

Impianti elettrici

Per l'analisi di alcuni semplici impianti elettrici partiamo dai concetti elementari. Il primo è la potenza elettrica, prodotto tra intensità di corrente e differenza di potenziale:

$$P = i(t) V_{AB}(t) \frac{[A]}{[A]} \cdot \frac{[V]}{[V]} = [W]$$

Nel caso di corrente alternata bisogna introdurre la frequenza:

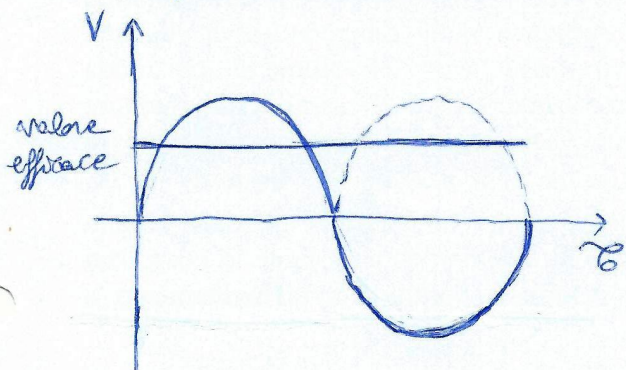
$$= \frac{1}{s} \quad \left[\frac{1}{s} \right] = [Hz]$$

La corrente alternata è diffusa in tutto il mondo e possiede frequenza tra i 50 e i 60 Hz (in Italia e nella maggior parte d'Europa è 50 Hz).

La pulsazione è il numero di radianti al secondo e si ottiene moltiplicando la frequenza per 2π :

$$\omega = 2\pi f, \quad \text{se } f = 50 \text{ Hz} \Rightarrow \omega_{50} = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} = 314 \frac{[rad]}{s}$$

I valori efficaci sono i valori che le grandezze bipolo (V, I, ecc.) della corrente alternata assumono se riferiti ad un solo periodo. È come se ottenessimo corrente continua in tale periodo. Per esempio consideriamo V:



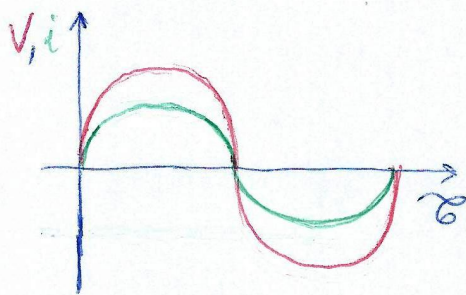
$$x = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t') dt'}$$

Integrando l'integrale si ottengono:

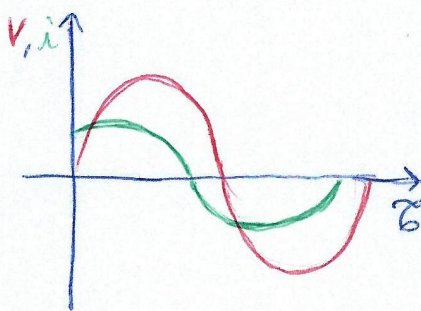
$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2 dt'} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 dt'} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

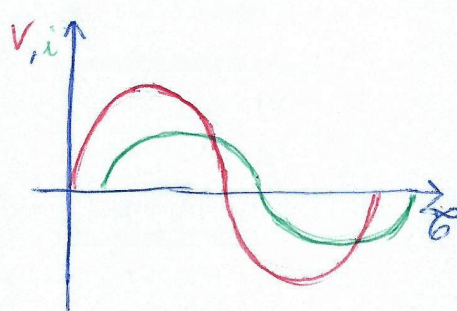
Sovrapponendo la curva di I a quella di V otteniamo tre diversi risultati:



V e i sono
in fase
(nelle resistenze)



i è in ritardo
rispetto a V



i è in anticipo
rispetto a V

ϕ è l'angolo di sfasamento. Per calcolare V o i a un certo istante:

$$V = V_{max} \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

$$i = I_{max} \sin(\omega t - \phi)$$

La potenza istantanea è:

$$P = v \cdot i = v_m \sin(\omega t) \cdot i_m \sin(\omega t - \phi) =$$

$$= v_m \cdot i_m [\sin(\omega t) (\sin(\omega t) \cos \phi - \cos(\omega t) \sin \phi)]$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = \int_0^T v_{eff} \cdot i_{eff} \cos \phi \cdot 2 \sin^2(\omega t) dt - \int_0^T v_{eff} i_{eff} \sin \phi \sin(2\omega t) dt$$

$$\Rightarrow P = v_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos \phi \quad (\text{potenza totale})$$

Se $\phi = 90^\circ \Rightarrow P = 0$. Tuttavia c'è consumo perché V e I vengono comunque erogate anche se non abbiamo potenza utile.

Dobbiamo fare in modo che ϕ sia più piccolo possibile così che il coseno assuma un valore molto vicino a 1:

$$\phi \text{ b.c. } 0.9 < \cos \phi < 1$$

Diamo la risoluzione completa dell'integrale dell'energia:

$$\mathcal{E} = v_m i_m \left[\int_0^T \cos \phi \cdot \sin^2(\omega t) dt - \int_0^T \frac{1}{2} \sin \phi \sin(2\omega t) dt \right] =$$

$$= v_m i_m \int_0^T \frac{2 \cos \phi \sin^2(\omega t) - \sin \phi \sin(2\omega t)}{2} dt =$$

$$= \frac{v_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_m}{\sqrt{2}} \int_0^T [2 \cos \phi \sin^2(\omega t) - \sin \phi \sin(2\omega t)] dt =$$

$$= v_{eff} \cdot i_{eff} \left[\frac{2 \cos \phi}{\omega} \int_0^T \omega \sin^2(\omega t) dt - \frac{\sin \phi}{2\omega} \int_0^T \sin(2\omega t) \cdot 2\omega dt \right] =$$

$$= v_{eff} \cdot i_{eff} \left[\frac{2 \cos \phi}{\omega} \left[\omega t - \frac{\sin(2\omega t)}{2} \right]_0^T + \frac{\sin \phi}{2\omega} [\cos(2\omega t)]_0^T \right] =$$

$$= v_{eff} i_{eff} \left[\frac{\cos \phi}{\omega} (\omega T - \sin \omega T \cdot \omega T) + \frac{\sin \phi}{2\omega} \cdot \cos(2\omega T) - \frac{\sin \phi}{2\omega} \right]$$

A questo punto ricordiamo che $\omega = \frac{2\pi}{T}$, T è il periodo!

$$\mathcal{E} = v_{eff} \cdot i_{eff} \left[\frac{\cos \phi}{\omega} \cdot \left[\frac{2\pi}{T} \cdot T - \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot T\right)}{2} \cdot \frac{2\pi}{T} \right] + \frac{\sin \phi}{2\omega} [\cos(2\pi) - 1] \right] =$$

$$= v_{eff} i_{eff} \frac{2\pi}{\omega} \cos \phi = v_{eff} \cdot i_{eff} \cdot T \cos \phi$$

Per ottenere la potenza si divide per il periodo T :

$$P = \frac{\mathcal{E}}{T} = v_{eff} i_{eff} \cos \phi$$

Resistore, condensatore, induttore

Per il calcolo della potenza:

NEL RESISTORE

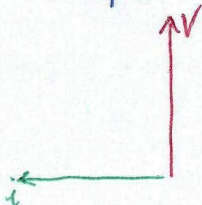
$$P_R = R \cdot i^2$$



NEL CONDENSATORE

$$P_C = \frac{1}{C} \int i \, dQ$$

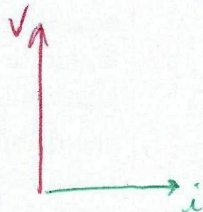
funzione V e i sfasate
di 90° in anticipo



NELL'INDUTTANZA

$$V = L \frac{di}{dt}$$

funzione V e i sfasate
di 90° in ritardo



Le induttanze involontarie sfasano la corrente. Per ridurla e ottenere quindi la potenza massima (i e V di massima efficacia) si usano i condensatori.

Generalizziamo la legge di Ohm $V = R \cdot I$ per condensatori e induttanze:

$$V = I \cdot Z \quad \left\{ \begin{array}{ll} Z = R & \text{per resistenza} \\ Z = \frac{1}{j\omega C} & \text{per condensatore} \\ Z = j\omega L & \text{per induttanza} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \cos j = i \in \mathbb{C} \\ (i \text{ b.c. } i^2 = -1) \end{array}$$

$[Z] = [Z]$
impedenza

Legge di Kirchhoff:

- Equazione dei nodi: un nodo è un punto del circuito in cui convergono tre o più maglie. Vale il bilancio energetico (scegliendo un verso percorrenza arbitrario della corrente):

$$\sum I_{\text{entranti}} = \sum I_{\text{uscanti}}$$

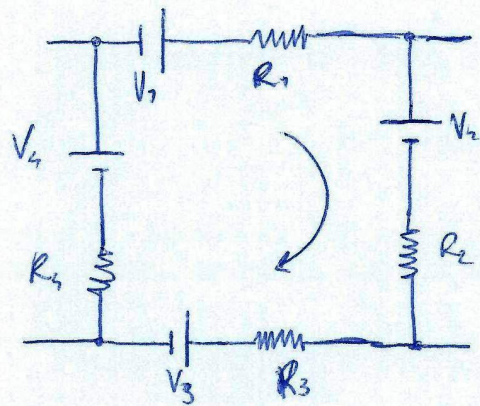
La somma delle correnti entranti è uguale alla somma delle correnti uscenti dal nodo.

- Equazione delle maglie: una maglia è una successione di elementi elettrici (cavi, resistori, condensatori, induttori) compresa tra due nodi. Sempre scegliendo un verso di percorrenza arbitrario per ogni ramo del percorso si può scrivere:

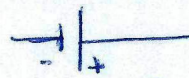
$$\sum \pm V \pm R \cdot I = 0$$

La somma di tutti i potenziali in una maglia chiusa è nulla. Si può scrivere per ciascuna maglia.

Ecco un esempio qualsiasi:

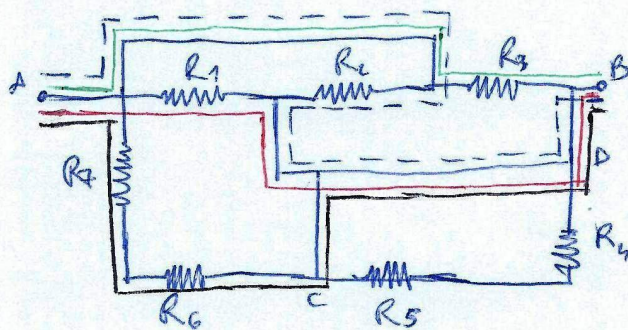


Per convenzione:



La tensione V è positiva da - a +.
Pertanto è negativa se la corrente va da + a -.

- Prediamo ora altri esempi coi loro metodi di soluzione (solo resistenze):
- disegnare tutti i percorsi possibili:



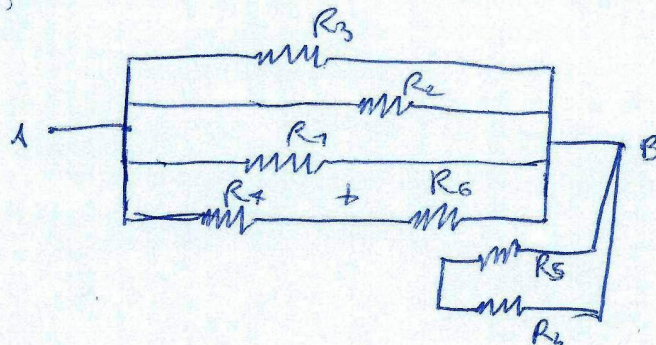
Ricordiamo che:

$$R_{\text{tot serie}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

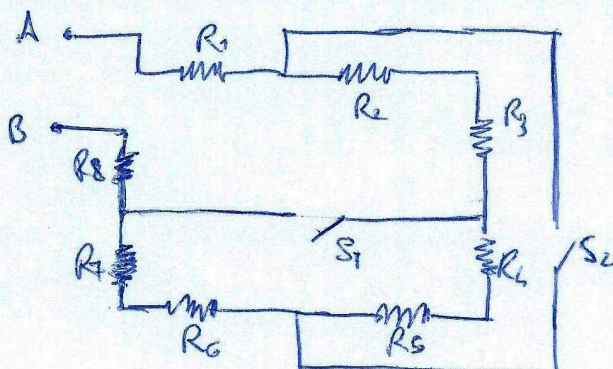
$$R_{\text{tot parallelo}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right)^{-1}$$

R_4 e R_5 vengono escluse: tra C e D esiste un percorso lungo il quale la resistenza è nulla.

Il seguente circuito con resistenze in parallelo è equivalente a quello dato:



- circuiti con valori numerici e interruttori:



$$R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = R_3 = 10 \Omega$$

$$R_3 = 15 \Omega \quad R_5 = 40 \Omega$$

$$R_6 = 20 \Omega \quad R_7 = 30 \Omega$$

$$R_8 = 8 \Omega$$

S_1 e S_2 interruttori

Quattro con cui calcolare la resistenza equivalente

a) S_1 e S_2 aperti:

$$R_{eqa} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 = 135 \Omega$$

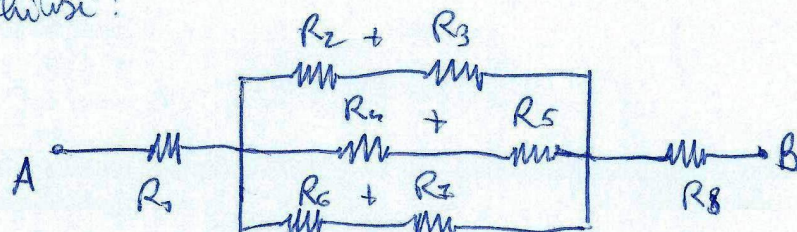
b) S_1 aperto, S_2 chiuso:

$$R_{eqb} = R_1 + R_6 + R_7 + R_8 = 60 \Omega$$

c) S_1 chiuso, S_2 aperto:

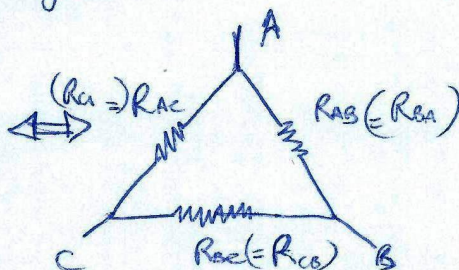
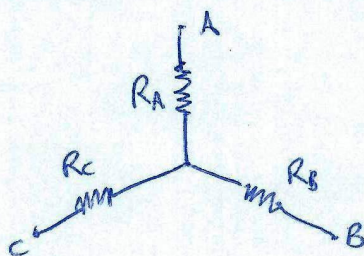
$$R_{eqc} = R_1 + R_2 + R_3 + R_8 = 35 \Omega$$

d) S_1 e S_2 chiusi:



$$R_{eqd} = R_1 + \left(\frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_6 + R_7} \right)^{-1} + R_8 = 22,5 \Omega$$

- trasformazione stella-triangolo:



$$R_i + R_j = \left(\frac{1}{R_i + R_k} + \frac{1}{R_j} \right)^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{I} \quad & R_A + R_C = \left(\frac{1}{R_B + R_{BC}} + \frac{1}{R_{AC}} \right)^{-1} = \frac{R_{AC} \cdot (R_B + R_{BC})}{R_{AC} + R_B + R_{BC}} \\ \text{II} \quad & R_A + R_B = \left(\frac{1}{R_{AC} + R_{BC}} + \frac{1}{R_{AB}} \right)^{-1} = \frac{R_{AB} \cdot (R_{AC} + R_{BC})}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}} \\ \text{III} \quad & R_B + R_C = \left(\frac{1}{R_{AC} + R_{AB}} + \frac{1}{R_{BC}} \right)^{-1} = \frac{R_{BC} \cdot (R_{AC} + R_{AB})}{R_{BC} + R_{AC} + R_{AB}} \end{aligned}$$

Con la riduzione:

$$\text{I} - \text{II}: R_C - R_B = \frac{R_{AC} R_{BC} + R_{AC} R_{BC} - R_{AB} R_{AC} - R_{AB} R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

$$(\text{I} - \text{II}) + \text{III} = 2R_C = \frac{R_{AC} R_{BC} - R_{AB} R_{BC} + R_{BC} R_{AB} + R_{BC} R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

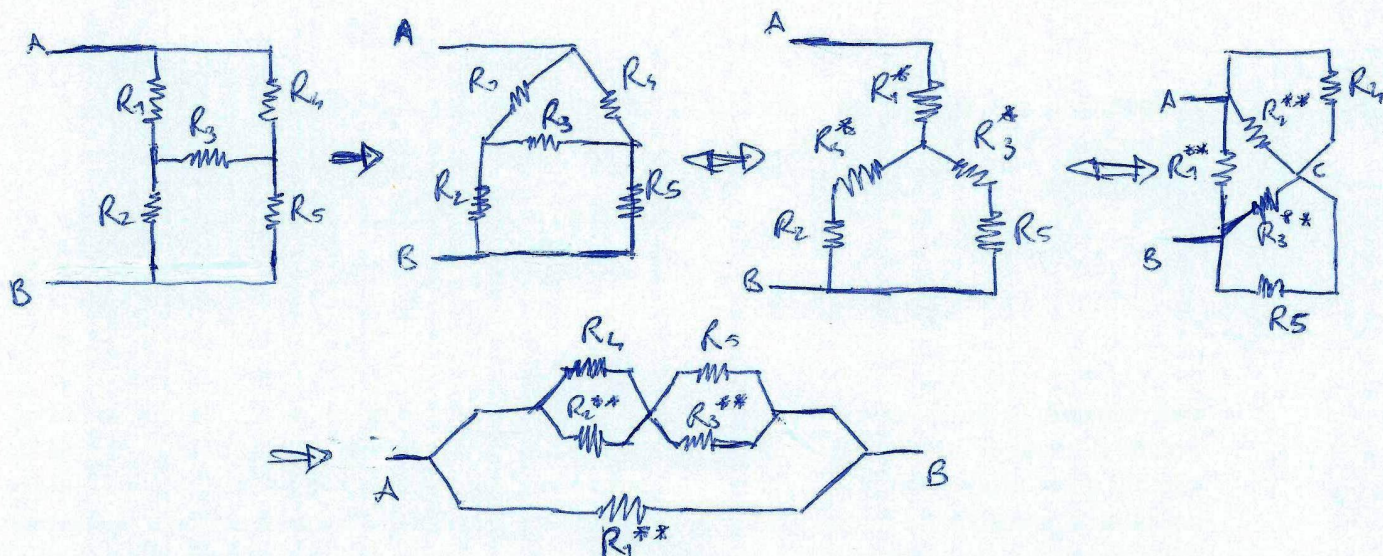
Allora:

$$R_C = \frac{R_{AC} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

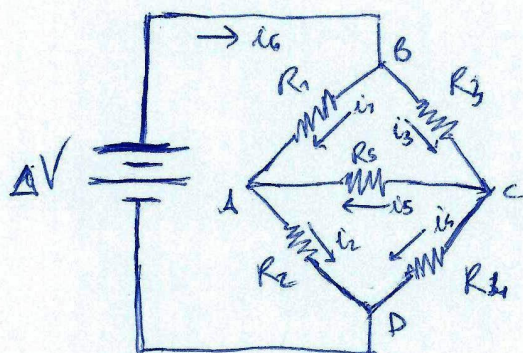
$$R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

La stella-bintang è utile ad esempio nel seguente caso:



- ponte di Wheatstone: è un circuito nel quale sono presenti quattro resistenze lungo un quadrilatero più una lungo una diagonale dello stesso. Diamo un'occhiata di risoluzione col metodo delle leggi di Kirchhoff:



$$\Delta V = 10 \text{ V} \quad R_1 = R_2 = 100 \, \Omega \quad R_3 = 90 \, \Omega$$

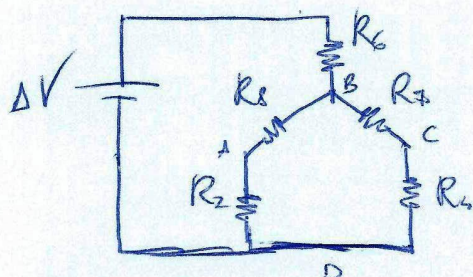
$$R_4 = 110 \, \Omega \quad R_5 = 10 \, \Omega$$

maglie utili: $(m-1) = 4-1 = 3$ | $\Rightarrow$ 6 eq. in 6 inc.
nodi utili: 3
(lineare)

$$\begin{cases} i_6 = i_1 + i_3 \\ i_1 + i_5 = i_2 \\ i_5 + i_4 = i_3 \\ \Delta V - i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0 \\ -i_3 R_3 - i_5 R_5 + i_1 R_1 = 0 \\ i_5 R_5 - i_4 R_4 + i_2 R_2 = 0 \end{cases}$$

Si risolve il sistema e si determinano le sei intensità di corrente

In alternativa possiamo usare la stella-bintang per trovare i_6 :



$$R_6 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3 + R_5} = 45 \, \Omega$$

$$R_7 = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_1 + R_3 + R_5} = 45 \, \Omega$$

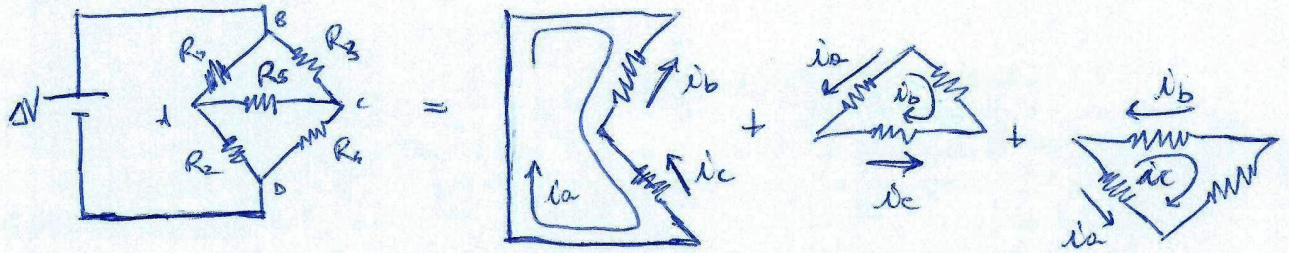
$$R_8 = \frac{R_1 \cdot R_5}{R_1 + R_3 + R_5} = 5 \, \Omega$$

$$R_{eq} = R_6 + \left(\frac{1}{R_7 + R_4} + \frac{1}{R_2 + R_8} \right)^{-1} \approx 100 \, \Omega$$

$$\Rightarrow i_6 = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = 0,1 \text{ A} \Rightarrow \Delta V_{BD} = \Delta V - i_6 \cdot R_6 = 5,49 \text{ V}$$

Si possono poi determinare le correnti nei due rami (vedere al fondo, dopo il metodo di Maxwell).

Ancora, è possibile usare il metodo di Maxwell con la sovrapposizione degli effetti:



Scriviamo le equazioni:

$$\begin{cases} \Delta V - i_a R_1 + i_b R_1 - i_a R_2 + i_c R_2 = 0 \\ -i_b R_3 - i_b R_5 + i_c R_5 - i_b R_1 + i_a R_1 = 0 \\ -i_c R_4 - i_c R_2 - i_c R_5 + i_a R_2 + i_b R_5 = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \Delta V - i_a (R_1 + R_2) + i_b R_1 + i_c R_2 = 0 \\ -i_b (R_3 + R_5 + R_1) + i_c R_5 + i_a R_1 = 0 \\ -i_c (R_4 + R_2 + R_5) + i_a R_2 + i_b R_5 = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 10V - i_a \cdot 200 \Omega + i_b \cdot 100 \Omega + i_c \cdot 100 \Omega = 0 \\ -i_b \cdot 200 \Omega + i_c \cdot 10 \Omega + i_a \cdot 100 \Omega = 0 \\ -i_c \cdot 220 \Omega + i_a \cdot 100 \Omega + i_b \cdot 10 \Omega = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 1V - 20 \Omega i_a + 10 \Omega i_b + 10 \Omega i_c = 0 \\ -20 \Omega i_b + 1 \Omega i_c + 10 \Omega i_a = 0 \\ -22 \Omega i_c + 10 \Omega i_a + 1 \Omega i_b = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} i_b = 22 i_c - 10 i_a \\ i_c = 440 i_c + 10 i_a - 200 i_a \\ \text{"} \quad \quad \quad \text{"} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} i_c = \frac{+210}{439} i_a \\ i_b = \left(\frac{210 \cdot 22}{439} - 10 \right) i_a = \frac{230}{439} i_a \\ 1V + \frac{10 \cdot 230}{439} i_a + \frac{10 \cdot 210}{439} i_a - 20 i_a = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} i_c = 0,04795 A \\ i_b = 0,05251 A \\ i_a = \frac{1V \cdot 439}{4380 \Omega} = 0,10023 A \end{cases}$$

$$\Rightarrow i_{AC} = i_b - i_c = 4,6 \cdot 10^{-3} A$$

Gli stessi risultati si avrebbero ottenuti proseguendo con le stelle-triangolo:

$$\Delta V_{BD} = 5,49 V \Rightarrow i_{BAD} = \frac{\Delta V_{BD}}{R_8 + R_2} = \frac{5,49 V}{105 \Omega} = 0,05228 A$$

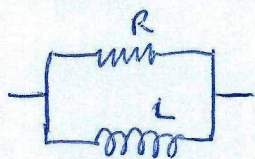
$$\Delta V_{AB} = i_{BAD} \cdot R_8 = 0,26 V$$

$$i_{BCD} = \frac{\Delta V_{BD}}{R_7 + R_4} = 0,04794 A \Rightarrow \Delta V_{BC} = i_{BCD} \cdot R_7 = 0,22 V$$

$$\text{Allora } \Delta V_{AC} = \Delta V_{AB} - \Delta V_{BC} = 0,045 V \Rightarrow i_{AC} = \frac{\Delta V_{AC}}{R_5} = 4,6 \cdot 10^{-3} A$$

Passiamo ad alcuni esercizi con utilizzatori misti:

- resistenza e induttanza:



$$R = 1 \Omega$$

$$L = 1 \text{ H}$$

$$\omega = 40^2 [\text{rad/s}]$$

$$Z_{\text{tot}} = \left(\frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_L} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{R j\omega L}{R + j\omega L} \cdot \frac{R - j\omega L}{R - j\omega L} = \frac{R^2 j\omega L + R\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Sostituendo:

$$Z_{\text{tot}} = \frac{1 \Omega \cdot 40^2 [\text{rad/s}]^2 \cdot 1 \text{ H}^2}{1 \Omega^2 + 40^4 [\text{rad/s}]^2 \cdot \text{H}^2} + j \frac{40^2 [\text{rad/s}] \cdot 1 \Omega^2 \cdot \text{H}}{1 \Omega^2 + 40^4 [\text{rad/s}]^2 \cdot \text{H}^2} =$$

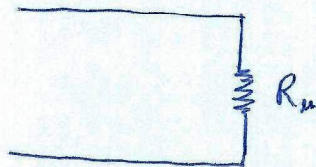
$$= \frac{10^4 \cdot \cancel{\Omega^2} \cdot \cancel{\text{H}^2}}{1 + 10^4} + \frac{10^2}{1 + 10^4} \frac{\cancel{\Omega^2}}{\cancel{\text{H}^2}} j (1 + 0,01 j) \Omega$$

Modulo e angolo di sfasamento:

$$|Z_{\text{tot}}| = \sqrt{1^2 + 0,01^2} \approx 1 \Omega \quad \varphi = \arctan \frac{\text{imm}}{\text{reale}} = 0,57^\circ$$

Se avessimo avuto $Z_{\text{tot}} = (1 + j) \Omega$ il modulo sarebbe stato $\sqrt{2}$ e l'angolo di sfasamento $\frac{\pi}{4}$.

- se i fili sono troppo lunghi non si può trascurare la loro resistenza.



$$P = 2000 \text{ W}$$

$$\Delta V = 340 \text{ V}$$

$$I = \frac{2000 \text{ W}}{340 \text{ V}} = 18,2 \text{ A}$$

$$\Rightarrow R_u = \frac{\Delta V}{I} = 6,05 \Omega$$

Se i fili non hanno resistenza il problema finisce qui. Se invece supponiamo $R_{\text{filo}} = 0,16 \Omega$:

$$i = \frac{V}{R_{\text{tot}}} = \frac{V}{R_u + R_{\text{filo}}} = 17,7 \text{ A}, \quad \Delta V_{\text{filo}} = 17,7 \text{ A} \cdot 0,16 \Omega = 2,8 \text{ V}$$

$$\Rightarrow P_u = V \cdot I = R_u I^2 = 6,05 \Omega \cdot 17,7^2 \text{ A}^2 = 1895,4 \text{ W}$$

L'utilizzatore ha una certa resistenza data dalla potenza sviluppata fatto che differenzia di potenziale un v. oggetto. Tuttavia la resistenza dei cavi impedisce ad esso di sviluppare tutta la potenza.

Per questo la corrente prodotta a bassa tensione viene portata ad alta tensione (22000 V): per far fronte alla caduta di tensione causata dalla resistenza dei cavi.

Potenza attiva, reattiva e apparente

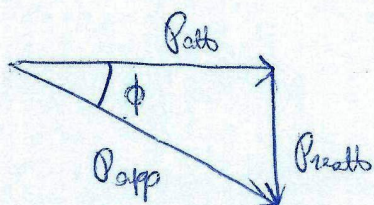
La potenza attiva è quella che abbiamo definita all'inizio:

$$P_{att} = V_{eff} i_{eff} \cdot \cos \phi \text{ [W]}$$

La potenza istantanea contiene sia quella attiva che quella reattiva!

$$P_{reatt} = V_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \sin \phi \text{ [VAR]} \quad P_{app} = \underbrace{V_{eff} i_{eff} \cos \phi}_{P_{att}} + \underbrace{V_{eff} i_{eff} \sin \phi}_{P_{reatt}} = V_{eff} i_{eff} \cos \phi + V_{eff} i_{eff} \sin \phi$$

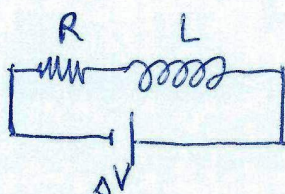
La potenza apparente è la somma vettoriale delle potenze attive e reattive:



$$P_{app} = \sqrt{P_{att}^2 + P_{reatt}^2} = V_{eff} i_{eff} \sqrt{\cos^2 \phi + \sin^2 \phi} = V_{eff} \cdot i_{eff} \text{ [VA]}$$

Il distributore di energia elettrica (lascende) eroga P_{app} , mentre noi consumiamo solo P_{att} disperdendo P_{reatt} . Bisogna dunque ridurre al minimo lo sfasamento ϕ per ridurre P_{reatt} .

Riferendoci su circuiti resistivo-induttivi, si riduce lo sfasamento ϕ (rifornimento) inserendo un condensatore in parallelo. Supponiamo per semplicità regime stazionario, anche se nella realtà gli uti, lizzatori si accendono e si spengono rendendo più complesso il problema (dinamico, non statico):



$$\Delta V_{eff} = 220 \text{ V}$$

$$R = 55 \, \Omega$$

$$f = 50 \text{ Hz} \Rightarrow \omega = 2\pi f = 314 \text{ [rad/s]}$$

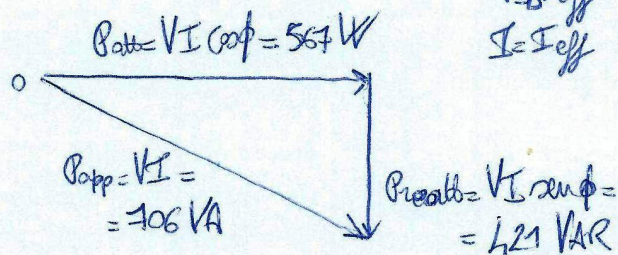
$$L = 0,13 \text{ H}$$

$$\Rightarrow Z_{tot} = R + j\omega L = (55 + 40,8 j) \, \Omega$$

$$\Rightarrow |Z_{tot}| = \sqrt{55^2 + 40,8^2} = 68,5 \, \Omega, \quad \phi = \arctg \frac{40,8}{55} = 36,6^\circ$$

$$\Rightarrow I_{eff} = \frac{\Delta V}{|Z_{tot}|} = 3,21 \text{ A}$$

Esempio delle potenze:



$$V = V_{eff}$$

$$I = I_{eff}$$

Vogliamo avere l'angolo almeno a $25,84^\circ = \phi_{max}$ ($\cos \phi_{max} = 99$), cioè dobbiamo ridurre P_{reatt} di:

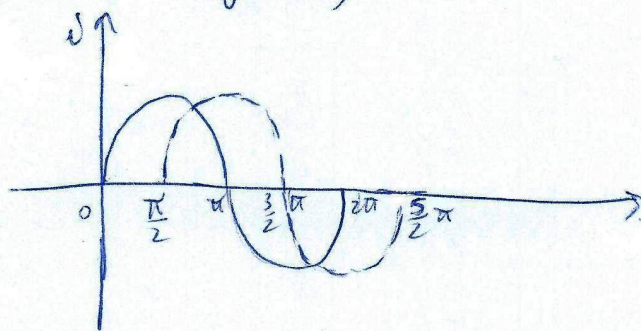
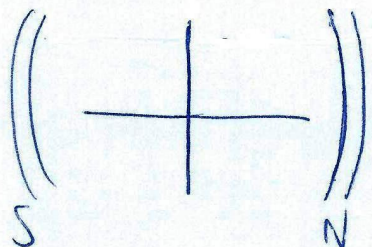
$$P_c = P_{reatt} - P_{att} \cdot \tan \phi_{max} = 421 - 567 \cdot \tan 25,84^\circ = 14,6 \text{ VAR}$$

Il condensatore è tale che:

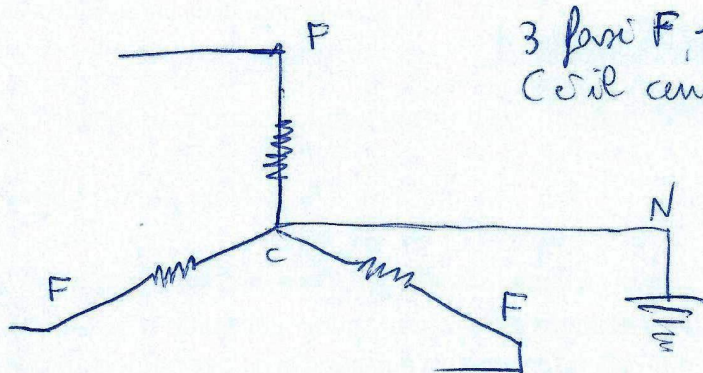
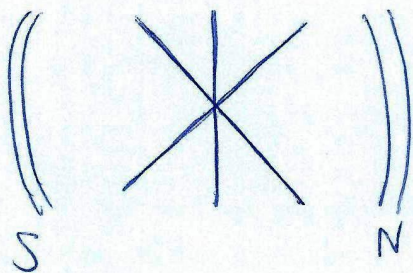
$$I_{eff} = \frac{P_c}{\Delta V_{eff}} = 0,6 \text{ A} \Rightarrow \frac{\Delta V_{eff}}{|Z|} = \frac{\Delta V_{eff}}{\frac{1}{\omega C}} = I_{eff} \Rightarrow C = \frac{I_{eff}}{\Delta V_{eff} \omega} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

In media in Liguria la corrente è a 15000 V nella distribuzione secondaria.

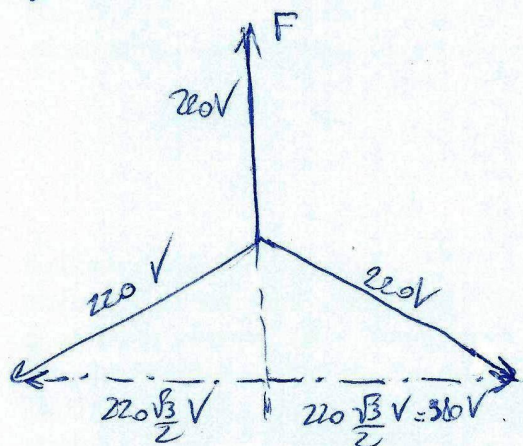
Inizialmente le correnti alternate erano sfasate di $\frac{\pi}{2}$ (usando due spire rotanti in un campo magnetico):



Aggiungendo una spira rotante si ottiene l'apparecchio di Galileo Ferraris in continua rotazione, con sfasamento di $\frac{2}{3}\pi$ (120°):



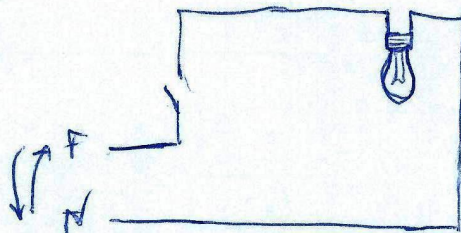
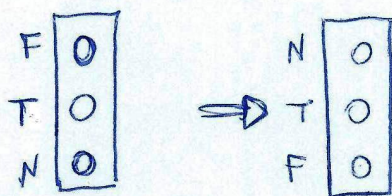
In tutto ci sono quattro fili (tre fasi e un neutro). Tra due fasi ci sono circa 380 V, tra fase e neutro 220 V. È la dinamica o generazione elettrica!



Il trasformatore di quartiere riceve la corrente a 15000 V e la trasforma a 380 V per ogni palazzo. Ogni palazzo ha la centralina che la distribuisce a 220 V. È difficile che ogni fase abbia lo stesso numero di utilizzatori attaccati. In un condominio ci possono essere tanti residenti, in un altro persone che vengono solo

in un certo periodo dell'anno e che in alcuni momenti non consumano. Occorre dunque che una fase sia molto impegnata e un'altra non lo sia. Il gestore della corrente allora cambia fase: attacca un palazzo a una fase diversa da quella a cui è stato attaccato finora. Si può avere un leggero sfasamento di luce.

Nel cambio accade che fase e neutro si invertono. Quindi dando un'ipotesi presa elettrica e una lampadina:



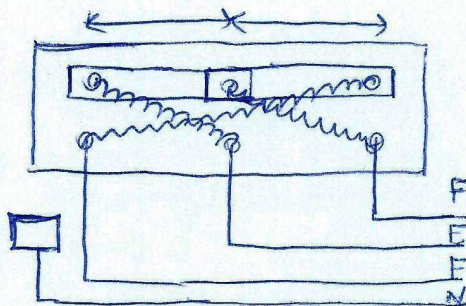
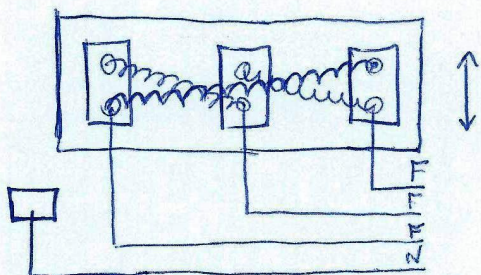
Se la fase e il neutro si invertono mentre cambiamo la lampadina prendiamo la corrente! È bene quindi (come nell'immagine qui) staccare la luce. In altre parole la fase non è staccata anche se l'interruttore è spento.

Diamo ora alcuni cenni sul motore elettrico asincrono trifase, realizzato per la prima volta da Geblio Ferraris. Il rotore gira all'interno dello statore. Rotore e statore sono circuiti magnetici (spire). Generano un campo magnetico che ruota a una certa velocità angolare ω . Il rotore raggiunge la quasi sincronia di rotazione. Se tuttavia esse si mantenesse il motore non potrebbe più produrre energia (la produzione si basa sulla differenza di velocità angolare). Allora il rotore rallenta e accelera periodicamente. Se il motore si bagna il trifase (spazio d'aria tra rotore e statore) si riempie d'acqua. Se accendiamo il motore bagnato lo dobbiamo buttare via perché non parte tutto. Bisogna farlo asciugare.

Se si cambiano i cuscinetti e non lo si sovraccarica, il motore è elettrico eterno.

Alle partenza il motore darebbe qualche scatto, ma ciò non è possibile sui treni e negli ascensori. Le persone sono a bordo e il motore deve accumulare potenza per poi lasciarla progressivamente.

Essendo trifase, si basa sulla stella - triangolo (l'equivalenza dei due collegamenti è data dalla rotazione delle pilastrine):



La sicurezza

In Italia la prima legge sulla sicurezza degli impianti è lettrici risale al 1930. È la legge 46/30, entrata in vigore quando ormai la maggior parte degli edifici erano stati costruiti in maniera differente. Le questioni sulla sicurezza sono state infine razionalizzate nel 2008 col decreto legislativo 37. Daremo qualche cenno ai nuovi aspetti.

Impianti progettati

Nel caso di potenza superiore a 6 kW, potenza apparente a 1200 VA (necessario di riferimento) utenze alimentate con tensione superiore a 1000 V, superficie superiore a 200 m², impianti con più di 10000 fiamme/ora (calore/ora) o 4 o più impianti con 3 o più rilevatori bisogna che l'impianto sia stato progettato.

Prendere la scossa

Quando prendiamo la scossa diventiamo un circuito impari, lei. La nostra resistenza e gli estremi di collegamento (orto-piedi) si relazionano al circuito, alle rete elettrica. Effetti a:

- 0,5 mA: debole scossa;
- 10 mA: si rimane atterrito;
- 30 mA: i polmoni si fermano;
- 75 mA: il cuore si ferma per un istante (fibrillazione);
- 1 A: arresto cardiaco.

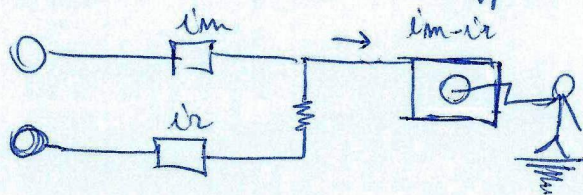
A casa abbiamo 220 V e potenze di 3300 W $\Rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{3300}{220} = 15 A$.

Più che sufficiente a rimanere fulminati. Non si possono mettere fusibili perché sfogando possono provocare incendi e comunque che non si può limitare la corrente a 1 A (l'oscillatore per il sistema 1000 W, cioè richiede 4,5 A). Si usano allora gli interruttori magnetotermici. Alcune tabelle e grafici legano tempo ed effetto del passaggio di elettricità nel corpo umano:

- zona 1: 10 s, 1 mA, nulla;
- zona 2: 10 s, 10 mA, nulla;
- zona 3: tetanizzazione;
- zona 4: fibrillazione con probabilità fino al 50%;
- zona 5: fibrillazione con probabilità fino al 50%.

Problemi di salute o psichici, scarsa massa corporea e età periferici (bambini e anziani) possono far variare gli effetti.

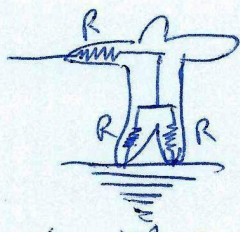
Si mettono interruttori differenziali!



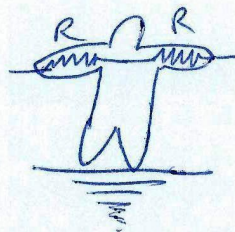
Una molla stacca tutto il crav,
 se $i_m + i_r > 30 \text{ mA}$ (al
 modo dell'utilizzazione di corrente
 dispersa). 30 mA corrisponde alla

zona di transizione tra 2 e 3.

Presenza di guanti, scarpe isolanti, pedane, morsa e aspetti corporei
 e presenza di alimentazione fanno variare la resistenza del corpo
 al passaggio della corrente. È più pericoloso il passaggio mano-
 piede di quello mano-mano:



$$R + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R}\right)^{-1} = R + \frac{R}{2} = \frac{3}{2}R$$

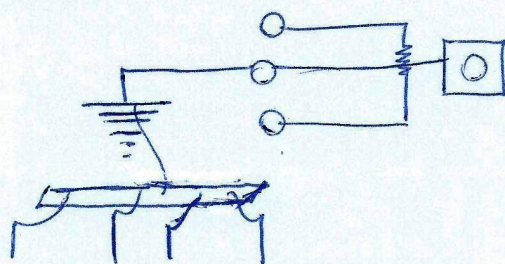


$$R + R = 2R$$

In media la resistenza corporea è di 1000Ω , ma si oscilla
 da 500Ω a 5000Ω a seconda delle condizioni.

Il d.l. del 2008 ha imposto l'interruttore differenziale e la
 terra. In ogni presa c'è un filo che porta l'elettrocuzione di
 spesse a terra (quest'ultima ha bassa resistenza, 10Ω).

Il filo della terra deve essere corto per opporre poca resistenza.
 Si possono fare tanti fili o a croce nel terreno (più c'è superficie,
 più c'è dispersione). Sono collegati in parallelo al collettore
 direzionale di terra:



parallelo: minor resistenza

Si possono anche sfruttare le
 anime del calcestruzzo armato o
 la rete metallica di base del
 edificio.

La terra è unica e viene di
 rimessa sulle porte degli appar-
 bamenti, agli ascensori, ai cavi,

foni, alle portinerie, ai tubi dell'acqua e del gas.
 Si collegano TV, telefoni, coloriferi, lavabelli dicono quali can-
 usare. Un tempo i tubi erano usati come terra.

La puntazza, cioè l'estremità dell'impianto di terra (quella
 che bacia terra) deve essere segnalata con il cartello "dispensore
 n° X". Ciò perché possono esserci "funzioni di perso": vicino a

cabine della luce, puntasce, poli dell'alta tensione possono esserci variazioni e tensioni che vanno a cercare differenze di tensione ben più piccole. Può succedere anche che si piedi dei parenti!

- Resistenze e caratteristiche elettriche dei materiali sono raccolte in tabelle consultate quando si costruisce una bene, si costruiscono anche le caratteristiche del terreno.

L'immersione di N e F può causare fenomeni di ritorno, ovvero passaggio di corrente se ci sono più "bene": per questo il punto di arrivo della bene è unico!

Essendo la d.d.p. di casa di 230 V, si fa in modo che al massimo il corpo umano debba sopportare 50V (con opportune resistenze nelle bene). Nei casi in cui siano presenti liquidi (pale operatrici) si scende a 25V.

- L'interruttore magnetotermico protegge la rete del gestore: è il differenziale che protegge l'utente.

Malattie

Non si conoscono bene gli effetti dell'inquinamento magnetotermico. Tutte le apparecchiature elettriche generano campo magnetico, oltre a quello elettrico. Elettrodomestici, antenne radio, elettrodomestici e cellulari, anche i treni generano campo magnetico. Se le radiazioni sono ionizzanti sono pericolosissime. Gli effetti di quelle non ionizzanti non si conoscono perfettamente. Si è scoperto che chi vive sotto l'alta tensione ha più probabilità di contrarre leucemia, oltre a altri problemi come bruciori, stitichezza, cataratta.

- Fulmini e parafulmini

Quando la distanza tra nuvole e bene è intorno ai 3 km siamo nelle condizioni favorevoli perché si abbia un fulmine. Basta superare la resistenza del dielettrico che c'è tra nuvole e bene (l'aria). Il fulmine può anche essere ascendente, ma quasi sempre è discendente.

Il tuono è dovuto all'improvviso riscaldamento e successiva dilatazione dell'aria. Alcuni fulmini si esauriscono nell'aria: solo 1/3 arriva a bene. La via non è diretta: ci sono ramificazioni e "indisposizioni" da parte del fulmine, che alla fine "sceglie" la via più conveniente.

- L'intensità di corrente del fulmine va da 3000 A a 10000 A. I cristalli d'acqua sfregano tra loro polarizzando le nuvole e producendo la differenza di potenziale con la bene (o con altre nuvole).

La puntazza può attirare i fulmini e fulminare quindi gli elettrodomestici. Iui pali dell'alba tensione (sunt'ess' pord, no attrane i fulmini) ci sono balconi che staccano i cavi all'occorrenza. Un tempo si rimaneva per ore senza corrente! Punte (alberi monti) attirano i fulmini perché le cariche si concentrano nelle zone a minor raggio di curvatura. Il parafulmine viene progettato a seconda delle zone, sulla base di un coefficiente N_b . Per l'Italia si hanno tre valori: 1,5, 2,5 e 4

Esistono due tipi di parafulmine: Franklin e Faraday.

Il primo si basa sul fatto che le cariche si concentrano nei punti a minor raggio di curvatura. È infatti una punta metallica che viene installata sul tetto di un edificio e collegata a terra con un filo metallico intrecciato. A causa dell'espansione termica esso si dilata e si contrae e deve essere periodicamente bruciato perché non vada a toccare il tetto o le pareti esterne dell'edificio (in tal caso l'effetto è rovinoso). Il raggio di captazione dei fulmini è di solito 3 volte l'altezza dell'edificio. In generale è dato dalla formula $r = 0,175 \cdot H \cdot I^{0,8}$, con H altezza dell'edificio, I intensità di corrente del fulmine espressa in kA. Infine $N_d = A_c \cdot N_b \cdot C$ è la formula che consente di determinare se è necessario o meno il parafulmine. N_d è il probabile numero annuo di fulmini i cui effetti possono essere pericolosi. N_b è il numero di fulmini che arrivano a terra ogni anno per chilometro quadro, 0,5. A_c è l'area di recedda della struttura.

Da una tabella si ricava la frequenza di fulminazione tollerabile N_e . Se $N_d < N_e$ non serve parafulmine, se $N_d > N_e$ sì.

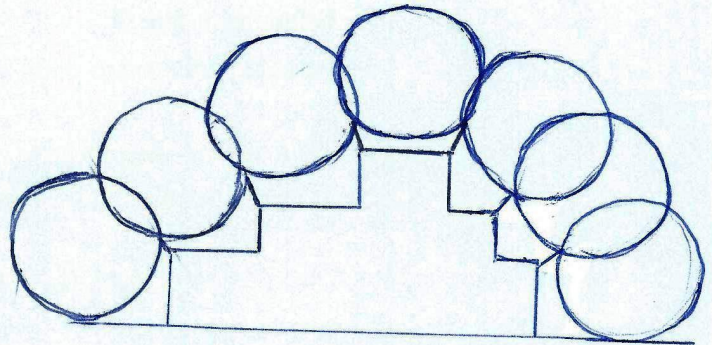
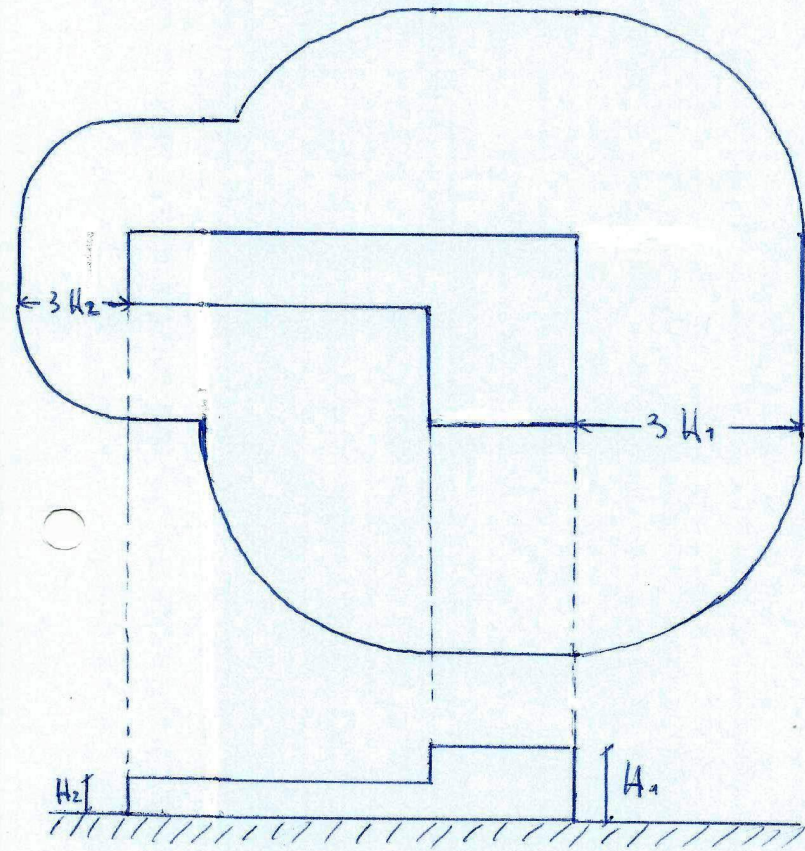
Comparsa anche C coefficiente correttivo di valore:

- 0,25 per case simili in altezza. Non si sa quale attiri il fulmine e quindi non bisogna mettere il parafulmine: si rischia di attardarsi e tagliarlo su una casa vicina;
- 0,5 per una casa molto più alta rispetto alle altre stanti. In quella va messo il parafulmine;
- 1 per alberi isolati o strutture isolate;
- 2 strutture isolate sulle colline.

Un altro coefficiente tiene conto del rischio di incendio e modifica l'area di influenza. Le ponteggiature attirano i fulmini, soprattutto sui monti. Bisogna verificare se e me,

cessano il parafulmine. Se non è necessario si dice che "il volume è subvolante".

Vediamo come disegnare l'area di influenza e determinare il numero di parafulmini necessari:



È il metodo della palla di cera, che deve scavalcare l'edificio toccando solo i parafulmini (dritti o inclinati al centro o sugli spigoli del tetto). Non deve toccare le parti piane dell'edificio. Più piccolo è il raggio meglio è!

I parafulmini Franklin sono coperti di vernice subvolante.

I parafulmini Faraday diciamo solo che consistono nella realizzazione di una gabbia attorno all'edificio sfruttando anche grondaie e cornici e piani.

