

Capitolo 4

Impianti in Media Tensione

Gli impianti in MT sono quelli che operano a tensioni comprese tra 1 kV e 30 kV e vengono utilizzati per la distribuzione primaria dell'energia. I livelli di tensione in gioco sono ancora troppo alti per la distribuzione dell'energia ai piccoli utenti, la cosiddetta distribuzione secondaria, ma sono idonei per la distribuzione ai grandi utenti quali industrie, strutture ospedaliere e così via. In questo capitolo ci soffermeremo sulle linee in MT, che sono naturalmente il cuore di questi impianti. In particolare, analizzeremo i vari componenti delle linee quali sostegni, isolatori, cavi ed interruttori e passeremo in rassegna gli schemi comunemente adottati nella distribuzione primaria ponendo in evidenza i problemi di calcolo elettrico. Completeremo il capitolo esaminando una questione particolarmente sentita in questo tipo di impianti: la fulminazione indiretta.

4.1 Linee in media tensione

Nello studio delle linee elettriche, sviluppato nel capitolo dedicato all'Alta Tensione, eravamo giunti a rappresentare tratti relativamente brevi di linea per mezzo del doppio bipolo mostrato in Figura 4.1. Questo circuito costituiva una rappresentazione approssimata del comportamento di una linea in quanto, essendo un circuito a parametri concentrati, non modellava gli effetti propagativi tipici delle linee lunghe.

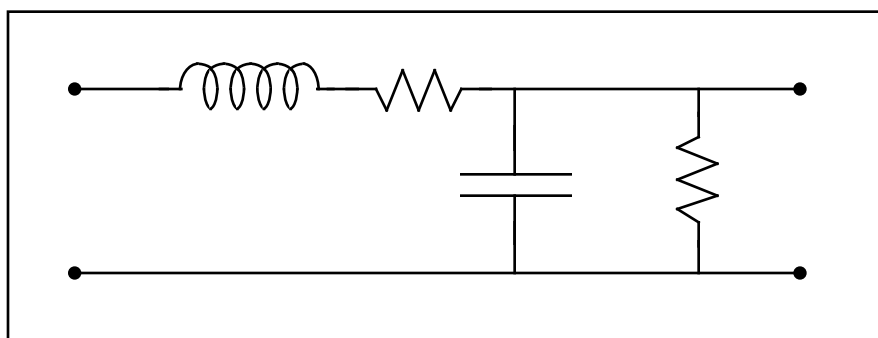


Figura 4.1: rappresentazione di un tratto di linea elettrica.

Le linee in MT hanno sempre lunghezze contenute per mantenere le cadute di tensione lungo la linea a valori accettabili. Quindi, in questo caso, si possono ritenere trascurabili i fenomeni di propagazione e considerare valida una

rappresentazione di quel tipo. Inoltre, i valori di tensione relativamente bassi ci consentono di trascurare anche gli elementi trasversali, la conduttanza e la capacità, riconducendoci al più semplice schema composto da una sola resistenza ed una reattanza induttiva, mostrato in Figura 4.2 nel dominio dei fasori.

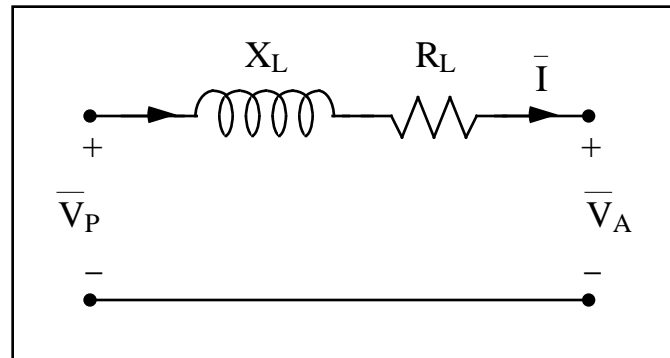


Figura 4.2: rappresentazione RL di una linea MT.

Naturalmente, anche in questo caso, R_L ed X_L rappresentano, rispettivamente, la resistenza e la reattanza del tratto di linea considerato ed i valori di tali parametri si calcolano con le formule o le tabelle che abbiamo introdotto nel capitolo dedicato all'Alta Tensione. La resistenza longitudinale di un tratto di una linea formata da **due conduttori**, di sezione S e lunghi L , posti in aria, vale

$$R_L = 2 \frac{L}{S},$$

mentre per la reattanza longitudinale, sempre nel caso di due conduttori, considerati a conducibilità finita, risulta sufficientemente accurata l'espressione

$$X_L = \frac{\mu_0 L}{2} \left(\ln \frac{d}{a} + \frac{1}{4} \right) = \frac{\mu_0 L}{2} \left(\ln \frac{d \sqrt{S}}{\sqrt{S}} + \frac{1}{4} \right),$$

dove 'd' rappresenta la distanza tra i conduttori di raggio 'a'. Spesso vengono fornite la resistenza e la reattanza chilometriche, cioè i valori di questi parametri formalmente attribuiti ad un chilometro di linea dell'unico conduttore di fase. Un valore tipico della reattanza chilometrica è 0.3 /km, per linee aeree, mentre, per linee in cavo, questa reattanza risulta molto piccola tanto che in alcune applicazioni viene assunta nulla. Per linee in cavo, a causa delle minori distanze in gioco, i valori della reattanza sono più piccoli e dipendono fortemente dalla disposizione dei conduttori: in pratica, ci si serve dei valori forniti dai costruttori per ogni tipo di cavo.

La formula riportata per la reattanza induttiva vale anche per le linee trifasi nel caso in cui i conduttori siano disposti simmetricamente ai vertici di un triangolo

equilatero. In caso contrario, la distanza 'd' sarà uguale alla media geometrica della distanza tra gli assi dei conduttori, cioè

$$d = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3} .$$

• Sostegni

I sostegni impiegati nelle linee elettriche in MT possono essere in legno, in ferro, in cemento armato centrifugato oppure in vetroresina.

I pali in legno sono preventivamente sottoposti a bagni in sostanze antisettiche per evitarne la putrefazione. Ciononostante la loro durata è decisamente limitata e trovano raramente impiego in applicazioni che superano i dieci anni di vita.

I sostegni in ferro possono essere a tubolare, vale a dire costituiti da un unico palo a forma di tubo, oppure a traliccio. Questi ultimi sono costituiti da quattro montanti ad L, uniti tra loro con ferri piatti mediante saldatura o chiodatura.

I sostegni in cemento armato sono decisamente i più utilizzati. L'armatura di questi sostegni è costituita da una serie di tondini di acciaio disposti longitudinalmente e collegati tra loro mediante fili ad elica; l'armatura così costituita viene collocata in una forma apposita, contenente cemento, che viene posta in rotazione: per effetto della forza centrifuga, il materiale si dispone lungo le pareti della forma, inglobando l'armatura e dando origine ad un palo provvisto di una cavità centrale. I pali in cemento possono raggiungere altezze davvero notevoli, fino a 18 metri.



Figura 4.3: esempio di sostegno in cemento armato.

I pali in vetroresina, infine, sono molto leggeri, ma costosi. Fino ad oggi li si trova solo in poche applicazioni.

• **Isolatori**

Gli isolatori in MT svolgono naturalmente la stessa funzione di quelli già esaminati per l'AT. Per tensioni non superiori ai 20 kV si impiegano isolatori rigidi, per tensioni superiori si impiegano isolatori a catena. Ogni elemento della catena garantisce un isolamento di 15 kV e precauzionalmente si pone un isolatore in più. Così, ad esempio, si impiegano catene con tre elementi per linee a 30 kV, come in Figura 4.3. Nelle linee in MT gli isolatori possono essere in vetro oppure in porcellana.

• **Conduttori**

Le linee in MT possono essere aeree oppure in cavo e materiali diversi vengono impiegati per realizzare i conduttori, sia delle une che delle altre. Il rame crudo viene normalmente impiegato in corde (il conduttore cordato è più flessibile e ciò agevola il montaggio sui pali e la successiva tesatura). I conduttori in alluminio sono solo raramente impiegati in quanto presentano caratteristiche meccaniche molto scarse.

Trova viceversa largo impiego l'aldray, una lega di alluminio con silicio e magnesio, che, come l'alluminio, è molto leggero, ma rispetto ad esso presenta ottime caratteristiche meccaniche. Si usano anche corde di alluminio ed acciaio, costituite da un'anima centrale di fili di acciaio attorno alla quale vengono collocati i fili di alluminio. All'acciaio è affidato il compito di resistere alle sollecitazioni meccaniche, mentre l'alluminio è utilizzato per la conduzione della corrente.

• **Interruttori**

Gli interruttori in MT che impiegano l'aria quale mezzo di estinzione sono di due tipi: a soffio magnetico e pneumatici.

Negli interruttori a soffio magnetico l'arco che nasce fra i contatti viene allontanato da questi mediante un campo magnetico prodotto dalla stessa corrente da interrompere e trasferito in una camera appropriata (Dejon), dove una serie di piastre ceramiche provvede ad allungarlo, a raffreddarlo ed a frazionarlo in brevi segmenti fino a provocarne lo spegnimento. Gli interruttori a soffio magnetico sono adoperati per tensioni fino a 24 kV.

Negli interruttori pneumatici l'arco viene interrotto da un getto d'aria a velocità supersonica che lo allunga, lo raffredda e provvede contemporaneamente alla sostituzione dell'aria ionizzata con altra fresca. L'energica azione ionizzante che ne consegue provoca l'estinzione dell'arco al primo passaggio della corrente per lo

zero: l'arco viene allungato in una colonna così sottile che trasmette rapidamente il calore alla massa d'aria circostante fredda e, quindi, si estingue.

Negli interruttori ad olio l'arco si forma appunto in olio, invece che in aria. Il calore dell'arco fa evaporare immediatamente l'olio circostante dissociandolo in carbonio ed in un considerevole volume di idrogeno allo stato gassoso ad alta pressione. Con l'espansione l'idrogeno si raffredda ed estingue l'arco. Si impiegano vari artifici per concentrare il gas idrogeno in fase di espansione sull'arco in modo da ottenere il massimo effetto estinguente, come camere destinate a racchiudere e disciplinare lo svolgimento dei fenomeni di interruzione.

Si usano pure gli interruttori ad esafluoruro di zolfo, dei quali abbiamo ampiamente parlato nel capitolo dedicato all'Alta Tensione. Vale la pena di ricordare qui che la molecola esafluoruro di zolfo mostra grande attitudine alla cattura 'rapida' di un elettrone libero, formando un pesante ione SF_6^- . Questo effetto, unito alle notevoli energie richieste per ionizzare le molecole dell'esafluoruro di zolfo e per dissociarle nei suoi componenti atomici, permette di ottenere ottimi risultati nella estinzione degli archi.

4.2 Schemi di distribuzione

Le strutture tipiche dei sistemi di distribuzione in MT, limitandoci alle configurazioni più significative, vengono qui di seguito elencate:

distribuzione radiale a sezione costante (Figura 4.4);

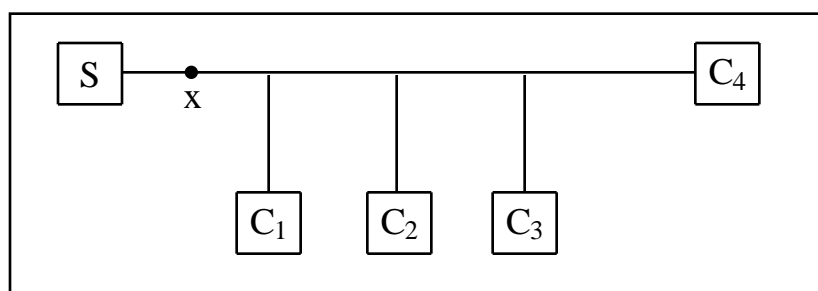


Figura 4.4: distribuzione radiale.

distribuzione radiale ramificata (Figura 4.5);

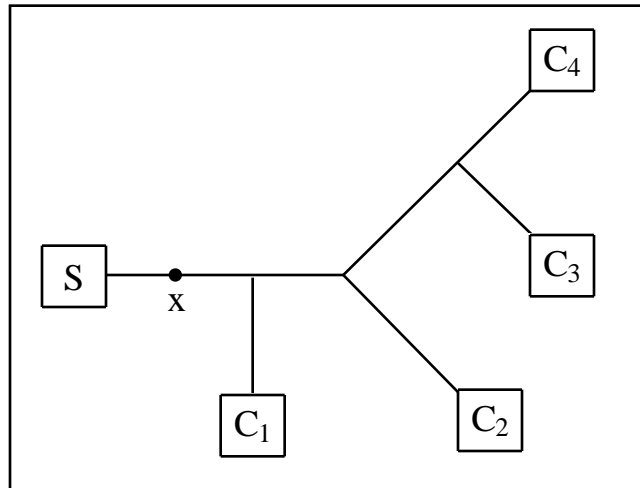


Figura 4.5: distribuzione radiale ramificata.

distribuzione ad anello a sezione costante (Figura 4.6);

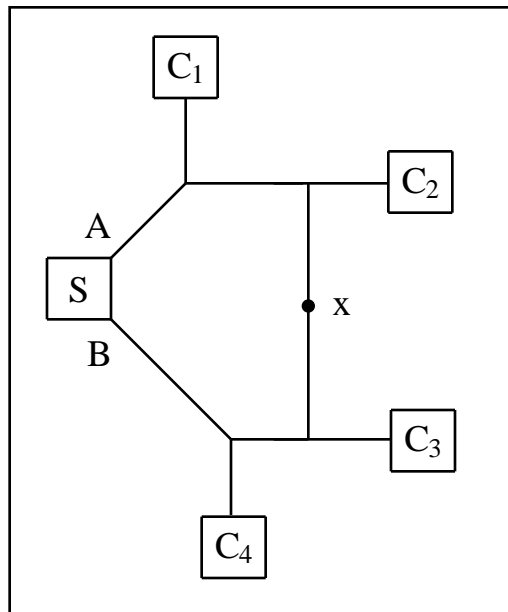


Figura 4.6: distribuzione ad anello.

distribuzione con cabina di trasformazione posta nel baricentro elettrico dei carichi (Figura 4.7).

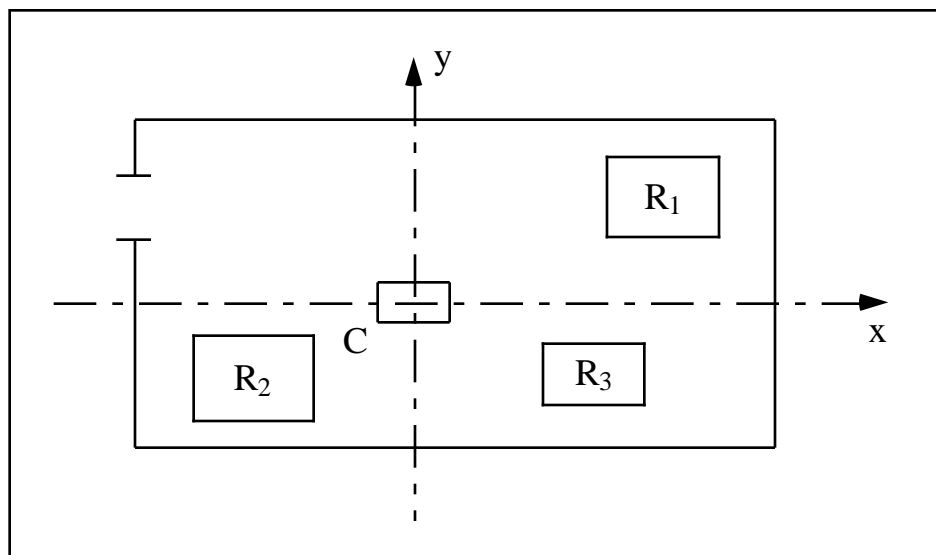


Figura 4.7: stabilimento industriale con tre reparti di lavorazione.

La distribuzione radiale a sezione costante prevede l'utilizzo, per l'impianto principale, non considerando cioè le derivazioni alle cabine, di un conduttore a sezione unica. Nello schema ramificato, i rami dell'impianto possono avere sezioni differenti. La distribuzione radiale, sia quella a sezione costante che quella ramificata, prevede che dalla stazione di trasformazione S parta la linea MT; da vari punti di questa vengono, poi, derivate le cabine C_1 , C_2 , C_3 e C_4 per l'ulteriore abbassamento del livello di tensione. Da un punto di vista affidabilistico questo schema è molto carente. Infatti, se si verifica un guasto nel primo tratto di linea (evidenziato dal punto 'x' nelle Figure 4.4 e 4.5), vengono ad essere disalimentate tutte le cabine e, quindi, tutte le utenze ad esse collegate. Lo stesso grave inconveniente si verifica nello schema radiale ramificato.

Lo schema ad anello, realizzato a sezione costante nella quasi totalità dei casi, supera egregiamente questi inconvenienti comportando però aggravii sia in termini di complessità realizzativa, sia in termini di costi. Il vantaggio è evidente: se si verifica un guasto in un qualsiasi tratto di linea, indicato anche qui con un punto 'x' in Figura 4.6, è possibile sezionare il tratto di linea guasto per eseguire le necessarie riparazioni, senza però disalimentare nessuna delle cabine dato che C_1 e C_2 sono alimentate da A, mentre C_3 e C_4 sono alimentate da B. Ovviamente, per consentire ciò, devono essere installati, sia a monte che a valle, dei punti di derivazione delle cabine dei sezionatori sotto carico.

Il baricentro elettrico dei carichi è il caso tipico degli stabilimenti industriali composti di più reparti di lavorazione. Si immagini, ad esempio, di avere tre reparti R_1 , R_2 e R_3 , come mostrato in Figura 4.7, e si indichi con C il punto di consegna dell'energia elettrica, punto coincidente con il centro del sistema di riferimento. Se (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) rappresentano le coordinate rispetto al

sistema di assi scelto ed A_1 , A_2 , A_3 le potenze apparenti di ciascun reparto, le coordinate del **baricentro elettrico** si determinano applicando le relazioni

$$x_B = \frac{x_1 A_1 + x_2 A_2 + x_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3}, \quad y_B = \frac{y_1 A_1 + y_2 A_2 + y_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3}.$$

Disponendo la cabina nel baricentro del sistema, si ottiene la massima riduzione della lunghezza dei cavi di alimentazione dei carichi e, di riflesso, la massima riduzione dei costi.

4.3 Calcolo elettrico delle reti di distribuzione

Calcolare elettricamente una linea oppure una rete di distribuzione significa determinare le sezioni dei conduttori a partire dall'imposizione di precise condizioni (calcolo preliminare) o verificare tali condizioni una volta assegnate le sezioni dei conduttori (calcolo di verifica). Per quanto detto nel paragrafo introduttivo, il calcolo elettrico va fatto nell'ipotesi di linee a costanti concentrate. Si tenga però presente che, nel caso particolare di reti in cavo a tensione superiore a 10 kV, il calcolo va eseguito come se si trattasse di una linea in AT con parametri uniformemente distribuiti. Le correnti da considerare nel calcolo elettrico sono quelle relative alle condizioni di carico massimo, tenendo conto, nel caso di più carichi, dei relativi fattori di contemporaneità. Il calcolo elettrico si effettua osservando i seguenti criteri:

- criterio della massima caduta di tensione (detto criterio elettrico);
- criterio termico;
- criterio del massimo tornaconto economico.

Esaminiamoli in qualche dettaglio.

Nelle reti di distribuzione è necessario che le sezioni dei conduttori siano tali che le variazioni di tensione fra le condizioni di massimo e minimo carico siano contenute entro limiti prefissati. Il motivo di questa limitazione sta nel fatto che sia le lampade, sia i motori sono sensibili alle suddette variazioni. Per le lampade ad incandescenza un aumento permanente di tensione del 5% ne riduce la vita utile a circa il 55%, viceversa una diminuzione della tensione del 5% porterebbe ad un aumento della vita ma, contemporaneamente, ad una riduzione del flusso luminoso a circa 83% del valore nominale. Anche le lampade a scarica, in presenza di oscillazioni della tensione, mostrano comportamenti anomali con variazione del flusso ed accorciamento della vita utile. Per sensibili riduzioni delle tensioni, le

lampade si spengono. Per i motori trifasi è noto che la coppia meccanica è proporzionale al quadrato della tensione, cosicché per una diminuzione della tensione del 5%, la coppia massima si riduce al 90% del suo valore nominale.

La corrente che attraversa i conduttori non deve superare determinati limiti, altrimenti si verificano pericolose situazioni di surriscaldamento. Per linee aeree, ammettendosi in genere una sovratemperatura del 40% rispetto ad una temperatura di riferimento dell'ambiente di 40 °C, si ammettono temperature dei cavi fino a 80 °C. La temperatura massima ammissibile per cavi isolati con materiali termoplastici è di 70 °C; per quelli isolati in gomma, varia tra 60 °C e 90 °C in funzione della qualità del materiale usato (gomma ordinaria, butilica); per quelli isolati con gomma siliconica, può arrivare fino a 180 °C; per quelli isolati con carta impregnata, infine, varia da 60 °C a 80 °C. La temperatura massima ambientale si assume di 30 °C per i cavi posati in aria (ad esempio su mensole) e di 20 °C per quelli interrati ad una profondità non inferiore a 0.8 m. Per i cavi sotterranei sono dunque ammesse sovratemperature maggiori e quindi, a parità di cavo, correnti più elevate del (20 - 30)%.

Il criterio del massimo tornaconto economico si basa sulle seguenti considerazioni. In una linea elettrica viene dissipata per effetto Joule una certa aliquota dell'energia trasmessa. Tale aliquota può essere ridotta se si adottano conduttori di sezione più elevata che comportano, però, un costo maggiore. Esiste un valore di sezione che permette di rendere minima la somma del costo annuale delle perdite e dei costi annuali (interessi ed ammortamenti) della linea, detta appunto sezione di massimo tornaconto economico.

Il calcolo elettrico viene, in definitiva, così sviluppato: si effettua il calcolo preliminare secondo uno dei tre criteri e si fa, poi, il calcolo di verifica secondo uno dei due rimanenti. A tal riguardo sono molto utili le osservazioni che seguono. Le condizioni di massima corrente ammissibile sono largamente soddisfatte nei conduttori aerei proporzionati in modo da avere una caduta di tensione (definita in dettaglio nel paragrafo che segue) inferiore al 5% e pertanto la verifica del riscaldamento non si effettua neanche. L'eccezione può essere rappresentata da linee aeree molto corte che, pur soddisfacendo il vincolo della massima caduta di tensione, possono manifestare sovratemperature superiori al limite prefissato. La verifica del riscaldamento è sempre obbligatoria per la scelta della sezione dei cavi. Nelle linee in MT, in cui si hanno buone possibilità per la regolazione della tensione, ad esempio variando il rapporto di trasformazione dei trasformatori interposti, il problema della caduta di tensione può risultare non vincolante e pertanto si può procedere al calcolo della sezione del conduttore seguendo criteri

economici. È evidente che una volta determinata la sezione con tale criterio economico, si calcolerà la caduta di tensione per sapere se è contenuta entro i limiti consentiti dalle regolazioni.

• Caduta di tensione

In questo paragrafo stabiliremo le relazioni che nelle linee e nelle reti forniscono la caduta di tensione (c.d.t.) in funzione della sezione dei conduttori. Tali relazioni consentono:

- » fissati i carichi, la loro ubicazione, la tensione del sistema e le massime c.d.t. ammissibili, di calcolare la sezione o le sezioni dei conduttori costituenti il sistema (calcolo preliminare);
- » nota la sezione o le sezioni dei conduttori, i carichi, la loro ubicazione e la tensione del sistema di verificare che nei punti prefissati non vengano superate determinate c.d.t. (calcolo di verifica).

Come si vedrà fra un attimo, durante il calcolo, si procederà a talune approssimazioni che risultano ampiamente giustificate dal fatto che nel calcolo preliminare ben di rado si potrà adottare la sezione effettivamente calcolata, poiché si sceglie per convenienza quella commerciale di valore immediatamente superiore a quella calcolata, mentre nel calcolo di verifica si può valutare entro certi limiti il valore della c.d.t. con elevati margini di approssimazione.

La c.d.t. è definita come la differenza tra i moduli delle tensioni in partenza e in arrivo alla linea. Consideriamo di nuovo la Figura 4.2. Abbiamo indicato con \bar{V}_A e \bar{V}_P i fasori rappresentativi delle tensioni in arrivo ed in partenza della linea, e con R_L e X_L la resistenza e la reattanza della linea, rispettivamente. Vale la seguente relazione:

$$\bar{V}_P = \bar{V}_A + (R_L + j X_L) \bar{I} ,$$

in cui \bar{I} è il fasore rappresentativo della corrente di linea.

Consideriamo, ora, la costruzione mostrata in Figura 4.8, in cui rappresenta la fase dell'impedenza (supposta di tipo ohmico-induttiva in figura) che termina il tratto di linea. Dalla figura, confondendo il punto D con C, ipotesi legata al fatto che la linea è costituita da buoni conduttori e, quindi, è caratterizzata da piccoli valori di R_L e di X_L , si ricava la seguente espressione approssimata della c.d.t., definita come la differenza tra i valori efficaci delle tensioni alla partenza ed all'arrivo:

$$V_P - V_A = \overline{OD} - \overline{OA} \quad \overline{OC} - \overline{OA} = \overline{AB} + \overline{BC} .$$

Poiché si può scrivere che

$$\overline{AB} = R_L I \cos \phi \quad \text{e} \quad \overline{BC} = X_L I \sin \phi \quad ,$$

la caduta di tensione diventa

$$V_P - V_A = R_L I \cos \phi + X_L I \sin \phi \quad .$$

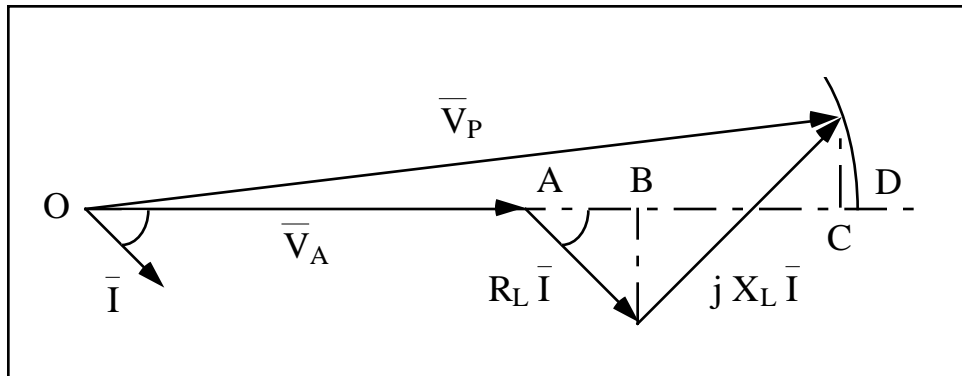


Figura 4.8: diagramma fasoriale per il calcolo della caduta di tensione.

Per una linea trifase, progettata per funzionare alla tensione nominale V_N , la c.d.t. percentuale si definisce rapportando tutto a questo valore, e precisamente si può scrivere come

$$V\% = 100 \frac{V_P - V_A}{V_N} .$$

Da quanto detto segue che essa vale, approssimativamente,

$$V\% \approx 100 \frac{R_L I \cos \phi + X_L I \sin \phi}{V_N} .$$

Per giungere ad una forma notevole della c.d.t. percentuale, consigliata pure dalle Norme, moltiplichiamo e dividiamo la relazione precedente per il valore efficace V_A , ottenendo

$$V\% \approx 100 \frac{V_A (R_L I \cos \phi + X_L I \sin \phi)}{V_A V_N} .$$

Indicando con P e Q la potenza attiva e reattiva all'estremità di arrivo, cioè

$$P = V_A I \cos \phi \quad \text{e} \quad Q = V_A I \sin \phi \quad ,$$

e confondendo, al denominatore, la tensione di arrivo V_A con la tensione V_N (che, se la linea è ben progettata, sono certamente quantità molto prossime), possiamo infine scrivere

$$V\% = 100 \frac{P R_L + Q X_L}{V_N^2} .$$

Questa relazione mette in evidenza che, nelle linee per le quali è trascurabile l'ammettanza trasversale, la c.d.t. percentuale è inversamente proporzionale al quadrato della tensione di esercizio e si compone di due addendi: il primo va attribuito al transito di potenza attiva, il secondo alla potenza reattiva assorbita all'estremità di arrivo.

Sottolineiamo, infine, che la formula ottenuta vale, così come è, anche nel caso di linee trifasi, pur di interpretare correttamente i termini della relazione, ed in particolare P e Q sono stavolta le potenze assorbite da un carico trifase, R_L e X_L sono relativi alla **singola fase** e la tensione nominale è da intendersi come il valore efficace della tensione concatenata.

Approfondiamo il calcolo della caduta di tensione studiando i casi più interessanti per le applicazioni tecnologiche.

A) Calcolo della caduta di tensione per linee a $\cos \phi = 1$ unitario.

- Linea con carico di estremità

Cominciamo a considerare il semplice schema di Figura 4.9.

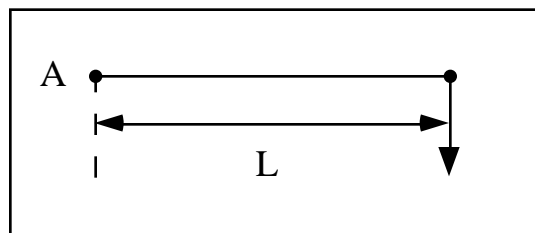


Figura 4.9: schema di linea con carico di estremità.

Nell'ipotesi di considerare un carico con $\cos \phi = 1$ (cosa che normalmente viene fatta quando si progetta un tratto di linea), abbiamo

$$V = R_L I = 2 \frac{L}{S} I = 2 \frac{M'}{S} ,$$

dove R_L è la resistenza totale della linea, posta a distanza L dalla sorgente A ed S la sezione. La quantità $M' = L I$ è detta *momento della corrente* I . La relazione precedente può essere scritta anche come

$$V = 2 \frac{L P}{S V} = 2 \frac{M}{S V},$$

dove, in analogia con quanto fatto per la corrente, si è indicato con $M = L P$ una quantità detta *momento della potenza attiva*. Queste due relazioni possono essere scritte anche in termini percentuali, nella forma

$$V\% = 100 \frac{V}{V_N} = 200 \frac{M}{S V_N} = 200 \frac{M}{S V V_N} M.$$

Ora, assumendo come in precedenza condizioni di funzionamento nominale, cioè posto che sia $V = V_N$, la precedente relazione diventa

$$V\% = 200 \frac{M}{S V_N^2},$$

da cui si ricava immediatamente la sezione

$$S = 200 \frac{M}{V_N^2 V\%} = 200 \frac{M'}{V_N V\%}.$$

- Linea con carichi distribuiti

Nella generalità dei casi si trova, però, uno schema più complicato, del tipo riportato in Figura 4.10, con più carichi lungo il percorso.

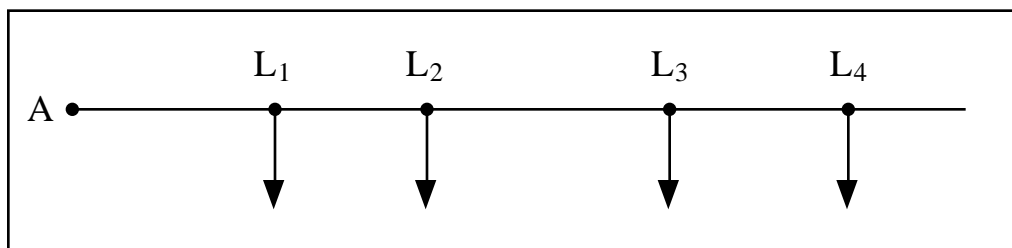


Figura 4.10: schema di distribuzione radiale.

Se si indicano con L_k le distanze relative dei singoli utilizzatori dalla sorgente A , I_k la corrente di ogni tratto di sezione S_k , applicando la relazione precedente, si può scrivere che

$$V = 2 \sum_{k=1}^N I_k \frac{L_k}{S_k},$$

dove N rappresenta il numero di carichi alimentati. Se, come avviene di solito, la linea è realizzata con conduttori di sezione costante, avremo

$$V = 2 \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N I_k L_k = 2 \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N M'_k,$$

che, in termini percentuali, diventa

$$V\% = 200 \frac{1}{S V_N} \sum_{k=1}^N M'_k,$$

da cui discende facilmente la formula per la sezione

$$S = 200 \frac{1}{V_N V\%} \sum_{k=1}^N M'_k.$$

- Linea a doppia alimentazione

Un'ulteriore situazione che si incontra nella pratica realizzazione è quella mostrata in Figura 4.11.

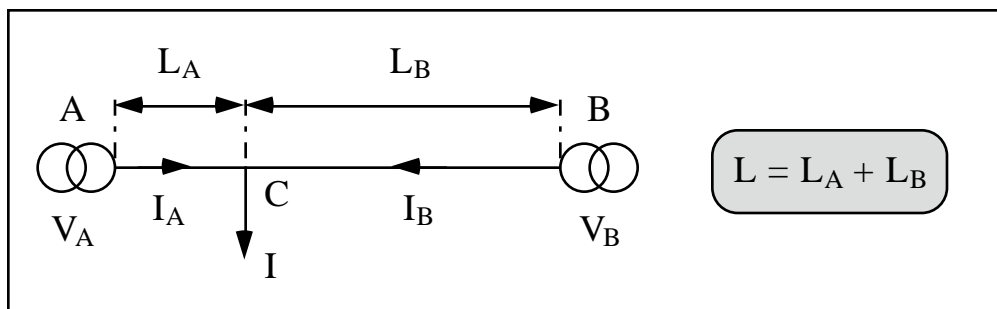


Figura 4.11: linea con doppia alimentazione.

Abbiamo, in questo caso, una linea di lunghezza \$L\$, con un unico carico che deriva corrente dalle due cabine poste alle estremità della linea. I secondari dei trasformatori delle due cabine A e B lavorano alla stessa tensione. Dal momento che le due cabine equipotenziali sono elettricamente coincidenti, i due tratti \$L_A\$ e \$L_B\$ risultano in parallelo tra i punti A (che coincide con B) e C. Risulta, pertanto, identica la c.d.t.

$$E_A = 2 \frac{L_A I_A}{S_A} = E_B = 2 \frac{L_B I_B}{S_B} .$$

Di norma le sezioni S_A e S_B dei due tratti sono le stesse e, quindi, la relazione precedente si semplifica come

$$L_A I_A = L_B I_B .$$

Ora, essendo

$$I = I_A + I_B ,$$

otteniamo le due relazioni di partizione

$$I_A = I \frac{L_B}{L_A + L_B} = I \frac{L_B}{L} , \quad I_B = I \frac{L_A}{L_A + L_B} = I \frac{L_A}{L} .$$

Una volta trovato il contributo di ciascuna delle due cabine, si possono applicare le regole di equivalenza per dividere la linea nel punto C, come mostrato in Figura 4.12, e ricondursi a due distinte linee alimentate a sbalzo.

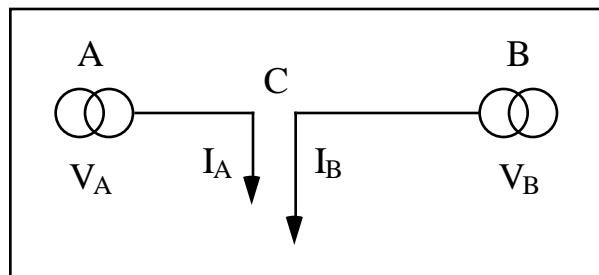


Figura 4.12: linea con doppia alimentazione in forma 'sdoppiata'.

Da questo punto in poi, ovviamente, lo studio è lo stesso delle linee con carico all'estremità.

B) Calcolo della caduta di tensione per linee a $\cos \phi$ minore dell'unità.

Per il *calcolo di verifica* in base alla relazione

$$V = R_L I \cos \phi + X_L I \sin \phi ,$$

si considera che la c.d.t. nella linea reale risulti dalla somma delle c.d.t. ricavabili dalla sovrapposizione di due sistemi fittizi, uno costituito dalle sole resistenze e

percorso dalle componenti in fase delle correnti e l'altro costituito dalle reattanze e percorso dalle componenti in quadratura delle correnti.

Per il *calcolo preliminare* il problema può essere notevolmente semplificato tenendo presente che la reattanza varia poco con la sezione del conduttore. Essa viene infatti inizialmente fissata a $0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$ per linee aeree e $0.1 \text{ } \Omega/\text{km}$ per linee in cavo. Il passo successivo è verificare che tale assunzione sia corretta mediante una procedura iterativa. Spieghiamoci utilizzando il caso della linea monofase con carico di estremità; la relazione che definisce la c.d.t., come abbiamo già detto, è

$$V = R_L I \cos \phi + X_L I \sin \phi .$$

Esplicitando la R_L e la X_L secondo quanto riportato nel primo paragrafo di questo capitolo, otteniamo

$$V = I \left[\frac{L}{S} \cos \phi + \frac{\mu_0 L}{2} \left(\ln \frac{d \sqrt{r}}{\sqrt{S}} + \frac{1}{4} \right) \sin \phi \right] .$$

Essendo V imposta, si tratta di risolvere un'equazione non lineare nella incognita S . I metodi per la risoluzione di queste equazioni sono di tipo iterativo: assegnata una prima approssimazione di tentativo della sezione, se ne ricava una seconda, poi una terza e così via, nella speranza di avvicinarsi sempre più alla soluzione dell'equazione. È opportuno segnalare che, normalmente, l'assunzione preliminare di $0.4 \text{ } \Omega/\text{km}$ per linee aeree e di $0.1 \text{ } \Omega/\text{km}$ per linee in cavo, risulta soddisfacente già al primo passo della iterazione.

Si badi bene che nella pratica impiantistica non si ricorre quasi mai alla procedura ora illustrata. Il problema viene risolto in modo differente. Si fa ricorso all'uso di tabelle: fissata la lunghezza del cavo, la caduta di tensione ammissibile ed il fattore di potenza $\cos \phi$, la tabella fornisce la sezione del cavo commerciale da utilizzare per i conduttori.

• Criterio termico

La potenza dissipata nei conduttori ne fa aumentare la temperatura che, se diviene eccessiva, può causare numerosi problemi. Si può avere, infatti, un aumento della resistività e con essa delle perdite ohmiche, una riduzione della vita dell'isolante nei cavi, un aumento della freccia nei conduttori aerei e così via. Abbiamo già fornito e discusso alcune indicazioni sulle massime sovratemperature ammissibili per le diverse situazioni che si verificano in pratica. In tali condizioni, se si suppone come è lecito di trascurare il calore emesso per irraggiamento, si può ammettere l'uguaglianza fra la potenza dissipata da un conduttore avente resistenza R e percorso da una corrente I , ed il calore disperso per convezione. Si ha, allora

$$R I^2 = k S T ,$$

in cui k , detto coefficiente di trasmissione del calore, rappresenta il numero di watt smaltiti dall'unità di superficie per ogni grado di sovratemperatura del conduttore in quelle condizioni, S è la superficie disperdente, T è la sovratemperatura rispetto all'ambiente. Da questa relazione, fissato un valore di sovratemperatura ammissibile, resta definita la massima corrente che il cavo, la sbarra o la linea aerea può trasportare con continuità (portata). Si noti tuttavia che il parametro k , che dipende da svariate quantità, tra le quali un ruolo importante occupano le condizioni in cui si trova il conduttore rispetto all'ambiente, risulta di difficile ed incerta determinazione teorica. Per tale ragione si preferisce ricorrere a tabelle che forniscono le portate dei cavi e dei conduttori nudi in funzione delle diverse condizioni.

Per il dimensionamento basato sul criterio termico si parte dal valore massimo di corrente che si presume transiti in modo duraturo nel cavo o nel conduttore nudo in esame e, per mezzo delle tabelle già citate che forniscono le portate ammissibili per i diversi tipi di conduttori e per le possibili situazioni di installazione, si vede quale deve essere la sezione da adottare (calcolo preliminare) o come si comporta la sezione adottata (calcolo di verifica).

Si noti che il criterio termico deve essere obbligatoriamente adottato (o nel calcolo preliminare o in quello di verifica) nel dimensionamento dei cavi.

• **Massimo tornaconto economico**

Per semplicità esamineremo il caso di una linea aerea con carico di estremità. La variazione del costo della linea con la sezione del conduttore non dipende solo da questa ma anche dalle modificazioni risultanti nei sostegni, nei vari accessori da impiegare ed eventualmente nel tipo di isolatore. Per una assegnata tensione nominale e nell'ambito delle unificazioni oggi esistenti, si può ammettere che la legge di costo sia linearmente collegata alla sezione, secondo una relazione del tipo

$$C = d + b S ,$$

dove 'd' e 'b' sono costanti ed S è la sezione del conduttore. Questo costo va sommato al costo dell'energia perduta. Il criterio del massimo tornaconto economico è in sostanza la determinazione del minimo di questo costo combinato, funzione della sezione S del conduttore.

4.4 Fulminazione indiretta

La fulminazione è, come è noto, quel fenomeno in cui condizioni meteorologiche particolari portano alla formazione di un canale, detto canale di scarica, facendo transitare in esso, in un tempo rapidissimo, grossi quantitativi di carica elettrica. La *fulminazione diretta* si ha quando il canale viene ad interessare direttamente l'oggetto, colpendolo. In questo caso, l'oggetto è attraversato dalla corrente di scarica e può esserne danneggiato, se non addirittura distrutto. La *fulminazione indiretta* si ha quando il fulmine non colpisce direttamente l'oggetto, nel nostro caso la linea, ma si abbatte ad una certa distanza da esso.

Analizziamo in qualche dettaglio cosa accade nel caso di linee in MT interessate a fulminazione indiretta. Al formarsi del canale di scarica, con il passaggio della corrente molto elevata, si genera un campo elettromagnetico che si propaga nello spazio; il campo elettromagnetico, viaggiando a velocità di pochissimo inferiore a quella della luce nel vuoto, raggiunge ben presto la linea, accoppiandosi elettromagneticamente ad essa. Sulla linea si sviluppano, allora, tensioni molto elevate, dell'ordine delle decine di kilovolt, che cominciano a viaggiare lungo la linea stessa. Se non si adotta alcuna misura per proteggere il sistema elettrico, le sovratensioni raggiungono le estremità della linea, attraversano i trasformatori MT/bt per poi raggiungere gli utilizzatori, procurando nella maggior parte dei casi danni davvero notevoli. Per evitare questi problemi, si installano alle terminazioni delle linee, in corrispondenza dei trasformatori dei dispositivi denominati scaricatori che ora esamineremo.

• Scaricatori

Gli scaricatori, o meglio gli scaricatori a resistenza non lineare, sono dei dispositivi che vengono collocati alle estremità delle linee per contenere le sovratensioni. Uno schema di posizionamento è riportata in Figura 4.13.

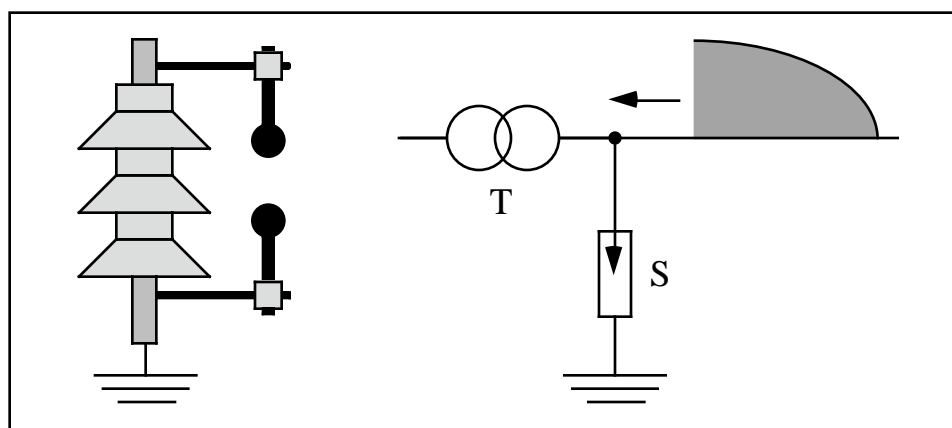


Figura 4.13: rappresentazione schematica e posizionamento dello scaricatore.

Un'onda di sovratensione, indotta ad esempio da una fulminazione, viaggia lungo la linea fino ad innescare un arco nello scaricatore S che protegge, in tal modo, la

stazione di trasformazione T. Si tratta, in sostanza, di resistori non lineari, la cui caratteristica tipica è riportata in Figura 4.14, la cui espressione analitica, che stabilisce la relazione tra tensione e corrente, è del tipo

$$I = I_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^N .$$

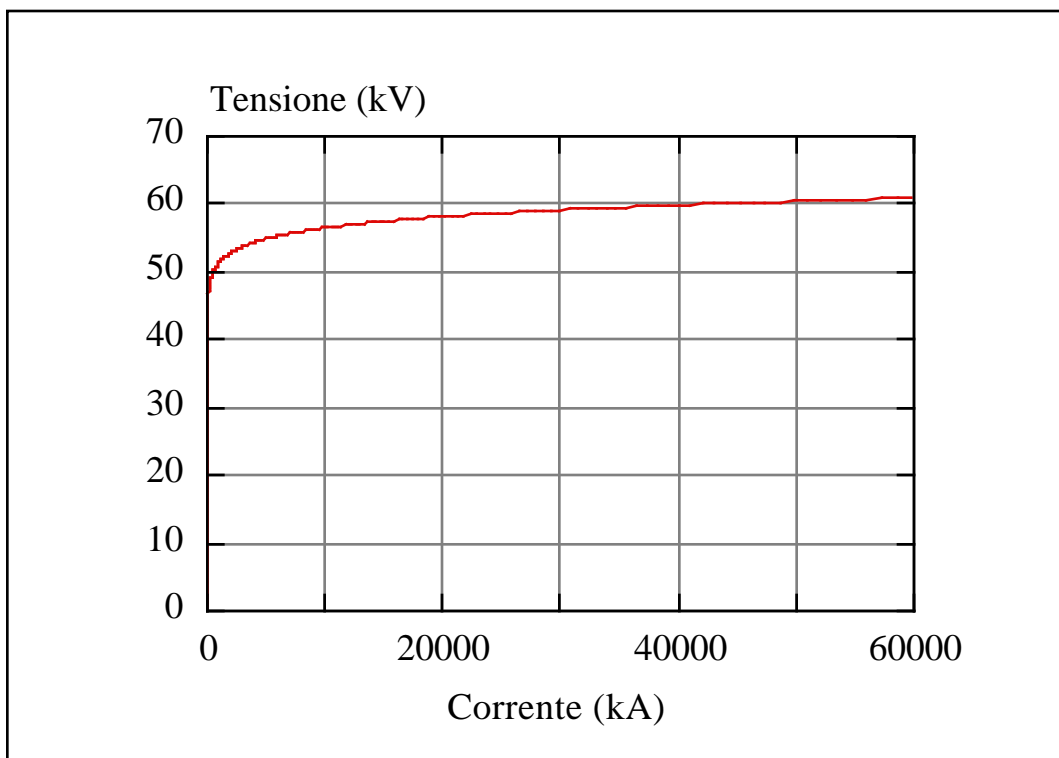


Figura 4.14: caratteristica statica di uno scaricatore per media tensione.

La Figura 4.14 è stata ottenuta adoperando i seguenti valori tipici per le costanti:

$$I_0 = 2.5 \text{ kA} , \quad V_0 = 40 \text{ kV} , \quad N = 24 .$$

Dall'esame della caratteristica statica si evince che quando un'onda di sovratensione sta per raggiungere la terminazione della linea, essa viene 'sentita' dallo scaricatore, che varia immediatamente la sua resistenza, drenando a terra una grande quantità di carica e contenendo entro limiti accettabili la tensione alla terminazione.

Per un corretto impiego degli scaricatori e per preservare le parti vitali e costose degli impianti dalle sovratensioni è di fondamentale importanza predisporre un razionale **coordinamento degli isolamenti**, cioè stabilire livelli di isolamento delle varie apparecchiature in modo da localizzare in determinati punti le scariche che si possono verificare in regime perturbato. A questo proposito va sottolineato che i materiali isolanti sopportano meglio le tensioni impulsive, anche di notevole intensità ma applicate per tempi brevi, che non le tensioni sinusoidali di ampiezza

ragionevolmente minore ma di lunga durata. In pratica, si stabiliscono tre livelli di isolamento: il livello di isolamento più basso viene, ovviamente, assegnato agli scaricatori, il livello intermedio all'isolamento esterno, affidato agli isolatori di linea, degli apparecchi di manovra o dei trasformatori, mentre all'isolamento interno, o delle macchine, viene assegnato il livello superiore. In tal modo, quando una linea viene colpita da un fulmine, scaricano per primi gli scaricatori, poi eventualmente gli isolatori esterni e solo per ultimi, ma possibilmente mai, gli isolanti interni delle macchine.

• Effetto delle funi di guardia

Nelle linee in MT italiane non si adotta la fune di guardia. In alcuni paesi, quali ad esempio gli Stati Uniti, gli impianti in MT prevedono l'adozione della fune di guardia allo scopo di 'catturare' i fulmini, proteggendo i conduttori posti più in basso rispetto ad essa. Le funi di guardia non hanno, però, un benefico effetto solo nei confronti della fulminazione diretta, ma presentano un considerevole vantaggio anche nel caso di fulminazione indiretta, quando cioè il fulmine si abbatte ad una certa distanza dalla linea.

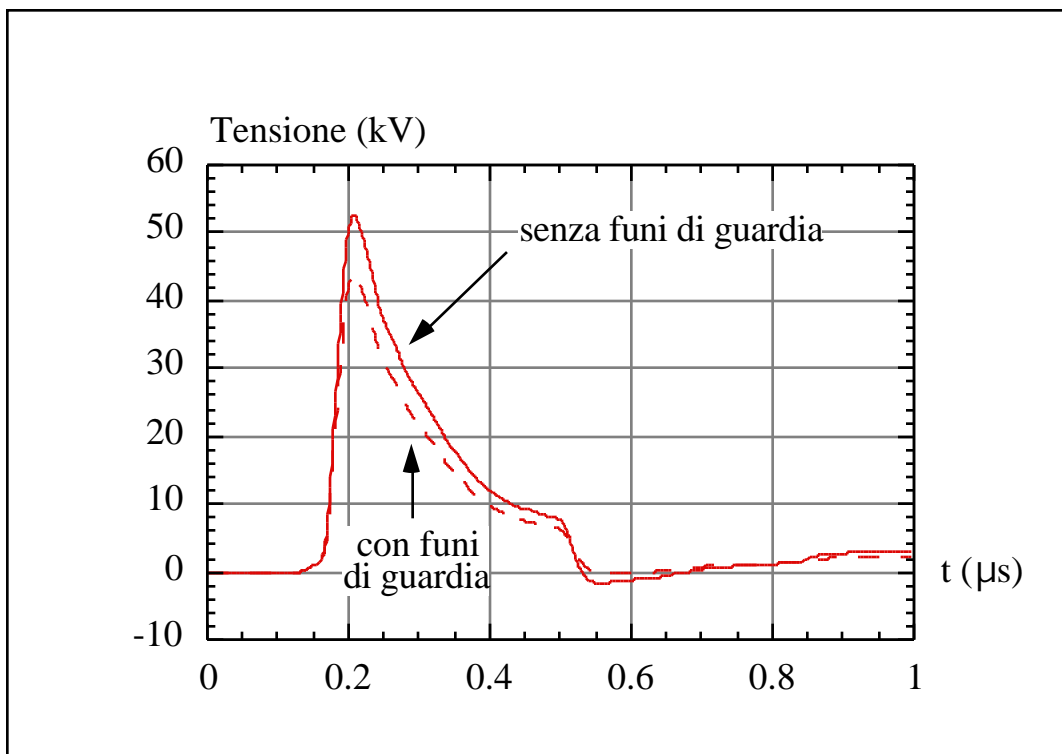


Figura 4.15: effetto schermante delle funi di guardia per fulminazione indiretta.

Nel caso di fulminazione indiretta, infatti, la fune di guardia ha un effetto 'schermante': le sovratensioni che si manifestano in seguito alla fulminazione risultano più contenute su una linea che presenta fune di guardia rispetto a quelle che si verificherebbero su una linea gemella, sprovvista però della fune di guardia.

È istruttivo mostrare questo confronto, rappresentato in Figura 4.15, dove sono state riportate le tensioni su una tipica linea MT (linea continua) e sulla sua gemella provvista di fune di guardia (tratteggiata).

Più precisamente abbiamo considerato una linea trifase, chiusa su terminazioni adattate da entrambe le estremità, a 50 m dalla quale supponiamo si verifichi una fulminazione; i tre conduttori erano posti in un piano parallelo al suolo, ad una distanza da esso di 10 m, mentre le due funi di guardia erano poste in un altro piano al di sopra dei tre conduttori di fase. La tensione riportata nel grafico è la tensione indotta nel conduttore centrale ad una delle due estremità. L'effetto schermante, consistente in una tensione di una diecina di chilovolt in meno nell'istante di massimo, appare evidente.

Appendice: la fulminazione

Nelle religioni di tutti i popoli primitivi, i fenomeni naturali più violenti, quali terremoti, trombe d'aria, eruzioni vulcaniche, piogge intense ed aridità, venivano interpretati come manifestazioni dell'ira di una qualche divinità: non sfuggiva a questa regola il fulmine, associato a grandi divinità anche presso i popoli colti, come il greco Zeus oppure il germanico Thor. Gli Etruschi, poi, erano convinti di riuscire, attraverso l'osservazione diretta dei fulmini, a decifrare la volontà divina ed a dedurre il futuro scorrere degli eventi.

La rivoluzione scientifica, che da G. Galilei in poi portò all'indipendenza della filosofia naturale dalle discipline più propriamente teologiche, condusse gli scienziati ad interessarsi di questi violenti fenomeni naturali, nel chiaro intento di comprenderli e, laddove possibile, di controllarne gli effetti. Tuttavia, fu solo nel XVIII secolo che venne a maturarsi una sensibilità verso i fenomeni elettromagnetici, tanto che, intorno al 1750, B. Franklin portò all'attenzione della comunità scientifica la somiglianza tra le scariche temporalesche e le scintille elettriche, ideando un esperimento che condusse all'invenzione del primo parafulmine: egli fece volare un aquilone a cui aveva legato una chiave metallica che, colpita da un fulmine, si caricava elettricamente.

• Le prime osservazioni

In passato, per misurare l'entità dell'esposizione ai fulmini di una data località, si contavano i giorni in cui i tuoni potevano udirsi in un determinato luogo: infatti, al crescere del loro numero, cresce anche il numero di temporali che interessano la località. Purtroppo, la semplicità di questo metodo non permetteva di poter distinguere tra i fulmini che si sviluppavano tra le diverse nuvole e quelli che si sviluppavano tra nube e terra: sono questi ultimi a provocare i danni più seri. Con il progredire delle conoscenze scientifiche si è passati a misurare il numero di cambiamenti del campo elettrico atmosferico causati da un fulmine mediante strutture di antenne e contatori: se si riesce a distinguere tra le variazioni indotte dai fulmini a terra e quelle dovute ai fulmini fra nuvole, cosa che risulta comunque difficile da farsi, è possibile misurare l'entità dell'esposizione ai fulmini di una data località.

È evidente che maggiore è il numero di giorni di temporale, più alto è il numero stesso dei fulmini e più violento è il loro effetto. A causa della variabilità delle attività temporalesche nel tempo, tuttavia, occorrono molti anni, se non decenni, per poter disporre di statistiche adatte alla misura. Inoltre, per una data zona, l'esposizione effettiva può differire anche notevolmente dal valore medio offerto dalle misure.

Le prime rilevazioni della corrente di un fulmine furono effettuate mediante barre di acciaio magnetiche, dette vincoli magnetici: si aspettava che venissero colpite dalla scarica elettrica e, dalla misura della loro magnetizzazione residua, si risaliva al picco di corrente. L'accuratezza di tali misure era molto limitata e le cose non sono migliorate fin quando non è stato possibile ottenere l'intera forma d'onda della corrente, visualizzata e registrata con un oscilloscopio: solo allora si è potuto ricavare quelle informazioni necessarie alla formulazione di modelli matematici della corrente del fulmine ed alla stesura di statistiche riguardanti la scarica ed il numero di colpi di cui si compone un fulmine.

In effetti, grazie a tecniche di tipo fotografico, già all'inizio del XX secolo si è scoperto che la scarica di un fulmine si compone di diversi colpi che si susseguono rapidamente: ad una prescarica (step leader), che dalla nuvola interessata si avvicina a terra, si succedono prima un fulmine principale, e poi diversi fulmini secondari. Tali ricerche hanno, inoltre, mostrato che più elevata è la corrente del fulmine, maggiore è la probabilità che esso raggiunga gli oggetti a terra: per questo, un parafulmine è capace di convogliare meglio fulmini caratterizzati da forti correnti, assicurando in tal modo una buona protezione.

Per determinare il grado di esposizione si è fatto poi ricorso a sistemi di localizzazione dei fulmini, attrezzando opportune stazioni a terra con due antenne perpendicolari per il rilevamento del campo elettromagnetico irradiato dalle scariche: mediante due di tali stazioni è possibile determinare la posizione del fulmine. L'accuratezza della misura può essere incrementata registrando il ritardo tra l'arrivo del fulmine a terra e l'arrivo del campo alle stazioni. La separazione del contributo dei fulmini a terra da quello dei fulmini tra nuvole viene effettuato mediante una discriminazione tra le forme d'onda ricevute.

Oggi vengono utilizzati anche sistemi di monitoraggio satellitari, utili non solo per studiare le caratteristiche statistiche dei fulmini, ma anche per valutarne in tempo reale gli eventuali danni.

• I sistemi di protezione da fulmine

La corrente trasportata da un fulmine può raggiungere valori tanto elevati (mediamente 2 kA) che ogni evento di fulminazione diretta si tramuta in distruzione per le persone o le cose colpite: non stupisce, allora, che fin dagli albori degli studi sulle scariche atmosferiche si sia cercato di progettare degli opportuni meccanismi di protezione. Già nel 1753 B. Franklin propose di montare sugli edifici un parafulmine, ovvero un'asta metallica verticale capace di intercettare i fulmini, in maniera da drenare a terra, mediante un conduttore di discesa, la corrente ad essi associata, salvaguardando l'incolumità delle cose e delle persone nell'edificio sul quale il parafulmine era montato: giunse a questa conclusione riflettendo sui risultati del suo famoso esperimento del 1752, quando fece volare un

aquilone, poi colpito da un fulmine. Nel 1866 J. C. Maxwell sponsorizzò come sistema di protezione la gabbia di M. Faraday, uno schermo elettrostatico costituito da una fitta rete di maglie metalliche e sostenuto da piedi isolanti, che ha lo scopo di proteggere i corpi situati al suo interno da eventuali campi elettrici esterni. Infatti, Faraday scoprì che le cariche elettriche si raccolgono sempre all'esterno di oggetti conduttori cavi. Questa proprietà spiega tra l'altro perché durante un temporale le automobili sono luoghi sicuri: se un fulmine le colpisce, esso viaggia sulla superficie esterna verso terra ed all'interno del veicolo non c'è pericolo, a meno che non si tocchino parti metalliche in contatto con l'esterno. In ogni caso, non c'è alcun bisogno che lo schermo elettrostatico sia completamente chiuso: è stato dimostrato, infatti, che il campo, dovuto ad una distribuzione di cariche esterne alla gabbia di Faraday, penetra attraverso le sue maglie soltanto per una distanza pari a qualche passo della maglia.

Questi meccanismi di protezione, nati come alternativi, vengono al giorno d'oggi usati in combinazione, al fine di incrementare il livello di sicurezza, ed un **sistema di protezione**, anche detto LPS, acronimo di Lightning Protection System, è generalmente costituito da un impianto esterno ed uno interno.

L'**impianto esterno** è deputato di intercettare, mediante opportuni captatori ad asta oppure a maglia, le scariche atmosferiche e di drenare a terra la relativa corrente mediante adeguati conduttori. La funzione principale dei captatori è quella di creare un volume protetto, inteso come una zona che non può essere colpita da fulmini. Il captatore ad asta è costituito da una o più aste metalliche, poste sulla sommità di edifici con ridotto sviluppo orizzontale. Il captatore a maglia consiste in una gabbia metallica posta intorno all'edificio, per mezzo di piattine o tondi di ferro o rame, per proteggerlo completamente; i percorsi devono essere quanto più possibile rettilinei ed i cambi di direzione devono avvenire senza spigoli o curvature a piccolo raggio. La protezione è tanto più efficace, quanto più strette sono le maglie e più distanziate dal fabbricato, senza dimenticare, tuttavia, considerazioni di carattere estetico.

L'**impianto interno** si compone di un sistema equipotenziale ed una opportuna schermatura, in modo da mitigare anche i disturbi dei campi elettromagnetici irradiati da fulmini vicini, i quali possono danneggiare seriamente la circuiteria elettronica. Quando l'impianto esterno viene colpito da un fulmine, per un brevissimo intervallo di tempo, l'impianto parafulmine si porta ad un potenziale molto elevato ed è percorso da forti correnti; ciò crea una considerevole differenza di potenziale tra impianto e struttura protetta, che può avere come conseguenza l'induzione di elevate sovratensioni e scariche elettriche all'interno del fabbricato, anche se questo non è stato direttamente colpito dal fulmine. L'impianto interno serve essenzialmente a limitare queste sovratensioni indotte e, nel contempo, ad evitare che scariche elettriche interessino parti interne del volume protetto.

È evidente, poi, che un sistema di protezione, collegato ad un impianto di terra, capta il fulmine riducendone gli effetti dannosi, ma non impedisce la scarica. Le norme CEI 81 - 1 prevedono quattro categorie di impianti di protezione, cui corrispondono i livelli di protezione (P) dati nella tabella seguente.

Categoria di impianto	P (%)
I	98
II	95
III	90
IV	80

Nel corso degli anni si è tentato inutilmente di migliorare le prestazioni dei parafulmini, inserendo placature d'oro in cima alle barre di Franklin ed appuntandone l'estremità superiore, realizzandoli con materiali radioattivi o dotandoli di diversi elettrodi ausiliari.

Per simulare gli effetti della scarica di un fulmine su un oggetto di prova, quale un parafulmine, si è fatto sovente ricorso a prove nei laboratori di alta tensione, la cui accuratezza risulta però estremamente limitata: in effetti, durante queste prove, le distanze in gioco vengono notevolmente ridotte, la distribuzione del campo è alterata dalla geometria della struttura e le proprietà di conducibilità del leader artificiale risultano molto più piccole che non in natura. Senza contare il fatto che in laboratorio possono essere riprodotti solo i fulmini negativi, vale a dire fulmini in cui si ha un trasporto di cariche negative, che, seppur i più comuni in natura (sono all'incirca il 90% del totale), causano danni molto più limitati dei fulmini positivi, essendo questi ultimi interessati da correnti maggiori.

Più efficaci sono, ovviamente, le prove su campo, anche se risultano poco pratiche allorquando si chiedono risultati accurati: volendo vagliare una grande casistica di correnti, da pochi chiloampere a centinaia di chiloampere, sia per fulmini negativi che per fulmini positivi, è necessario disporre di un tempo di misura apprezzabilmente lungo.

Infine, nel progettare un impianto parafulmine, si deve tenere in debito conto del coefficiente ambientale (C), che dipende dalle strutture che circondano l'edificio che si vuole proteggere e dalle caratteristiche orografiche della zona: un valore basso di questo coefficiente vuol dire che la struttura è situata in un'area con presenza prevalente di strutture di altezza uguale o maggiore; un valore alto, invece, implica la considerazione di una struttura isolata, posta sulla sommità di una collina o di una montagna.

• I fenomeni elettrici dell'atmosfera

Una piccola frazione delle molecole dei gas atmosferici risulta sempre ionizzata, a causa dei raggi X e dei raggi ultravioletti provenienti dal Sole, dei raggi cosmici e delle radiazioni dovute alle sostanze radioattive contenute nelle rocce della crosta terrestre. Ciò significa che l'aria della nostra atmosfera presenta una seppur minima conducibilità. Ebbene, gli esperimenti condotti da Hess nel 1912 evidenziarono che il grado di ionizzazione dell'aria, e con esso la conducibilità, cresce con l'altezza, in primo luogo perché viene esaltato l'effetto dei raggi cosmici, e poi perché, diminuendo la densità dell'aria, aumenta il cammino libero medio degli elettroni liberi e, quindi, diminuisce la probabilità di collisione tra ioni positivi ed elettroni. All'altezza di circa 50 km dal suolo la conducibilità cresce tanto da creare uno strato sferico conduttore, denominato di **elettrosfera**.

Più in alto, a partire da (60 ÷ 80) km, si trova uno strato ad altissimo grado di ionizzazione, detto **ionosfera**, che è importantissimo per le telecomunicazioni, essendo in grado di riflettere a terra le onde radio di opportuna frequenza.

Al di sopra dei 500 km, invece, il grado di ionizzazione è così basso che diventa significativo il campo magnetico terrestre, prodotto dallo spostamento di cariche all'interno della Terra, presumibilmente nel suo nucleo, la cui intensità media è $B = 50 \mu\text{T}$ ed i cui poli magnetici sono approssimativamente coincidenti con quelli geografici; questa zona di atmosfera prende il nome di **magnetosfera** ed assume una caratteristica forma a goccia a causa dell'interazione col vento solare.

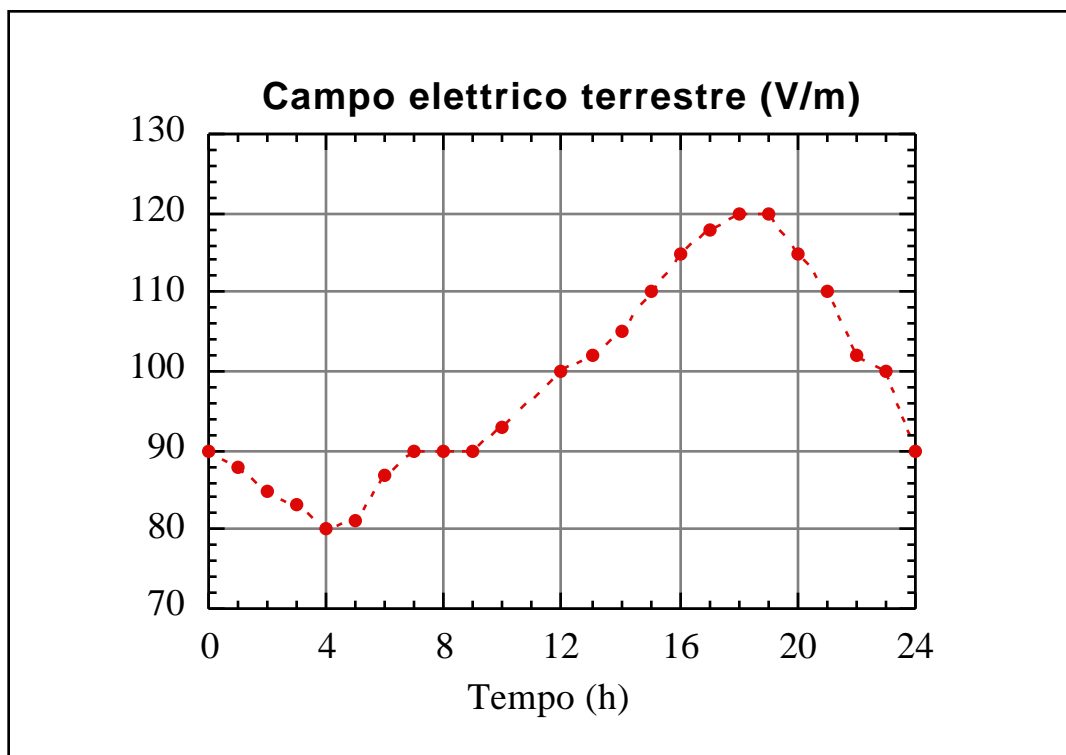


Figura A.1: andamento giornaliero del campo elettrico terrestre.

Tra l'elettrosfera ed il suolo terrestre esiste un campo elettrico verticale, orientato verso il basso, la cui intensità decresce con l'altezza, ma il cui valore medio in prossimità della superficie terrestre è di circa $E = 100 \text{ V/m}$. Quindi, l'elettrosfera risulta carica positivamente e la superficie terrestre è sede di una carica negativa, distribuita con densità superficiale dell'ordine di

$$= \epsilon_0 E = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 100 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{nC}}{\text{m}^2}.$$

In realtà, il campo elettrico terrestre subisce delle fluttuazioni giornaliere, variando da un minimo di circa 80 V/m alle ore 4:00 G.M.T. (Greenwich Meridian Time) ad un massimo di circa 120 V/m alle ore 19:00 G.M.T., come mostra la Figura A.1.

Questi discorsi valgono, ovviamente, in condizioni di bel tempo ed in relativa assenza di impurità: anche queste ultime, infatti, possono ionizzarsi mediante la cattura delle cariche degli ioni atmosferici, ma, essendo molto più pesanti, esibiscono una mobilità più ridotta, facendo diminuire la conducibilità dell'aria. In regioni altamente industrializzate il campo elettrico terrestre può così raggiungere valori fino a 400 V/m .

Per effetto del campo elettrico terrestre, la zona di spazio tra elettrosfera e suolo è sede di una corrente elettrica positiva, verticale e discendente, di densità $1 \mu\text{A/m}^2$, capace di scaricare la Terra in circa mezz'ora. Ci si può chiedere, allora, che cosa ripristini continuamente la carica negativa della superficie terrestre: oggi si pensa che tale ruolo sia svolto dai fulmini, in grado di trasferire dalle nubi al suolo grosse quantità di carica negativa, considerando che su tutta la Terra si hanno circa 300 temporali al giorno.

• I temporali

Una generica formazione temporalesca può essere suddivisa in un certo numero di celle elementari, vicine ma indipendenti, le quali sono sedi degli stessi fenomeni, anche se in tempi differenti. È noto che la temperatura dell'atmosfera, almeno nei primi chilometri, decresce con l'altezza, e ciò non produce, in condizioni normali, moti convettivi ascensionali di aria calda: infatti, durante la salita, l'aria si raffredda di più degli strati d'aria che dovrebbe incontrare, per effetto di un'espansione adiabatica. In realtà, le dimensioni in gioco sono così grosse da non dare il tempo di coinvolgere scambi di calore significativi e, per questo, si è parlato di espansione adiabatica.

Le cose cambiano se il grado di umidità dell'aria calda è elevato: durante la risalita essa si raffredda facendo condensare il vapor d'acqua che contiene e liberando il calore latente di evaporazione. Questo calore, riscaldandola, alimenta l'ascensione, facendo sì che incontri strati sempre più freddi. In tale fase, la forza della corrente

ascensionale impedisce alle minute goccioline d'acqua di precipitare al suolo. Contemporaneamente, questo moto convettivo trascina verso l'alto anche grossi strati d'aria laterali, che hanno l'effetto di raffreddare un po' la bolla d'aria umida. La corrente ascendente, che raggiunge i 100 km/h, arriva a (10 ÷ 15) km di altezza: qui le goccioline d'acqua vengono raffreddate al di sotto di 0 °C, rimanendo ciononostante allo stato liquido, ovvero sopraffuse, fin quando non incontrano delle impurità che danno inizio al processo di cristallizzazione; solo a questo punto si formano i primi pezzi di ghiaccio, che tendono a riunire la rimanente acqua liquida. Quando le particelle di ghiaccio diventano abbastanza pesanti, non possono più essere trattenute dalla corrente ascendente ed iniziano a precipitare verso il basso, trascinando un po' d'aria e dando vita ad una fredda corrente discendente; nel loro percorso, incontrando zone a temperatura più elevata e grazie all'attrito con l'aria, questi pezzi di ghiaccio possono liquefarsi dando luogo alla pioggia. È facile convincersi che questo moto di discesa dell'aria non più umida, una volta avviato, si autosostiene, in quanto essa sarà ben presto più fredda di quella circostante: è così che si forma il vento freddo che precede la caduta della pioggia. Quando inizia la precipitazione, insorgono anche i fenomeni elettrici a cui siamo interessati. Dopo un tempo di circa un'ora, la corrente ascensionale si ferma, in quanto non c'è più aria calda che l'alimenta, ed il tutto finisce con l'esaurirsi della pioggia: la nuvola verrà dispersa dai venti che imperversano alle grosse altezze.

• Il meccanismo di separazione delle cariche

Esperimenti di vario genere, effettuati anche con voli di aeroplani attraverso i temporali, hanno evidenziato che la carica in una cella temporalesca si distribuisce in un ben preciso modo: la vetta della nuvola, a (6 ÷ 7) km dal suolo, ha una carica positiva dell'ordine di (10 ÷ 100) C, mentre la base, a (3 ÷ 4) km dal suolo, ne ha una negativa di valore pressoché uguale, eccetto che una piccola regione di carica positiva, di valore generalmente trascurabile, e la cui presenza non è stata ancora pienamente giustificata (Figura A.2).

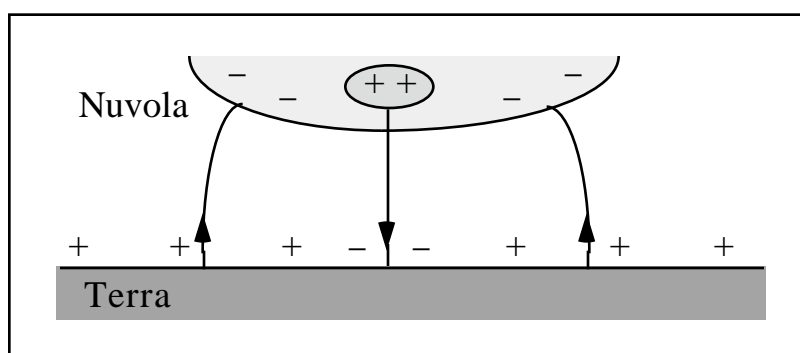


Figura A.2: distribuzione delle cariche in una nube.

La differenza di potenziale fra nuvola e terra può raggiungere anche $(20 \div 100)$ MV. Allorché essa vince la rigidità dielettrica dell'aria, si creano gigantesche scariche ad arco. Le cariche negative alla base della nuvola vengono così portate a terra: ogni fulmine trasporta una carica di circa $(20 \div 30)$ C. Dopo circa 5 secondi il temporale ha ricostruito le proprie condizioni iniziali ed è pronto a produrre un altro colpo.

Non è ancora ben chiaro il meccanismo che porta alla separazione delle cariche in una formazione temporalesca. La teoria più attraente è dovuta a Wilson: un pezzo di ghiaccio oppure una goccia d'acqua che precipita al suolo nel campo elettrico terrestre acquista un momento dipolare indotto che carica negativamente la sua parte alta e positivamente quella bassa; i grossi ioni positivi presenti nell'aria sono respinti dalla parte positiva e non possono unirsi a quella negativa perché trascinati via dalla corrente ascendente prodotta dal moto relativo delle particelle d'acqua e dell'aria (la cosa funziona se il moto degli ioni è tanto lento da poterli considerare fermi rispetto all'aria, ovvero se hanno una massa cospicua). Viceversa, i grossi ioni negativi sono catturati dalla parte positiva della goccia, che acquista così una carica negativa. In sintesi, delle cariche negative sono trasportate nella parte inferiore della nuvola dai pezzi di ghiaccio in caduta, mentre delle cariche positive sono trasportate nella parte superiore della nuvola dalle correnti ascensionali. Questo modello è, però, incompleto, in quanto la concentrazione in aria di grossi ioni non è tale da produrre la carica totale misurata: per questo, devono esserci altre sorgenti di grossi ioni. In effetti, l'iniziale separazione delle cariche può produrre intensi campi elettrici locali che ionizzano alcuni atomi; gli elettroni strappati, una volta accelerati, urtando con degli atomi neutri, ne provocano la ionizzazione e quindi l'estrazione di altri elettroni: mediante questo processo di ionizzazione a valanga si producono delle scariche a pennello ed un certo numero di esse possono far accumulare la quantità sufficiente di ioni.

Grazie ai fulmini, le cariche negative così prodotte vengono scaricate a terra, mentre quelle positive sono trasportate in alto fino ad uscire dalla nuvola e penetrare nell'elettrosfera.

• **La fisica del fulmine**

Lo spazio compreso tra le nubi, la cui parte inferiore è di solito carica negativamente, ed il terreno, carico quindi positivamente, è sede di un intenso campo elettrico: se questo raggiunge il valore critico, ha origine il fenomeno noto come scarica del fulmine. La scarica può svolgersi entro la stessa nuvola, fra nuvole diverse, fra una nube e l'aria circostante o fra una nube ed il suolo: i danni maggiori, però, sono provocati proprio da queste ultime, per cui sono quelle di cui ci occuperemo.

A seconda che il campo critico si raggiunga prima in prossimità della nube oppure in prossimità del suolo, si può avere una scarica discendente oppure ascendente: le prime sono più comuni, in quanto favorite dalla rarefazione atmosferica. In tal caso, dalla parte inferiore della nube si sviluppa, come mostrato in Figura A.3, una iniziale scarica discendente (step leader), non molto brillante, che rapidamente assume le dimensioni di un canale ramificato, pieno di cariche provenienti dalla nuvola. Esso si precipita verso terra ionizzando l'aria circostante e rendendola conduttrice. Il canale è costituito da un nucleo altamente conduttore del diametro di 1 cm circa, circondato da un involucro di carica spaziale della stessa polarità della nube, con raggio dell'ordine di $(1 \div 10)$ m.

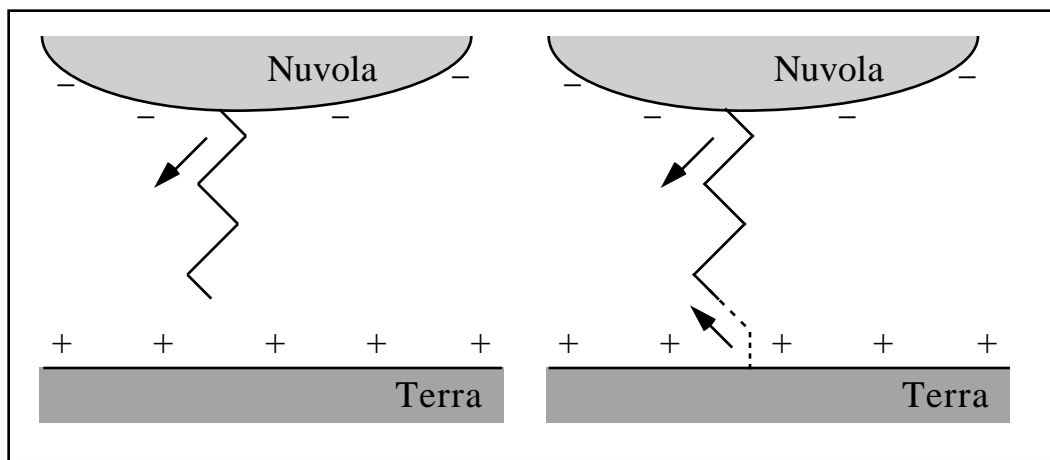


Figura A.3: evoluzione di una scarica temporalesca.

Soprattutto nei primi stadi, il canale procede a zig-zag, poiché la direzione di avanzamento è determinata di volta in volta dalle mutevoli condizioni locali; l'avanzamento del canale avviene per scatti successivi, con gradini della lunghezza di circa 50 m e pause di circa 50 μ s (le pause tra i gradini sono pressoché costanti, ma a pause più lunghe seguono, in genere, gradini più lunghi).

La carica abbassata ad ogni gradino è relativamente piccola ed un tipico canale discendente, quando è vicino a terra, contiene al più $(5 \div 6)$ C distribuiti sull'intera sua lunghezza: se ne ricava che, essendo necessario alla propagazione del canale un tempo dell'ordine di 10 ms, la corrente che fluisce col leader è dell'ordine del centinaio di ampere.

Man mano che il canale discendente si avvicina al suolo, si abbassa sempre di più la carica originariamente presente sulla nube ed il campo elettrico a terra aumenta. Quando il canale risulta a meno di 100 m dal suolo, può accadere che il campo attorno ad un punto sporgente del terreno divenga abbastanza intenso da produrre una scarica a pennello di ioni positivi che si risolve in una controscarica ascendente (Figura A.3) che, procedendo per qualche decina di metri, va ad incontrare il canale discendente, saldandosi con esso. Ecco perché i fulmini colpiscono gli oggetti a terra che hanno una punta abbastanza pronunciata.

Quando il canale discendente incontra il suolo o la controscarica, ha inizio il processo di smaltimento delle cariche negative depositate lungo il canale stesso. Questo processo è accompagnato dal manifestarsi di una scarica di ritorno (return stroke), che si propaga velocemente verso l'alto lungo il canale, illuminandolo vivamente insieme alle sue ramificazioni.

Per comprendere come si sviluppa il colpo di ritorno, si consideri che gli elettroni alla base del canale si precipitano al suolo e si disperdono nel terreno, lasciando dietro una carica positiva. È proprio questa carica positiva lasciata scoperta che richiama altre cariche negative da livelli più alti, le quali si riversano anch'esse al suolo, e così via. Alla fine, tutta la carica negativa contenuta in una regione di nuvola si precipita rapidamente lungo la colonna, dando vita al fulmine molto luminoso che si vede muovere dal suolo verso l'alto.

La scarica di ritorno libera un calore tanto elevato da portare la temperatura locale attorno ai 15000 °C: ciò provoca una rapida espansione dell'aria circostante che, in forma di onde d'urto, produce i tuoni che si sentono durante un temporale.

La corrente drenata a terra dalla scarica di ritorno è molto più intensa di quella associata al leader: in effetti, la prima viaggia ad una velocità compresa tra il 10% ed il 50% di quella della luce, la seconda ad una velocità media pari all'1% di quella della luce, ed essendo pressoché uguali le cariche trasportate dalle due scariche (circa 20 C), al leader è associabile una corrente di $(1 \div 100)$ A, al return stroke una corrente molto più grande di $(10 \div 100)$ kA.

Dopo questo primo colpo, possono verificarsi in rapida successione altre scariche secondarie, a seconda che sulla nube sia ancora disponibile una certa carica. In tal caso, fra l'estremità superiore del precedente condotto e la zona della nuvola ancora carica si sviluppano delle scariche ramificate che drenano le cariche in eccesso rendendole disponibili per un nuovo condotto discendente.

Se questo processo avviene in un tempo inferiore ai 100 ms, una scarica oscura (dart leader) si svilupperà lungo il precedente canale discendente, aumentandone il grado di ionizzazione e favorendo così una nuova scarica a terra. La scarica oscura non si ramifica ed avanza con continuità, depositando lungo il canale una carica negativa minore di quella precedente in circa 2 ms.

Se però il drenaggio della carica sulla nube avviene in poco più di 100 ms, l'avanzamento, da continuo, può ad un certo punto divenire a gradini.

Infine, se l'intervallo fra due scariche supera abbondantemente i 100 ms, il secondo canale si sviluppa come il primo, ma su un percorso del tutto diverso.

L'insieme dei differenti colpi in rapida sequenza si indica col nome di scarica multipla: l'intervallo tra due colpi successivi è in genere compreso tra 0.02 s e 0.2 s, ed il numero totale di colpi è di norma 2 o 3, anche se può arrivare a 40. Le scariche multiple sono fenomeni che interessano solo i fulmini negativi, ascendenti o discendenti che siano.

È esperienza comune che il fulmine presenti spesso un aspetto ramificato; in effetti, il leader, dopo una delle sue pause, può dare origine ad una o più diramazioni, scendendo poi per tali scalini in direzioni diverse, ma tutte verso il suolo. Se una delle diramazioni raggiunge il suolo prima delle altre, la scarica luminosa di ritorno, dovuta al riversarsi a terra delle cariche negative, si sviluppa su per quel ramo. Quando essa, nel suo cammino, arriva ad un'altra diramazione, una scarica luminosa scende lungo quest'ultima, perché le sue cariche negative si riversano fuori, svuotandola progressivamente, nello stesso tempo in cui quella principale si sviluppa in alto verso la nuvola.

Attorno a strutture molto alte a terra possono instaurarsi, durante l'attività temporalesca, campi elettrici tanto intensi da dare origine ad una scarica ascendente, la quale si sviluppa verso l'alto con estensioni di (100 ÷ 1000) m, procedendo a gradini e ramificandosi: lungo il suo percorso essa deposita nell'aria delle cariche di polarità positiva. Tale fenomeno dura frazioni di secondo ed è accompagnato da correnti modeste (al più dell'ordine di 1 kA); può accadere, però, che esso incontri il canale discendente, fornendo la via per la scarica di una intensa corrente anch'essa dell'ordine di (10 ÷ 100) kA.

Nella maggior parte dei casi (80 ÷ 90)%, una scarica temporalesca trasporta dalla nube a terra cariche negative (fulmini negativi), ma nella rimanente parte si ha un trasporto di cariche positive (fulmini positivi).

Per i fulmini negativi, la formazione del canale è sempre accompagnata da un leader visibile che avanza a gradini, illuminando un gradino alla volta se la scarica è discendente, l'intero canale se la scarica è ascendente.

• **La forma della corrente del fulmine**

L'andamento della corrente di un fulmine è caratterizzato da due forme d'onda tipiche, che possono presentarsi singolarmente o associate: una componente impulsiva di breve durata, con tempo all'emivalore di (100 ÷ 1000) ms, con un ripido fronte di (0.5 ÷ 100) kA/s ed una ampiezza di (2 ÷ 200) kA, ed una componente continuativa, con andamento irregolarmente piatto e durata di alcuni millisecondi, con ampiezza di (10 ÷ 500) A (ma che può raggiungere valori dell'ordine di 1 kA per fulmini negativi e 10 kA per fulmini positivi). Quest'ultima componente può seguire un impulso e fermarsi con un lento incremento di corrente fino a qualche decimo di secondo.

I fulmini ascendenti iniziano sempre con una corrente continuativa di circa 100 A e durata dell'ordine di 0.01 s, mentre i fulmini discendenti iniziano con una corrente impulsiva.

Per quel che riguarda le scariche multiple, è da notare che i colpi secondari presentano una corrente impulsiva con andamento diverso da quella del colpo principale. Quest'ultimo presenta un fronte inizialmente con pendenza dolce e poi

più ripido, al più di 20 kA/s: in effetti, negli istanti iniziali le ramificazioni del leader discendente non si sono ancora ben saldate con quelle della controscarica, quindi la resistenza al passaggio di corrente è più alta; solo quando i canali si sono ben saldati, la conducibilità può aumentare. I primi, invece, presentano un fronte totalmente ripido, di circa 80 kA/s, ed in effetti il canale è ora fortemente ionizzato, a causa delle scariche precedenti e per effetti termici, ed in più può essere percorso da una corrente residua.

Si è notato che se tra un colpo e l'altro di una scarica multipla continua a fluire lungo il canale una piccola corrente, il fulmine drencherà a terra più del doppio della corrente drenata da un fulmine caratterizzato da soli impulsi.

I fulmini negativi sono spesso a scarica multipla: i vari impulsi sono sempre ben distinti se la loro ampiezza è notevole, sono invece sovrapposti ad una corrente continuativa se essa è debole. Solo il primo colpo può iniziare con una corrente continuativa e trasformarsi poi in un impulso, mentre tutti gli altri iniziano direttamente con un impulso.

I fulmini positivi sono formati quasi sempre da un solo colpo: l'impulso è relativamente lungo (con tempi all'emivalore di 1 s), ha un fronte piatto e degenera quasi sempre in una corrente continuativa con intensità dell'ordine di 1 kA.

• **Le influenze della posizione geografica sui fulmini**

Pur limitandoci a considerare solo regioni a clima temperato, è importante mettere in evidenza l'influenza che hanno sui fulmini la configurazione orografica della zona ed il periodo dell'anno in cui si verifica il temporale.

In zone montagnose l'intensità della corrente del fulmine e la carica in gioco sono abbastanza piccole, in quanto la breve distanza tra la terra e le nubi provoca scariche prima che il processo di carica della nuvola sia completo, senza contare che la modesta lunghezza del condotto si traduce in una piccola carica lungo di esso. Il numero di scariche è, tuttavia, molto più elevato che in pianura. In zone pianeggianti si hanno relativamente poche scariche, ma con intensità di corrente elevata, a causa della maggiore distanza tra le nubi e la terra. La rarità delle scariche è dovuta al fatto che solo sporadicamente il campo elettrico è tale da consentire un fulmine a terra, mentre la maggiore intensità di corrente è dovuta alla presenza di nubi ben cariche e di lunghi canali di scarica.

Per quanto riguarda l'influenza stagionale, in estate molte scariche avvengono entro una nuvola o tra nuvole diverse, a causa della notevole altezza delle nubi dal suolo: si verifica una brusca variazione del campo elettrico sulla superficie della terra e, se si è in presenza di una struttura appuntita, può essere superato il valore critico, dando luogo alla formazione di una scarica ascendente. Il numero di queste scariche è, quindi, nella stagione estiva, superiore a quello delle scariche discendenti. A

causa della grande lunghezza del canale, ad esse sono associate cariche dell'ordine di 100 C per tempi dell'ordine di 0.1 s, vale a dire correnti dell'ordine di 1 kA.

Nelle altre stagioni (primavera, autunno ed inverno) le nuvole sono più basse, per cui la scarica a terra avviene ancor prima che il processo di carica della nube sia completo; allo stesso tempo sono meno frequenti le scariche tra nuvole e quindi i fulmini ascendenti da queste causati.

Sulla Terra si hanno 16 milioni di temporali all'anno, ovvero circa 44 mila al giorno, con la caduta di 100 fulmini al giorno. Vista la grossa variabilità (anche su lunghi periodi) del numero e del tipo di manifestazioni temporalesche che interessano una certa regione, per ottenere una indicazione di quanto quella regione sia esposta a fenomeni di fulminazione, è opportuno far riferimento al cosiddetto **livello ceraunico** (T_D), che è un indice della frequenza dei temporali in una determinata zona e va inteso come il numero dei giorni temporaleschi all'anno in quella zona. Ora, poiché si considera temporalesco un giorno in cui è stato udito almeno un tuono, si comprende come la rilevazione del fenomeno sia affidata all'orecchio umano e, pertanto, quanto questo parametro sia poco obiettivo ed affidabile. Per estensione, seppur impropriamente, si denomina livello ceraunico il 'numero di fulmini a terra' (N_T), ovvero il numero medio in un anno di fulmini per chilometro quadrato che cadono a terra nella zona considerata. Da quanto detto, segue il numero di fulmini a terra (o livello ceraunico che dir si voglia) di una località di montagna è più elevato di quello di una località situata ad una quota più bassa. A titolo di esempio, la tabella che segue riporta il numero dei fulmini a terra di alcune città italiane.

Ancona	1.5	Genova	4.0	Reggio Calabria	2.5
Aosta	1.5	L'Aquila	2.5	Roma	4.0
Bari	2.5	Milano	4.0	Torino	2.5
Bologna	2.5	Napoli	1.5	Trento	2.5
Bolzano	2.5	Palermo	2.5	Trieste	4.0
Cagliari	2.5	Perugia	4.0	Udine	4.0
Firenze	1.5	Potenza	2.5	Venezia	4.0

Si può comunque dire che nell'Italia settentrionale i temporali avvengono soprattutto in estate, nell'Italia meridionale in inverno e che sull'Italia centrale esiste una modesta attività temporalesca praticamente per tutto l'anno.

Tra il livello ceraunico e la densità di fulmini a terra esiste una correlazione, che consente di utilizzare il livello ceraunico come base per il calcolo approssimato della probabilità di fulminazione di una struttura, quando non siano disponibili i valori di N_T misurati direttamente

$$N_T = 0.04 T_D^{1.25} .$$

Rimane ancora da precisare che cinque fulmini su sei si scaricano dentro la nuvola stessa, oppure tra due nubi, e non interessano il suolo.

Un recente studio condotto in Texas, relativo alla città di Houston ed il suo hinterland, ha rivelato che sulla quarta città degli Stati Uniti si abbattono fulmini in quantità superiore del 40% rispetto alle campagne circostanti, smentendo la saggezza popolare che vuole che i fulmini interessino principalmente i boschi e le montagne: il motivo non sembra essere la maggiore concentrazione di edifici, ma il calore e l'inquinamento che favoriscono la formazione dei cumulonembi.

In Italia, i fulmini sono tenuti sotto controllo dal Sirf (sirf.cesi.it), il sistema italiano di rilevamento dei fulmini, gestito dal Cesi, una società dell'Enel: la rete è composta da sedici rilevatori installati lungo la penisola, tutti collegati con il centro di controllo di Milano, dove affluiscono i dati provenienti anche da alcune stazioni collocate fuori dei nostri confini, ma utili per localizzare fulmini caduti nelle zone di frontiera. Le stazioni registrano, per mezzo di adeguati sensori, i campi elettrici e magnetici e, per mezzo di un sistema satellitare di posizionamento, consentono di conoscere l'esatta localizzazione dell'evento sul territorio, registrando inoltre il momento esatto e sincronizzando tutti i rilevatori con una precisione della decina di nanosecondi.

Secondo i ricercatori, un fulmine può entrare nel corpo umano attraverso le aperture del cranio, ossia occhi, orecchie, naso e bocca, e si scarica a terra dopo aver percorso il sangue ed il sistema nervoso. Come conseguenza più probabile si ha l'arresto del cuore e dei polmoni; tuttavia, mentre il cuore può riprendere a battere autonomamente, i polmoni hanno bisogno della respirazione bocca a bocca, per cui la morte può giungere per soffocamento. Sembra che, con un adeguato soccorso, il 70% delle persone colpite da un fulmine possa sopravvivere senza danni. In ogni caso, è consigliabile evitare di esporsi al rischio di fulminazioni e seguire prudentemente il consiglio di Pietro Metastasio:

Chi vede il periglio
né cerca salvarsi,
ragion di lagnarsi
del Fato non ha.