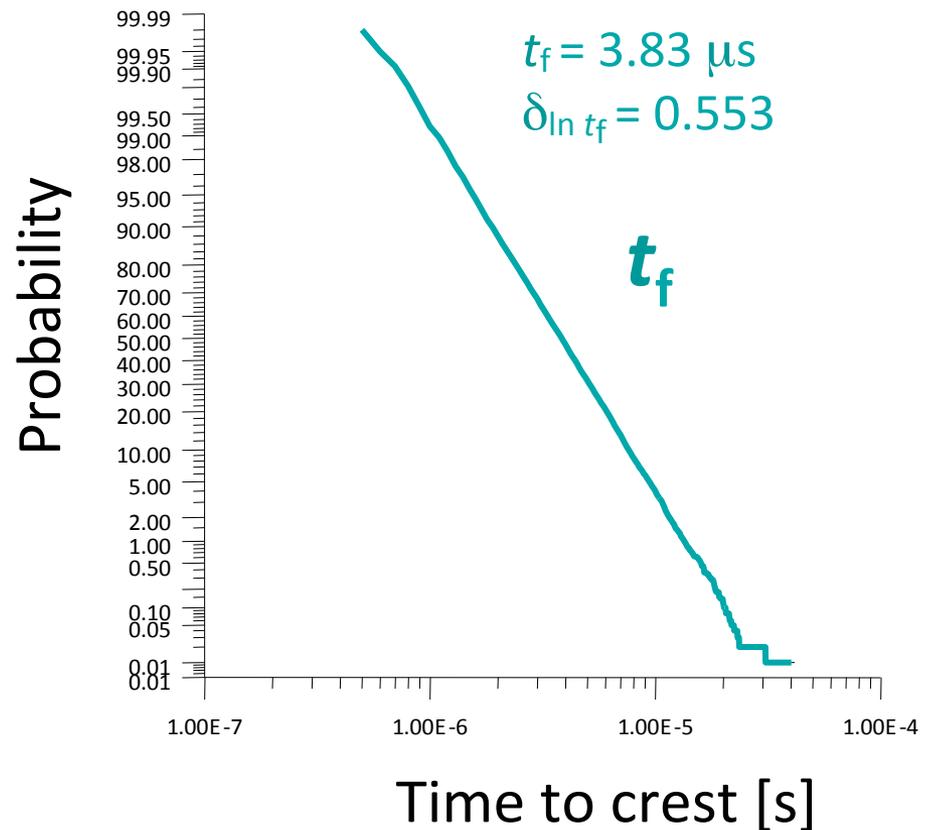
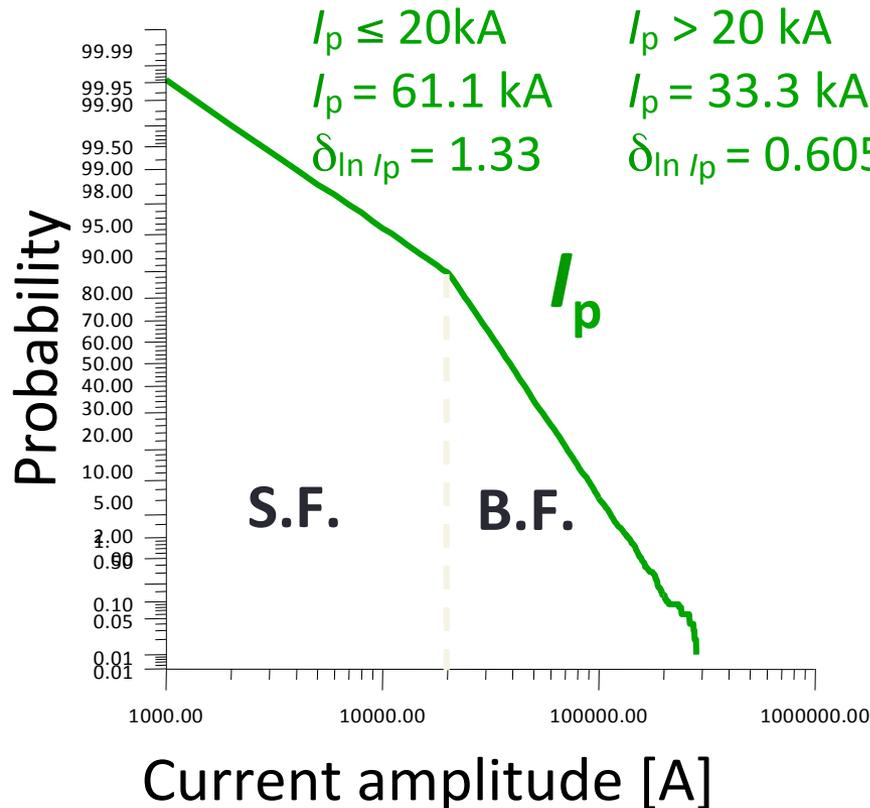


Corrente di fulmine – Statistiche

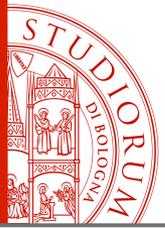
CIGRE Cumulative statistical distributions of peak value and time to crest of negative first return strokes

Ampiezza della corrente

Tempo di salita

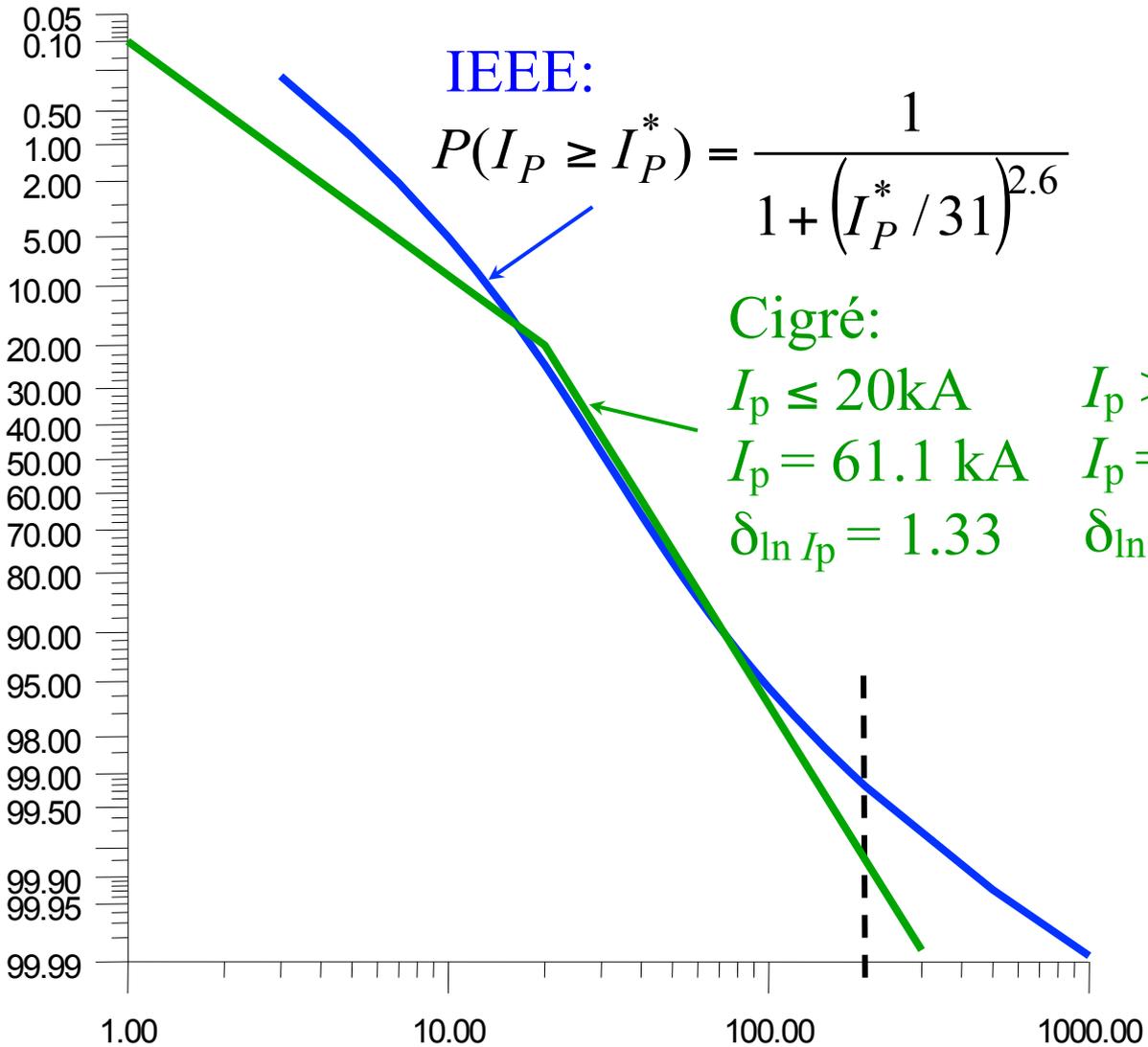


from Andersson and Eriksson, Electra , 1980

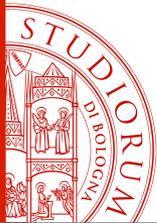


Corrente di fulmine – Statistiche

Comparison between CIGRE and IEEE cumulative statistical distributions (peak value, negative first return stroke)



[kA]



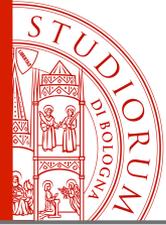
I sistemi di rilevamento fulmini

Scopo

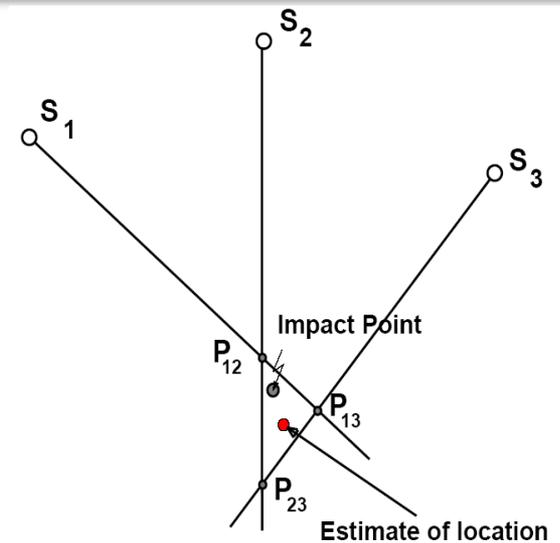
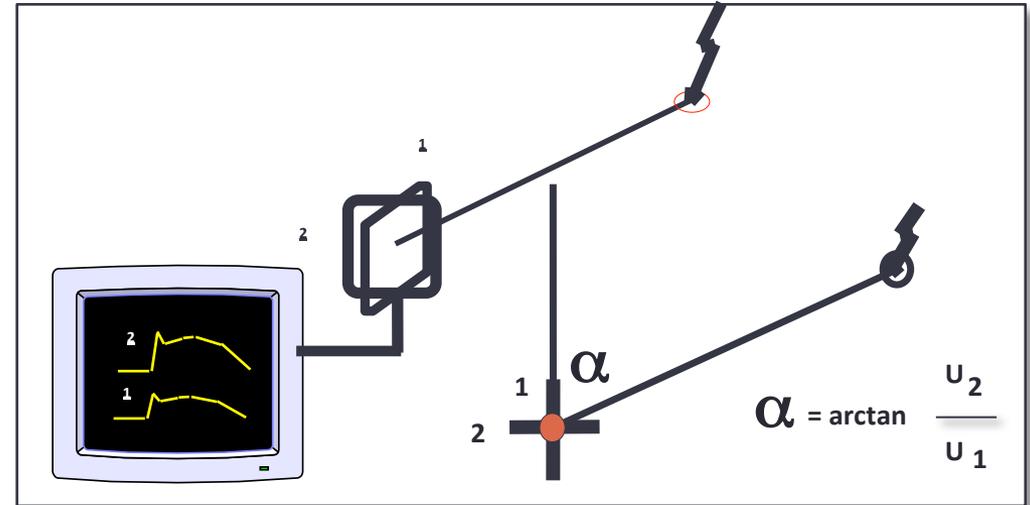
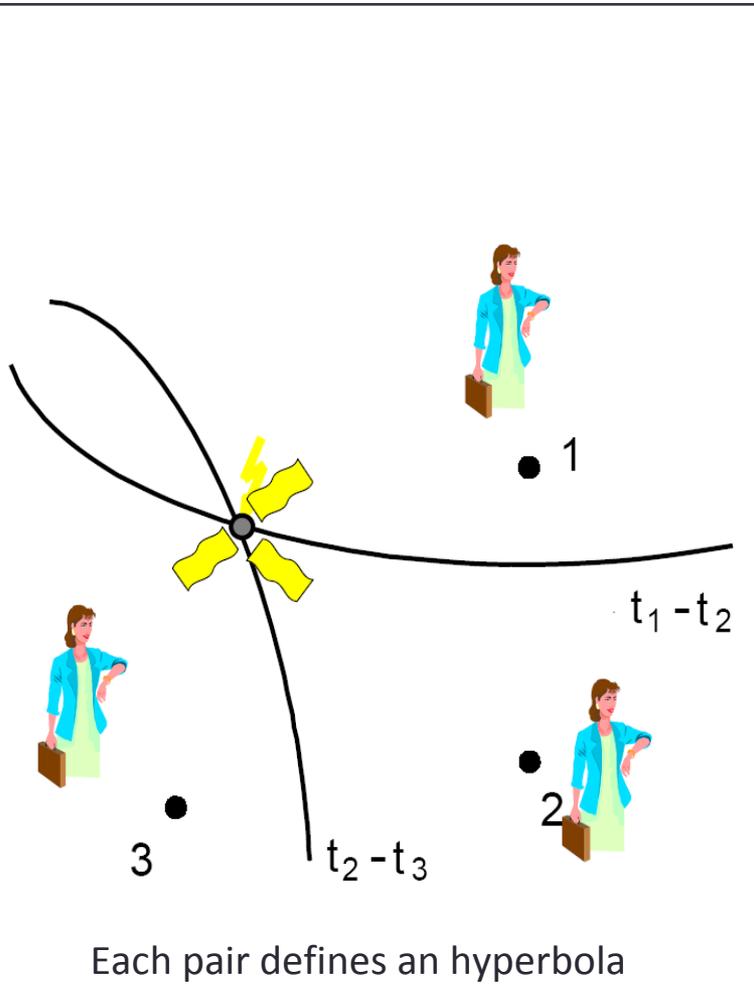
- Rilevare il punto di impatto
- Fornire una stima della corrente di fulmine

Applicazioni

- Previsioni atmosferiche
- Allarme per chi lavora all'aperto
- Localizzazione di incendi
- Aeronautica
- Gestione delle linee di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica
- Stima del rischio, o contenziosi, per le compagnie di assicurazioni

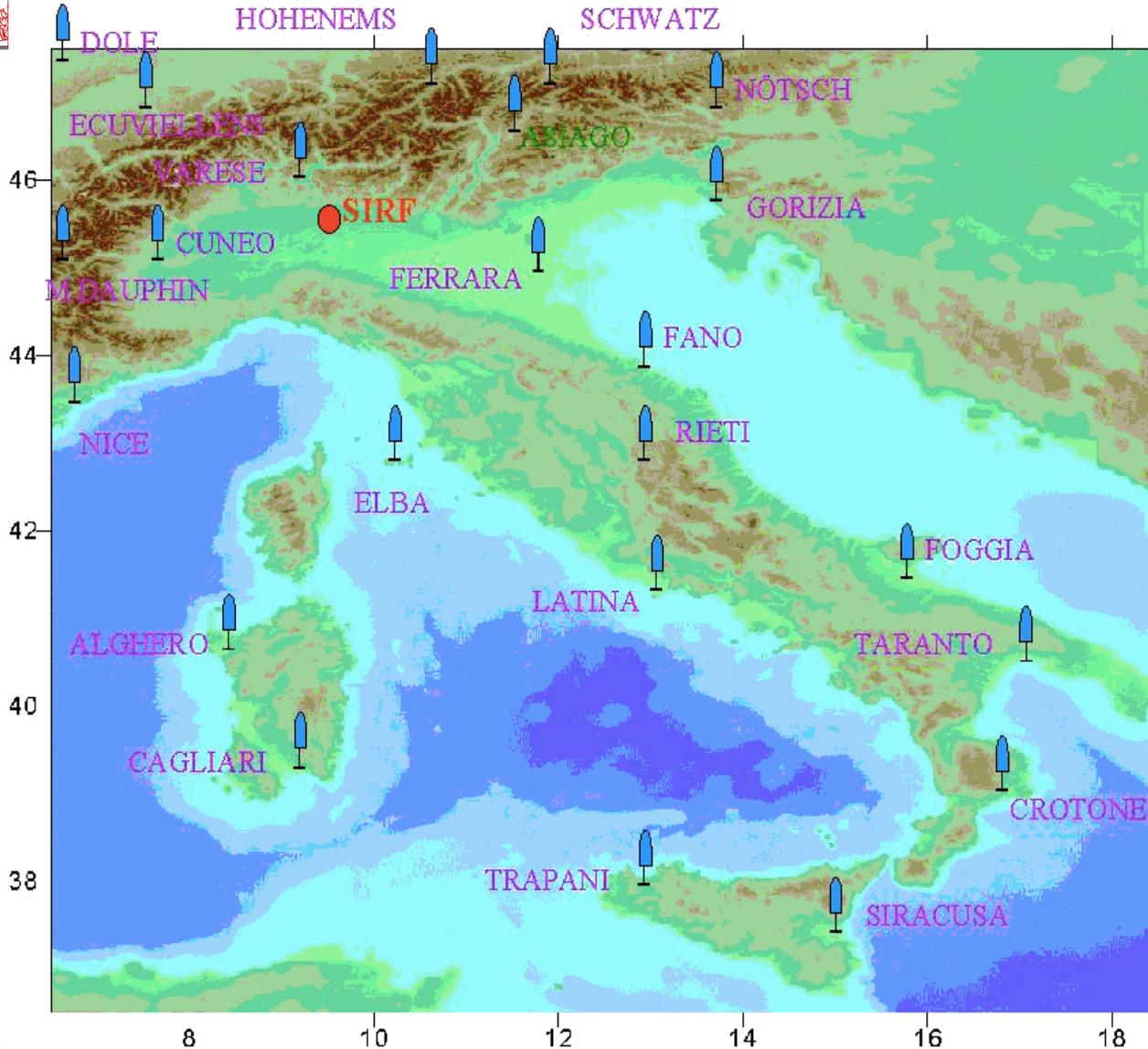


I sistemi di rilevamento fulmini

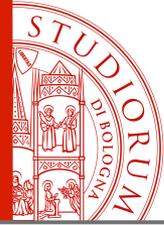




I sistemi di rilevamento fulmini



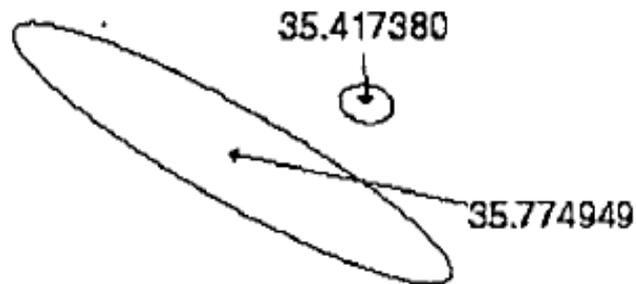
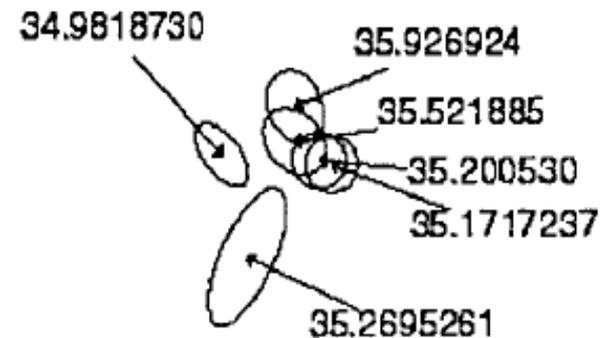
CESI-SIRF



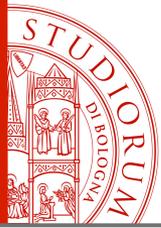
I sistemi di rilevamento fulmini

Sec	Latitude	Longitude	Current kA
34.9818730	35.5143	-80.3533	-38.628
35.200530	35.5138	-80.3411	-27.232
35.417380	35.4753	-80.4137	-39.312
35.521885	35.5156	-80.3442	-21.331
35.774949	35.4706	-80.4306	-10.064
35.926924	35.5189	-80.3441	-22.848
35.1717237	35.5134	-80.3395	-31.302
35.2695261	35.5045	-80.3501	-21.479

Oltre alle coordinate del punto di impatto il SIRF, come tutti i sistemi moderni di rilevamento fulmini, offre anche una stima "indiretta" del valore della corrente di fulmine

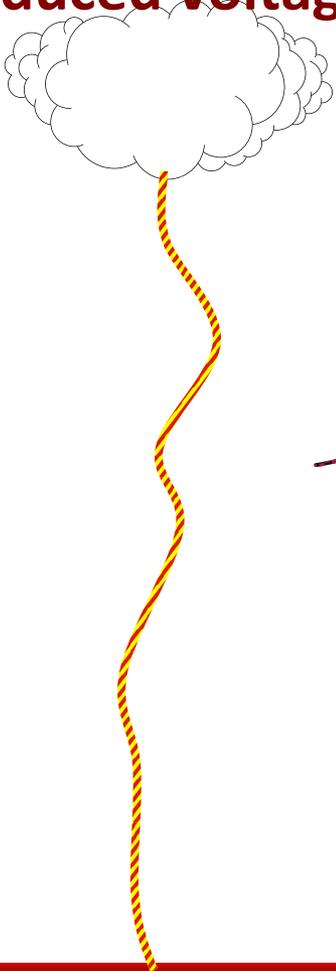


0 1 2
Kilometers

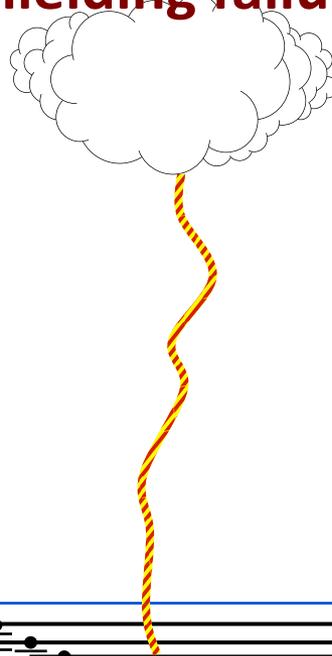


Protezione – Linee

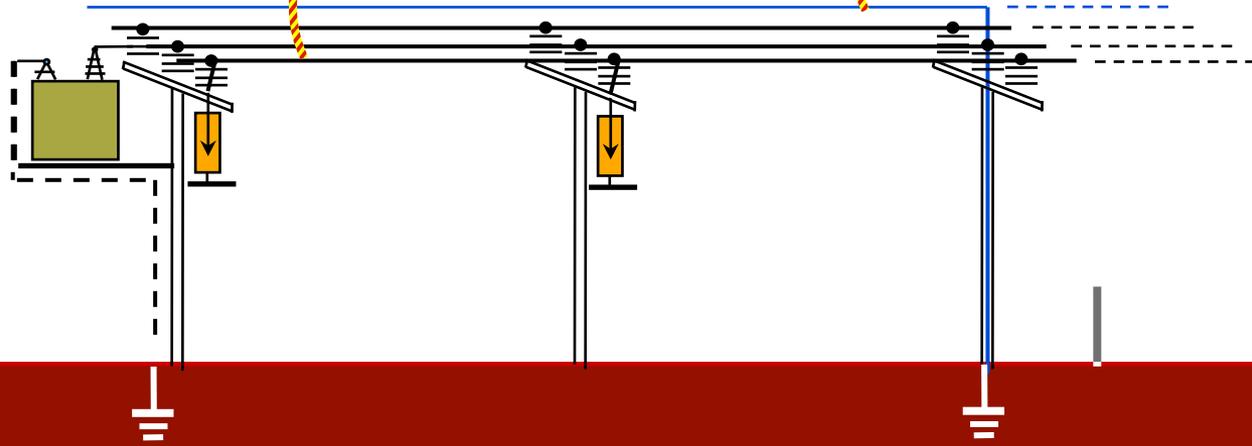
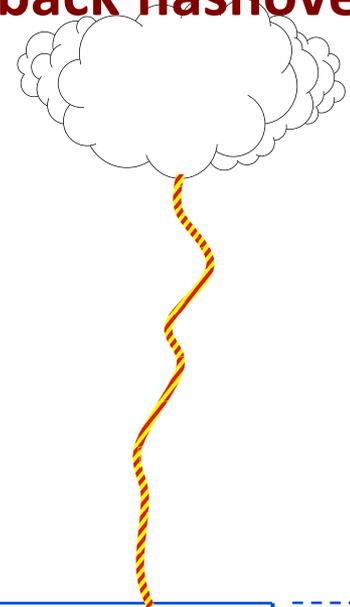
Indirect stroke
(induced voltages)

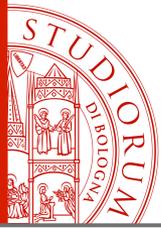


Direct stroke
(shielding failure)

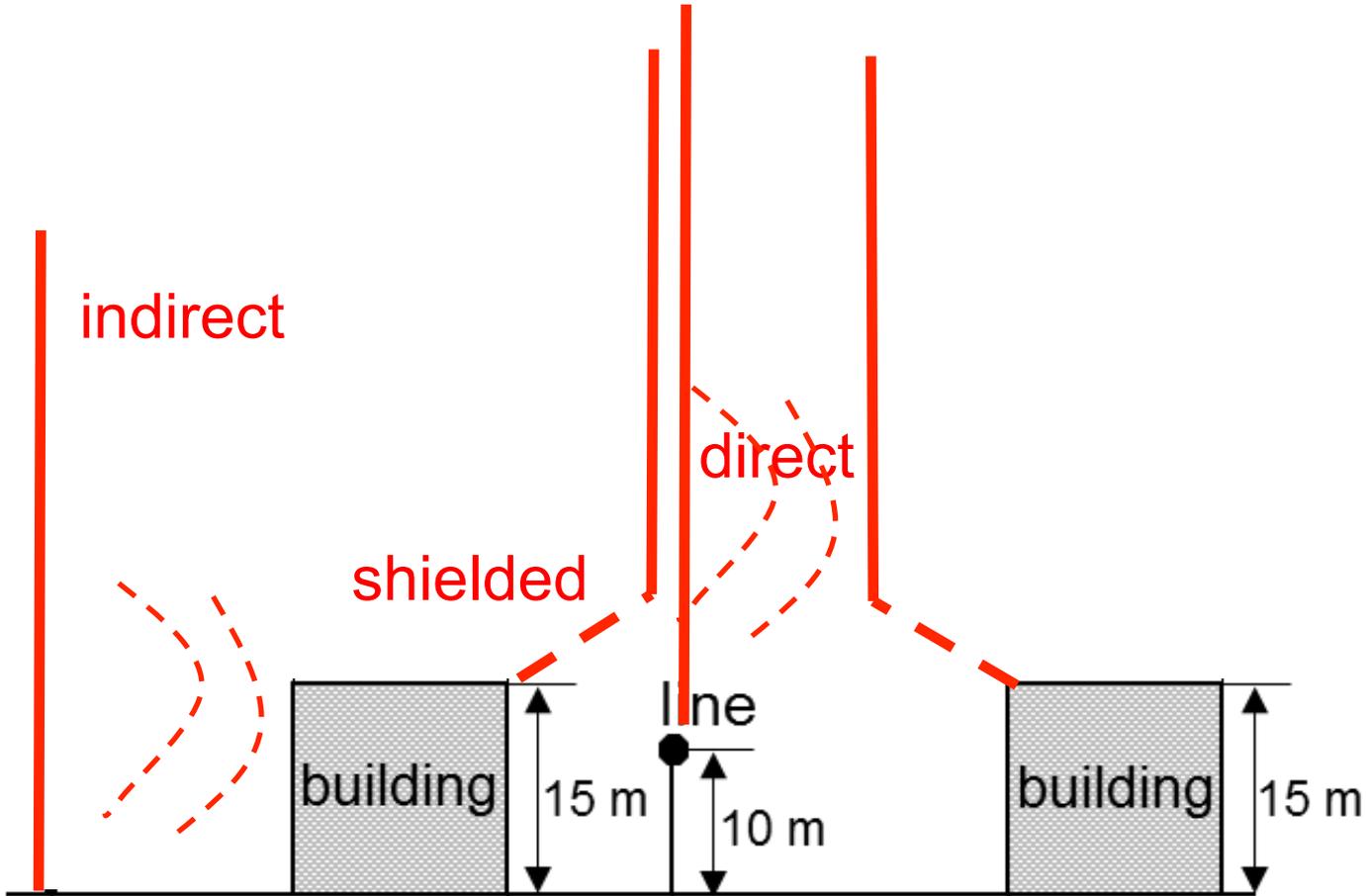


Direct stroke
(back flashover)





Protezione – Linee tra edifici





Protezione - Edifici

1. Effetto elettrico/termico/meccanico per fulminazione diretta della struttura



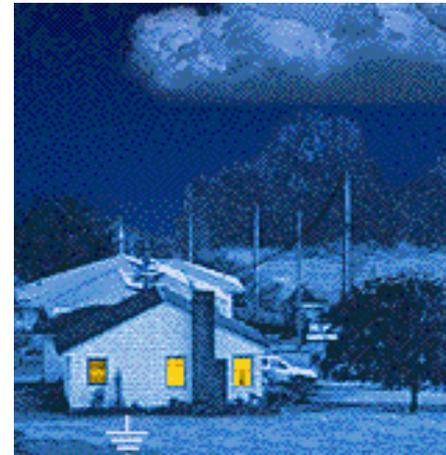
2. Effetto elettrico/termico per fulminazione diretta di linee (potenza e dati) che entrano nella struttura



3. Effetto elettrico per accoppiamento elettromagnetico



4. Effetto elettrico per aumento del potenziale di terra (anche in 1 e 2)



Danni provocati dal fulmine



Tank explosion caused by lightning Cilacap / Java 1995



Punctures to concealed cables due to lightning strike



Boiler damaged by lightning strike



Antenna line and audio-system damaged by lightning strike



Danni provocati dal fulmine



Lightning strike into a tree in front of the Main building of the Federal Railways, Munich, 9 May, 2003

Lightning strike into a tree in front of the main building of the Federal Railways, Munich, 9 May, 2003



Lightning paralyzed telephone system in Dueren, Germany, 2000:

The vehement thunderstorm had audible consequences for those 2.000 telephone customers in Dueren who had a "5" at the beginning of their telephone numbers: The voltage in the cables caused by the lightning strike was high enough to make the

Protezione

Nel 1755 Benjamin Franklin propose l'installazione di un'asta metallica connessa alla terra per proteggersi

La 'Frankling rod' cioè il parafulmine è stata la prima applicazione pratica per studiare l'elettricità.

“Protection against direct strokes rests on providing a sacrificial object for lightning to terminate on, after which it is dissipated safely to ground via down conductors and ground electrodes ”

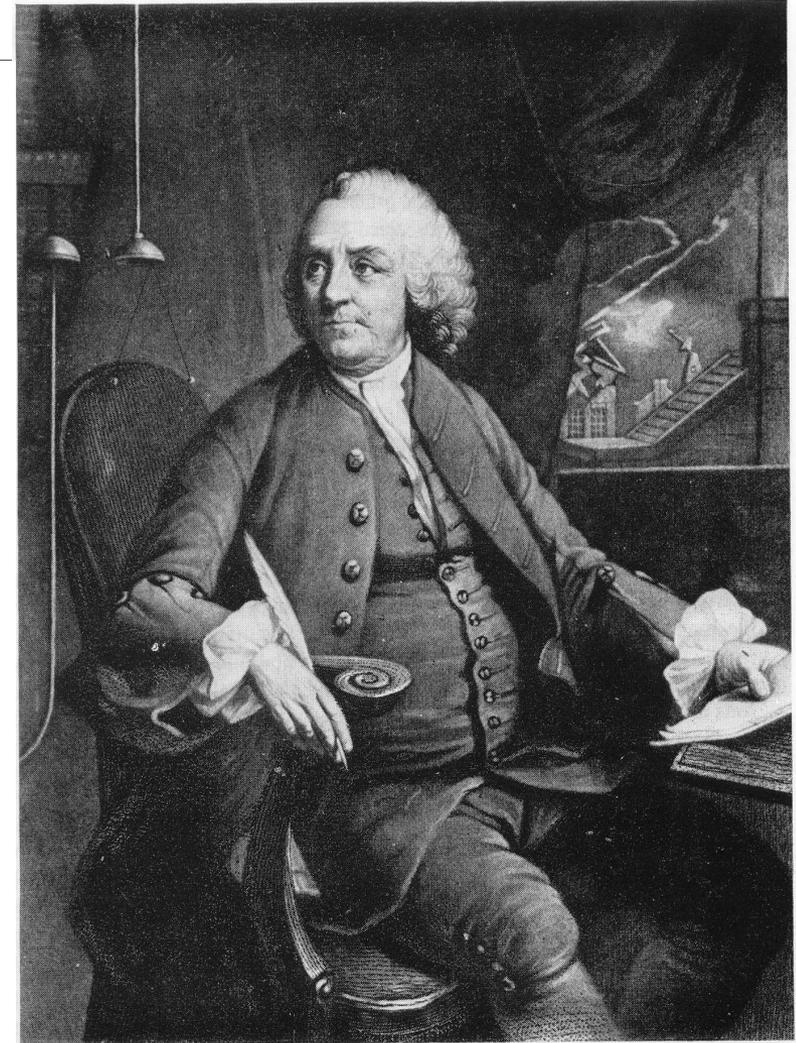
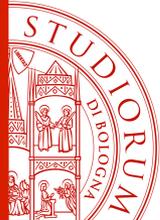


Fig. 4. A lightning rod of special design was erected by Franklin in his home in September 1752 intended for continued study of lightning. As shown in this engraving by Chamberlain in 1762, both upper and lower rods terminated in a bell; a small ball suspended between them vibrated when electrically energized. From the right bell hung a two-ball electroscope to indicate a charged cloud overhead.



Modello elettrogeometrico

Come il leader si avvicina al terreno iniziano a verificarsi le condizioni per cui si sviluppa un 'campo critico' → si ha il "contatto" tra il leader discendente e l'asperità naturale a livello del suolo (albero, edificio, sostegno di linea elettrica, etc.) → *final jump*.

Assumendo in prima approssimazione il canale di leader perpendicolare al terreno → la scarica colpirà l'asperità (che supponiamo per ora di tipo filiforme e verticale, ad esempio una torre) se il suo punto di impatto prospettico rispetto al terreno cade all'interno del **raggio di captazione r** .

r dipende da diversi fattori quali,

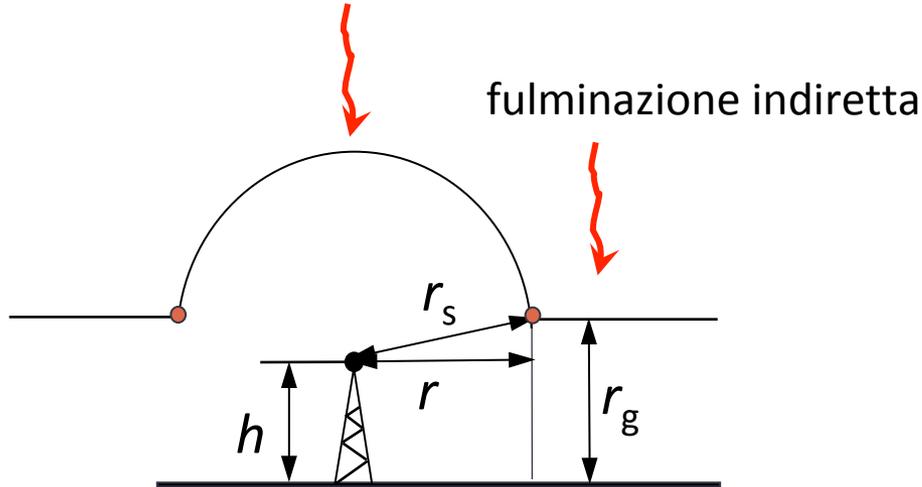
- ❑ carica del leader,
- ❑ tipo di struttura (asta verticale o conduttore orizzontale)
- ❑ altezza della struttura
- ❑ natura del terreno (pianeggiante o no)
- ❑ ecc.

La questione è complessa ed ancora oggetto di ricerca scientifica

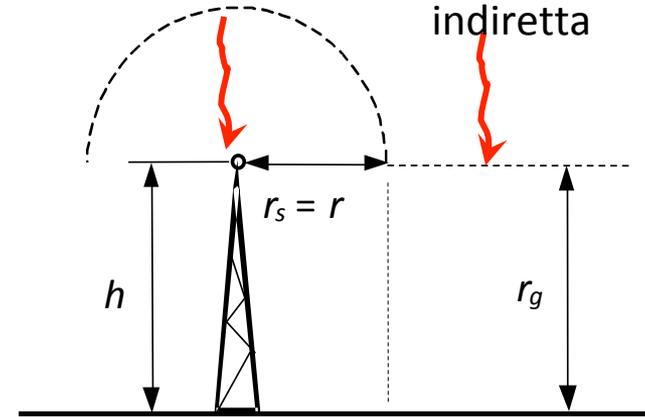
Sono state proposte diverse espressioni per valutare tale raggio: alcune di esse sono basate sul cosiddetto **modello elettrogeometrico**.

Modello elettrogeometrico

fulminazione diretta



Fulminazione diretta Fulminazione indiretta



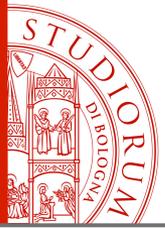
$$r = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad \text{for } h < r_g$$

$$r = r_s \quad \text{for } h \geq r_g$$

Dove r_s e r_g sono le cosiddette '**striking distances**' rispetto alla struttura ed al terreno rispettivamente.

$$r_s = \alpha \cdot I_p^\beta$$

$$r_g = k \cdot r_s$$



Modello elettrogeometrico

Electrogeometric al Attractive radius expression	α	β	k
Armstrong and Whitehead	6.7	0.80	0.9
IEEE	10	0.65	0.55

$$r_s = \alpha \cdot I_p^\beta$$

$$r_g = k \cdot r_s$$

Flash incidence models

Basic concept of the leader progression model

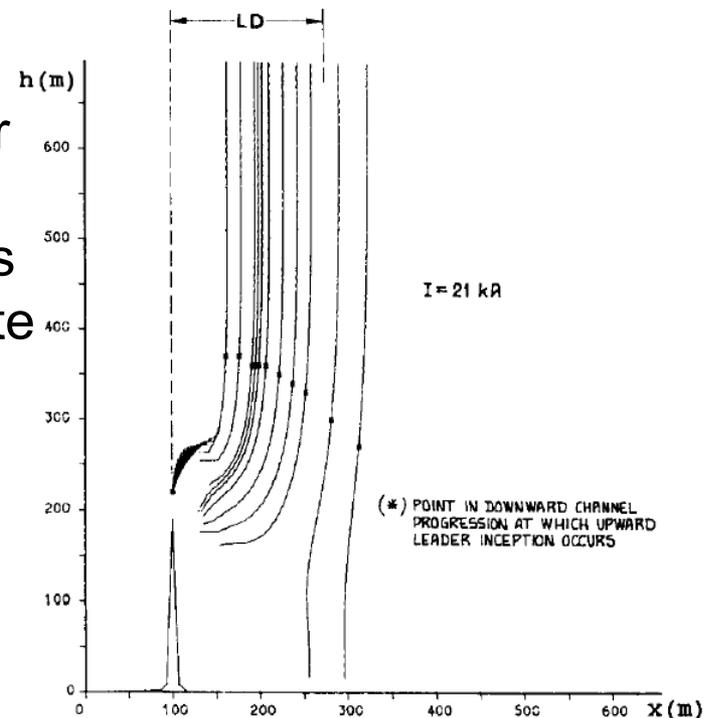
The **Leader Progression Models** [Dellera, Garbagnati, 1990 and Rizk, 1994] has been developed from knowledge of discharge physics on long air gaps under switching surge conditions.

Hp: good similarity between propagation and inception of downward and upward leaders at laboratory tests and lightning phenomena in spite of the 10x difference in scale.

Modeling:

- charge simulation method [Singer, Steinbigler and Weiss, 1973]
- **fictitious line charges** as particular solutions of Laplace and Poisson's equations to calculate the **leader electric field at any point, satisfying boundary conditions.**

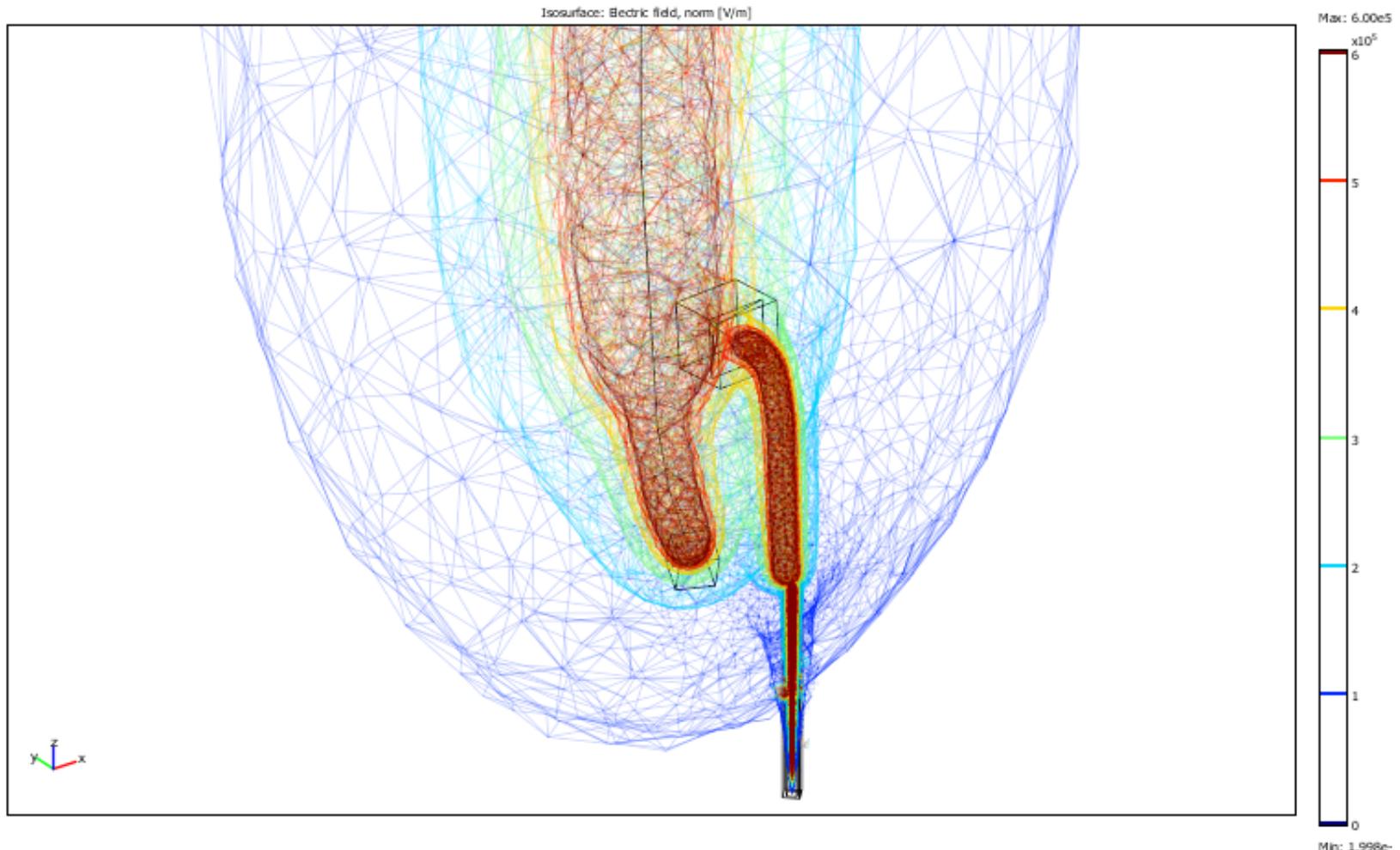
Using Maxwell theory, Poisson's equation solves the surface potential distribution for a volume of charge density ρ_v and permittivity ϵ .



Flash incidence models

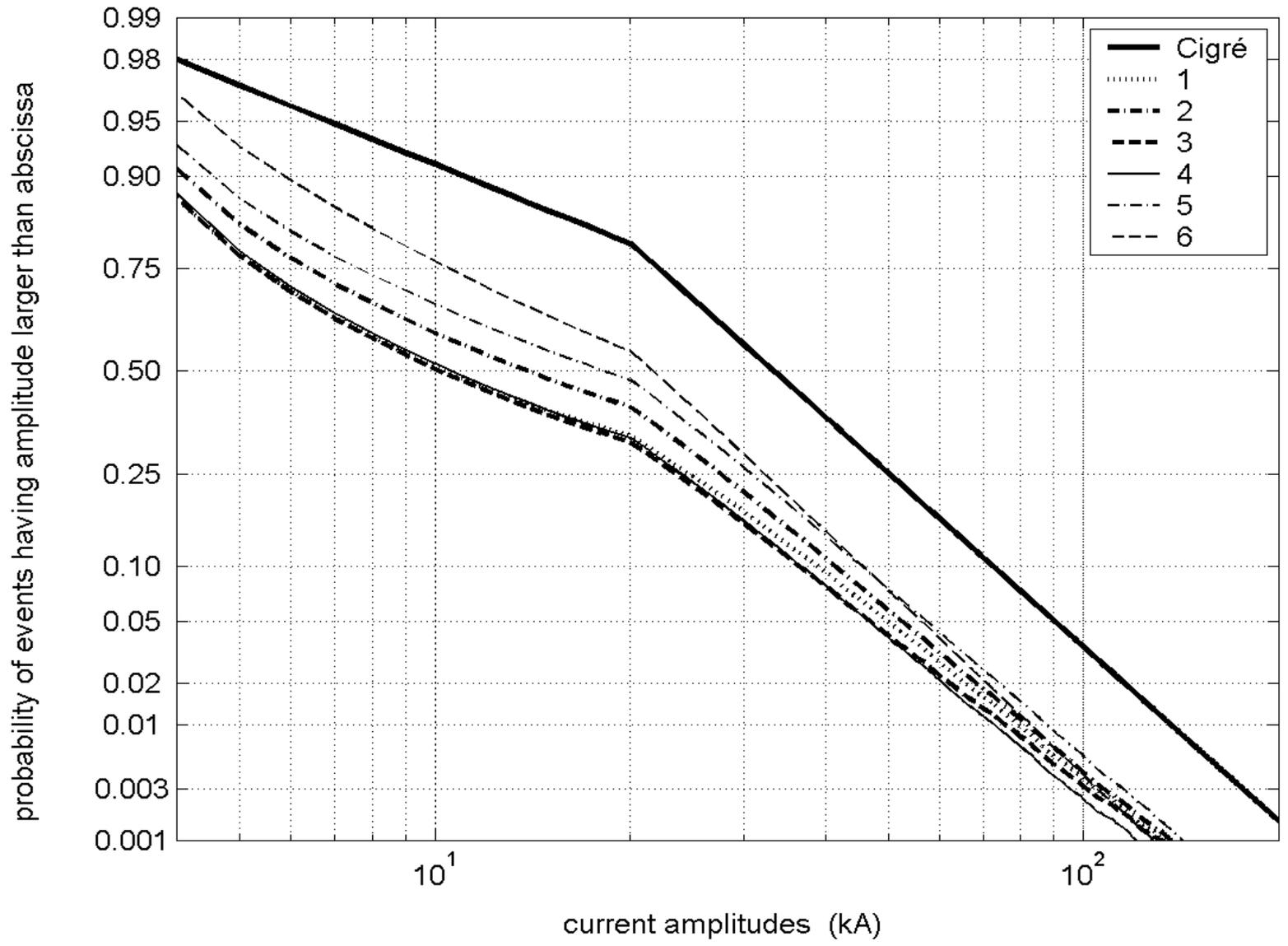
Basic concept of the leader progression model

Sequential solution of the Poisson's equation: $-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V - \bar{P}) = \rho$

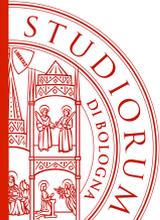




“Decontaminazione” delle statistiche



1: AW; 2: IEEE 4: Eriksson; 5: from Rizk; 6: from Dellera-Garbagnati



La Norma - Principi generali

Occorre fare riferimento a 4 norme.

1. **Norma CEI EN 62305-1** dove sono contenuti i *principi generali* alla base dei “sistemi di protezione contro i fulmini (LPS)” di strutture e degli impianti in essa entranti;
2. **Norma Italiana CEI EN 62305-2**, per la *valutazione del rischio* dovuto a fulmini a terra
3. **Norma Italiana CEI EN 62305-3**, che contiene i criteri di progettazione, installazione, verifica e manutenzione degli LPS per la limitazione del *danno materiale alle strutture* e del *pericolo per le persone*
4. **Norma Italiana CEI EN 62305-4**, che contiene i criteri di progettazione degli LPS per la protezione degli *impianti elettrici ed elettronici interni alle strutture*



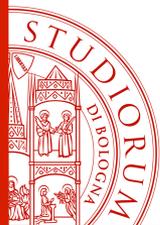
La Norma - Principi generali

I provvedimenti da adottare per la protezione contro i fulmini sono numerosi e devono costituire un sistema organico e coordinato.

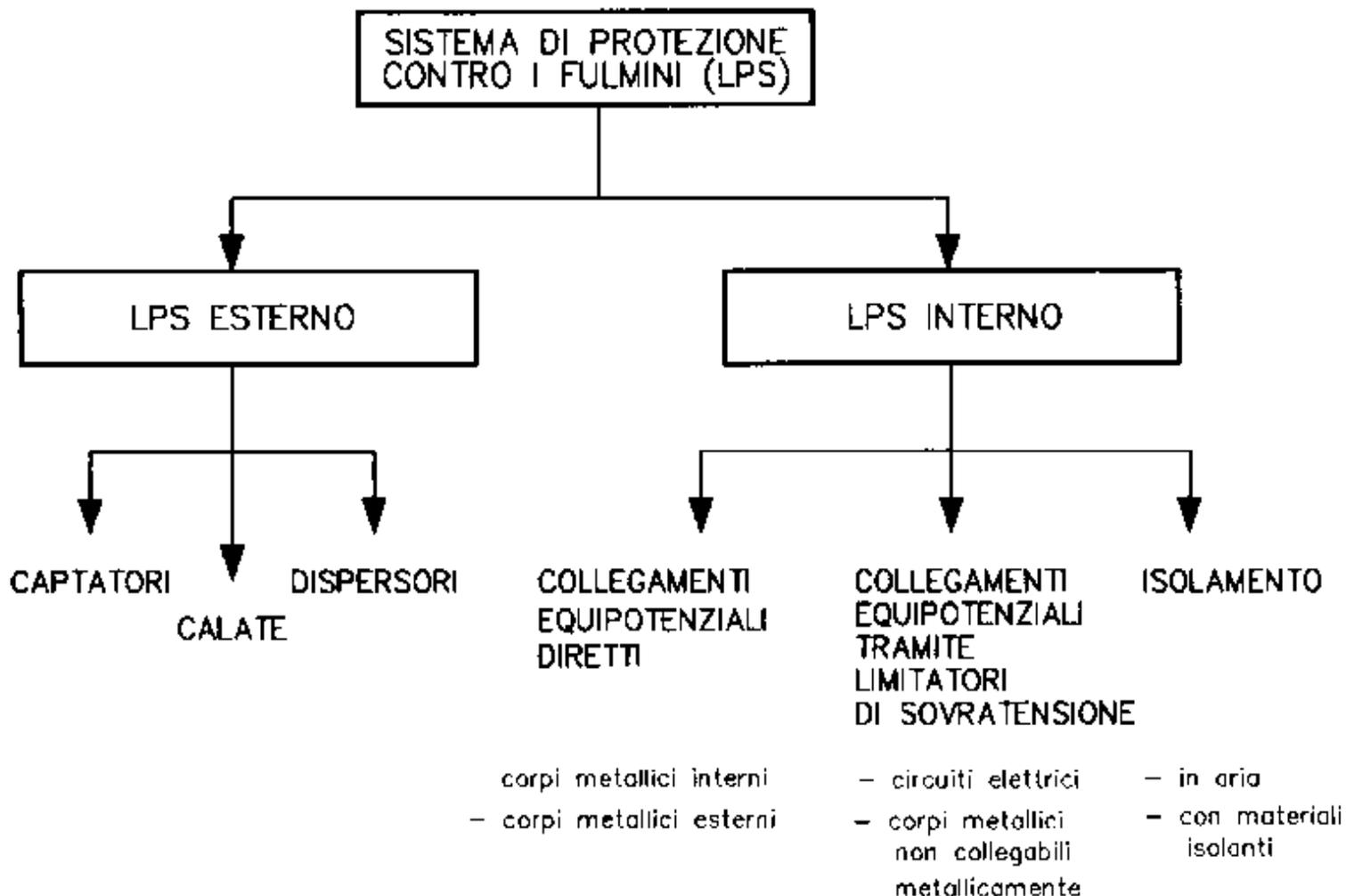
Per questo motivo la Norma attribuisce all'insieme delle misure di protezione il nome di **sistema di protezione contro i fulmini (LPS: Lightning Protection System)**.

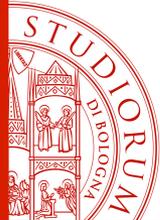
L'LPS può essere pensato costituito da due parti:

1. **impianto di protezione esterno**: avente compito di intercettare il fulmine, di condurre a terra la corrente di fulmine e di disperla nel terreno;
2. **impianto di protezione interno**: avente il compito di evitare, per quanto possibile, la formazione di scariche pericolose.



La Norma - Principi generali

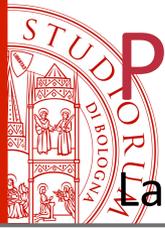




La Norma - Principi generali

L' LPS esterno deve *intercettare il fulmine, condurre a terra la corrente di fulmine e disperderla nel terreno*; a tal fine è necessario:

- installare sulla parte superiore della struttura conduttori metallici opportunamente posizionati (*captatori*);
- disporre i conduttori (*calate*) che conducano la corrente di fulmine dal captatore al dispersore in maniera da *evitare scariche e tensioni di contatto pericolose*;
- disperdere a terra la corrente di fulmine per mezzo di idonei *dispersori senza creare tensioni di passo pericolose*;



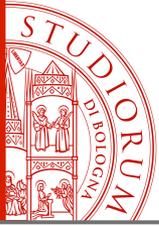
Principi generali – Livelli di Protezione

La Norma considera **quattro livelli di protezione**, per ciascuno dei quali è fissato un insieme di parametri, minimi e massimi, della corrente del fulmine le cui sollecitazioni devono essere sopportate dall' LPS.

I **valori massimi** sono impiegati per definire componenti dell' LPS quali: sezione dei conduttori, spessore delle guaine metalliche, caratteristiche degli SPD, distanze di isolamento per evitare scariche pericolose e per definire i parametri di prova nelle simulazioni degli effetti del fulmine sui sopraccitati componenti.

I **valori minimi** sono definiti solo per l' ampiezza della corrente di fulmine e sono utilizzati per determinare il raggio della **sfera rotolante**.

Livelli di protezione	Primo colpo				Colpi successivi		
	Corrente di picco (kA)	Carica massima (C)	Energia specifica massima (kJ/W)	Tempo salita/ discesa (μs / μs)	Corrente di picco massima (kA)	Pendenza media (kA/ μs)	Tempo salita/ discesa (μs / μs)
I	200 ÷ 3	100	10000	10/350	50	200	0,25/100
II	150 ÷ 5	75	5625		37,5	150	
III	100 ÷ 10	50	2500		25	100	
IV	100 ÷ 16	50	2500		25	100	



Posizionamento dei captatori

I metodi impiegati (ad es. la ‘sfera rotolante’) sono basati sull’analisi dei fenomeni fisici che avvengono nell’ultima fase della progressione delle cariche contenute nel leader discendente verso terra o verso strutture (oggetti verticali o linee aeree), illustrati nella lezione sulla fenomenologia della fulminazione.

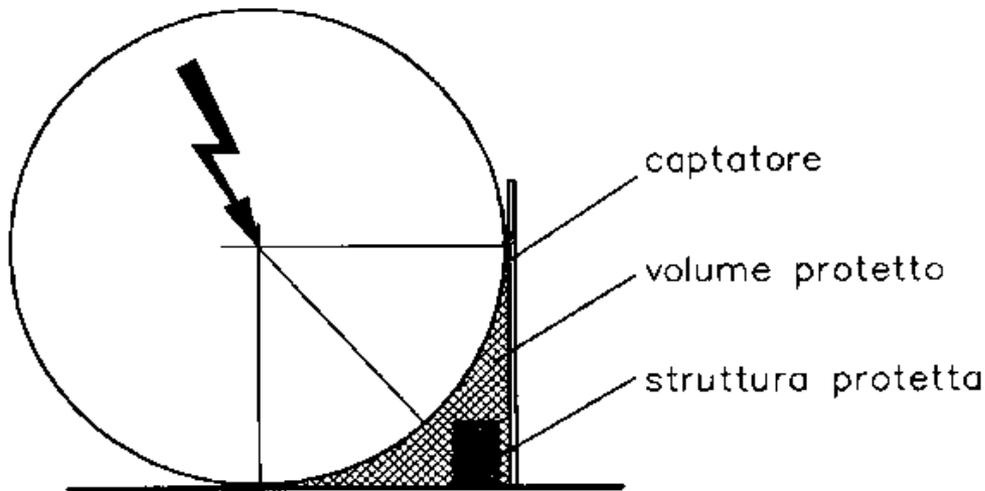
Il metodo della sfera rotolante utilizza il concetto di ‘raggio di captazione’ già introdotto quando si è trattato il modello elettrogeometrico nella lezione dedicata alla fenomenologia della fulminazione.

(Sono stati sviluppati anche modelli che simulano la propagazione del leader, quali il *Leader Progression model*, in modo più fedele, ma non ancora stati ‘standardizzati’ anche a causa della loro maggiore complessità.)

Posizionamento dei captatori

Raggio di captazione di una struttura: è la distanza alla quale un fulmine, di corrente superiore a quella di riferimento, viene sicuramente captato dalla struttura.

La zona compresa tra un' asta e l' arco di cerchio di raggio uguale al raggio di captazione è quindi una zona che non può essere colpita dai fulmini (**volume protetto**).



Ricordiamo che, per il modello elettrogeometrico, il raggio della sfera rotolante r (lunghezza del salto finale, il 'final jump' dell' 'attachment process') dipende dal valore di picco I del primo colpo breve.

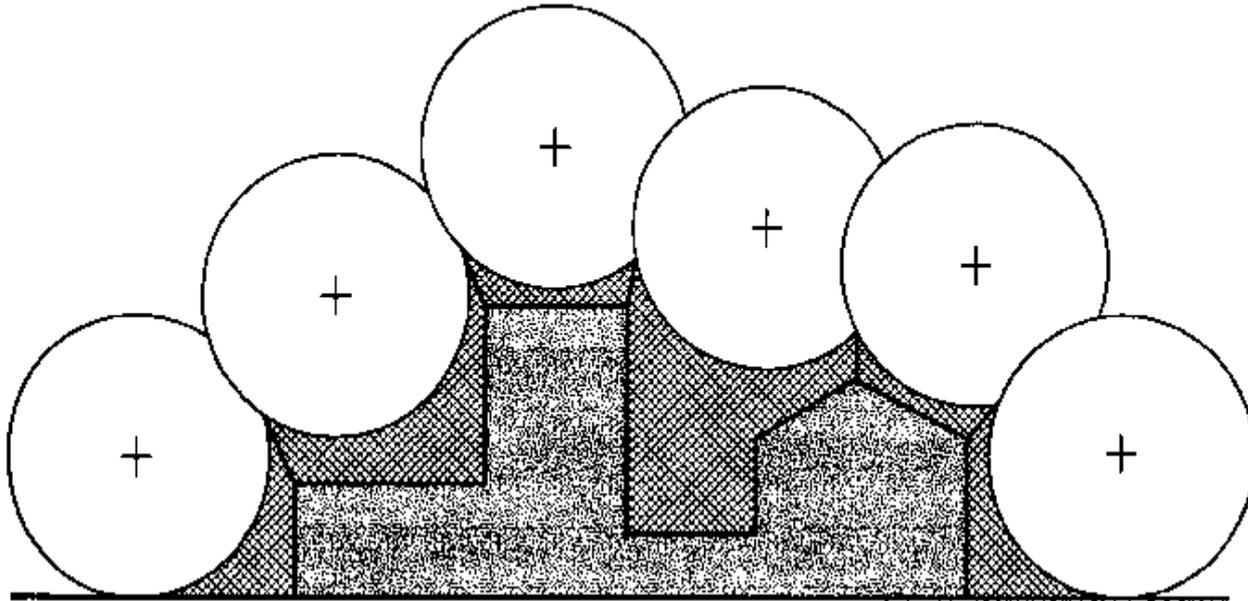
Nel rapporto "IEEE working group report, *Estimating lightning performance of transmission lines II*, 1992"

è data la seguente relazione:

$$r = 10I^{0,65}$$

Posizionamento dei captatori

Metodo della sfera rotolante: il volume protetto da un captatore può essere visto come la **zona che non viene raggiunta da una sfera di raggio uguale al raggio di captazione e che rotoli sul terreno e intorno al captatore.**



La struttura è protetta correttamente se la sfera, rotolando, tocca i captatori ma non la struttura stessa.



Conclusioni

La modellazione del fenomeno della scarica atmosferica oggi accettata dalla comunità scientifica e dalla normativa internazionale consente di mettere a punto sia sistemi di protezione efficaci riguardo la protezione degli edifici, delle strutture e dei sistemi elettrici, sia sistemi di rilevamento e localizzazione dei fulmini di precisione ragionevole e in grado di fornire dati sempre più affidabili.

Dal punto di vista scientifico, non mancano aspetti del problema che richiedono modellazioni più raffinate rispetto a quelle esistenti (ad es. il concetto di sfera rotolante), alle quali la comunità scientifica lavora già da tempo, ed per cui la comunità scientifica/tecnica Italiana si è distinta.

E' infine auspicabile uno sforzo da parte dei vari comitati tecnici internazionali e nazionali teso alla semplificazione di alcune parti della norma legate sia alla valutazione del rischio, sia alla progettazione dei sistemi di protezione.



Riferimenti

- [1] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering applications," *ELECTRA*, vol. 69, pp. 65–102, 1980.
- [2] H. Armstrong and E. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-87, no. 1, pp. 270–281, Jan. 1968.
- [3] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes," *Electra*, vol. 41, pp. 23–37, 1975.
- [4] K. Berger and E. Garbagnati, "Lightning current parameters. Results obtained in Switzerland and in Italy," in *Proc. URSI Conference*, Florence, Italy, 1984, pp. 1–11.
- [5] A. Borghetti, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 3, pp. 1400–1409, 2004.
- [6] A. Borghetti, C. A. Nucci, and M. Paolone, "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 684–692, 2007.
- [7] A. Borghetti, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Indirect-Lightning Performance of Overhead Distribution Networks With Complex Topology," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 2206–2213, Oct. 2009.
- [8] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, and F. Tossani, "Influence of the return stroke current waveform on the lightning performance of distribution lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 4, pp. 1800–1808, 2017.
- [9] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, and F. Tossani, "Response of distribution networks to direct and indirect lightning: Influence of surge arresters location, flashover occurrence and environmental shielding," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 153, pp. 73–81, 2017.
- [10] L. Dellera and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model - Part I," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 4, 1990.
- [11] L. Dellera and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model - Part II," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 4, 1990.



Riferimenti

- [12] Cigré Working Group 33.01, “Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines (TB 63),” CIGRE, Paris, 1991.
- [13] Cigré Working Group C4.407, “Lightning parameters for engineering applications (TB 549),” Paris, France, 2013.
- [14] R. H. Golde, “Lightning and tall structures,” *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 125, no. 4, pp. 347–351.
- [15] IEEE Std 1243-1997, “Guide for improving the lightning performance of Transmission Lines,” pp. 1–44, 1997.
- [16] IEEE Std 1410-2010, “IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines,” (*Revision IEEE Std 1410-2004*), pp. 1–73, 2011.
- [17] F. Napolitano, A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, F. Rachidi, J. Mahserejian, and J. Mahseredjian, “An advanced interface between the LIOV code and the EMTP-RV,” in *Proc. 29th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Uppsala, Sweden, 2008.
- [18] C. A. Nucci and F. Rachidi, “Interaction of electromagnetic fields generated by lightning with overhead electrical networks,” in *The Lightning Flash. 2nd Edition*, V. Cooray, Ed. IET - Power and Energy Series 69, 2014, pp. 559–610.
- [19] F. A. M. Rizk, “Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part I: Theory,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 1, pp. 162–71, 1994.
- [20] F. A. M. Rizk, “Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part II: Application,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 1, pp. 172–193, 1994.
- [21] H. Singer, H. Steinbigler, and P. Weiss, “A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 5, pp. 1660–1668, Sep. 1974.
- [22] T. Suzuki, K. Miyake, and T. Shindo, “Discharge Path Model in Model Test of Lightning Strokes to Tall Mast,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-100, no. 7, pp. 3553–3562, Jul. 1981.
- [23] F. Tossani, A. Borghetti, F. Napolitano, A. Piantini, and C. A. Nucci, “Lightning Performance of Overhead Power Distribution Lines in Urban Areas,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. pp, no. 99, p. in press, 2017.