Circuiti elettrici

1. Resistenze
2. Condensatori
3. Circuiti in corrente continua
4. Circuiti in corrente alternata

Resistenza elettrica

*Georg Simon Ohm osservò sperimentalmente che la corrente che fluisce in un conduttore **è proporzionale** alla tensione applicata*

$$I \propto V$$

*Il filo oppone una **resistenza** al passaggio di corrente (come l'attrito di un condotto al flusso di un liquido)*

*La **resistenza** di un conduttore si definisce proprio come il rapporto tra **differenza di potenziale** applicata V e corrente I*

$$R = \frac{V}{I}$$

*Questa legge può anche essere **invertita** per calcolare la corrente I che passa nel conduttore di resistenza R a cui è applicata una tensione V*

$$I = \frac{V}{R}$$

o anche che per calcolare la tensione V ai capi di un conduttore di resistenza R in cui scorre una corrente I

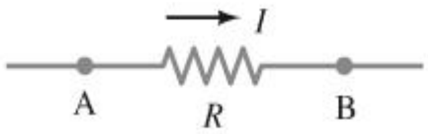
$$V = RI$$

Legge di Ohm

*L'equazione di Ohm è detta "legge" solo quando la resistenza R **non dipende** a sua volta da V o da I*

*Ad es., per una **lampadina la legge di Ohm non vale** perchè all'aumentare della corrente aumenta la temperatura e quindi la resistenza*

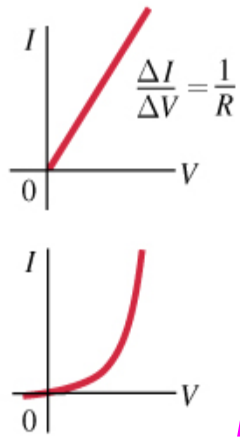
*I dispositivi per cui vale la legge di Ohm sono detti **resistori** (o **resistenze**) e sono indicati nei circuiti con il simbolo*



*I dispositivi che seguono la legge di Ohm sono detti **ohmici** e seguono una legge tra tensione V e corrente I di tipo **lineare** (come il grafico a)*

*Quelli che seguono una legge **non lineare** sono detti **non ohmici***

*La resistenza si misura in **Ohm (Ω)** pari ad un V/A*



Resistività

*Sperimentalmente si è trovato che la resistenza di un conduttore è **direttamente proporzionale** alla sua lunghezza ℓ e **inversamente proporzionale** alla sua sezione A*

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

Infatti a parità di corrente gli ostacoli che gli elettroni di conduzione trovano sul loro percorso sono tanto maggiori quanto più lungo è il filo e tanto minori quanto più spesso è il filo

*La costante di proporzionalità ρ è detta **resistività** e dipende dal materiale di cui il conduttore è composto e si misura in **Ohm per metro** (**Ω m**)*

*Si definisce **conduttività** l'inverso della resistività*

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Resistività

I **metalli** in genere e soprattutto **l'oro, l'argento e il rame** hanno resistività basse (o conduttività alte) dell'ordine di 10^{-8} Ω m

Gli **isolanti** (vetro, plastica ecc.) hanno resistività altissime dell'ordine di 10^{12}-10^{15} Ω m

I **semiconduttori** (silicio e germanio) hanno resistività intermedie (10^{-5}-10^{-1} Ω m)

TABELLA 25-1 Resistività e coefficiente termico (a 20 °C)

Materiale	Resistività $\rho(\Omega \cdot \mathrm{m})$	Coefficiente termico di resistività, $\alpha(^\circ\mathrm{C})^{-1}$
Conduttori		
Argento	1.59×10^{-8}	0.0061
Rame	1.68×10^{-8}	0.0068
Oro	2.44×10^{-8}	0.0034
Alluminio	2.65×10^{-8}	0.00429
Tungsteno	5.6×10^{-8}	0.0045
Ferro	9.71×10^{-8}	0.00651
Platino	10.6×10^{-8}	0.003927
Mercurio	98×10^{-8}	0.0009
Nichcrome (lega Ni,Fe,Cr)	100×10^{-8}	0.0004
Semiconduttori†		
Carbonio (grafite)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$	-0.0005
Germanio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$	-0.05
Silicio	$0.1 - 60$	-0.07
Isolanti		
Vetro	$109 - 10^{12}$	
Gomma dura	$1013 - 10^{15}$	

† I valori dipendono fortemente dalla presenza di quantità anche piccole di impurezze.

Resistività

La resistività (e quindi la resistenza) ***dipendono dalla temperatura*** *(ciò spiega perche la legge di Ohm non vale per la lampadina) secondo una equazione empirica*

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \alpha \left(T - T_0\right)\right]$$

Dove la costante α è detta ***coefficiente termico di resistività***

Per i ***conduttori*** *in genere a è* ***positivo*** *(la resistività aumenta con la temperatura)*

mentre per i ***semiconduttori*** *è in genere* ***negativo***

Nel primo caso, all'aumentare della temperatura ***aumenta l'oscillazione termica*** *e quindi gli elettroni liberi trovano più difficoltà nel loro moto*

Per i semiconduttori l'aumento di temperatura (almeno entro certi limiti) ***aumenta il numero di elettroni liberi*** *disponibili per la conduzione*

Per questi ultimi la resistività dipende anche dalla presenza di ***impurezze*** *("drogaggio")*

TABELLA 25-1 Resistività e coefficiente termico (a 20 °C)

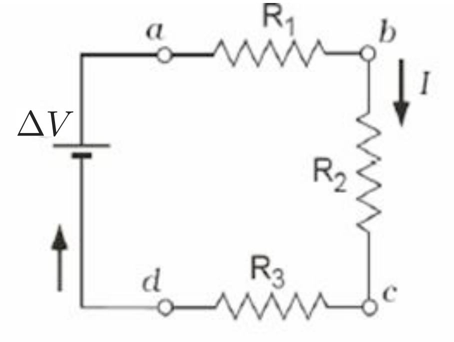
Materiale	Resistività $\rho(\Omega \cdot m)$	Coefficiente termico di resistività, $\alpha(°C)^{-1}$
Conduttori		
Argento	1.59×10^{-8}	0.0061
Rame	1.68×10^{-8}	0.0068
Oro	2.44×10^{-8}	0.0034
Alluminio	2.65×10^{-8}	0.00429
Tungsteno	5.6×10^{-8}	0.0045
Ferro	9.71×10^{-8}	0.00651
Platino	10.6×10^{-8}	0.003927
Mercurio	98×10^{-8}	0.0009
Nichcrome (lega Ni,Fe,Cr)	100×10^{-8}	0.0004
Semiconduttori†		
Carbonio (grafite)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$	− 0.0005
Germanio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$	− 0.05
Silicio	0.1− 60	− 0.07
Isolanti		
Vetro	$109 - 10^{12}$	
Gomma dura	$1013 - 10^{15}$	

† I valori dipendono fortemente dalla presenza di quantità anche piccole di impurezze.

Resistenze in serie e in parallelo

Serie

Per la conservazione delle cariche elettriche, la corrente nella prima resistenza (R_1), quella nella seconda (R_2) e quella nella terza (R_3) sono uguali, mentre diverse sono le differenze di potenziale (ΔV_1, ΔV_2, ΔV_3)

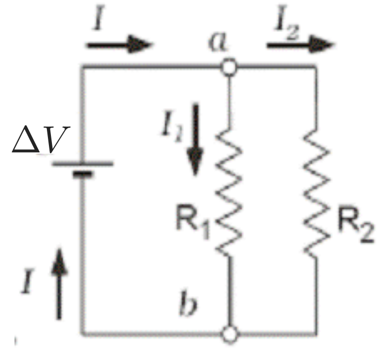


$$R_1 = \frac{\Delta V_1}{I};\ R_2 = \frac{\Delta V_2}{I};\ R_3 = \frac{\Delta V_3}{I}$$

$$R_T = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

Parallelo

La differenza di potenziale ai capi delle resistenze è la stessa, mentre la corrente si divide in I_1 e I_2



$$R_1 = \frac{\Delta V}{I_1};\ R_2 = \frac{\Delta V}{I_2}$$

$$R_T = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\Delta V}{I_1 + I_2} = \frac{\Delta V}{\frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2}} \Rightarrow \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Condensatore

*Due conduttori posti uno vicino all'altro ma **non a contatto** tra loro elettricamente costituiscono un **condensatore***

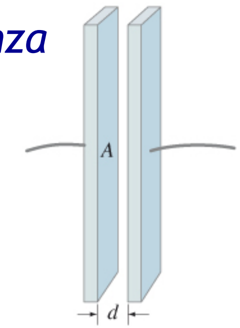
*cioè un un dispositivo elettrico in grado di **immagazzinare la carica elettrica**.*

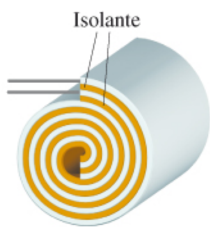
*I condensatori sono usati largamente negli **apparecchi elettronici** per immagazzinare una carica che può essere usata al momento opportuno (ad es. per attivare il flash delle macchine fotografiche o come stabilizzatore dell'alimentazione contro le variazioni della rete elettrica).*

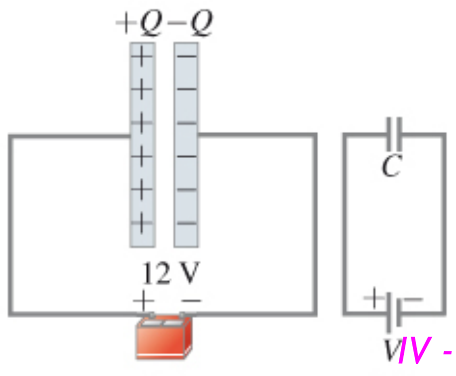
*I due conduttori possono essere **stesi o arrotolati**, possono essere separati **dall'aria o da un materiale isolante***

*Negli **schemi elettrici** il condensatore è indicato da due barrette parallele **uguali**.*

Le batterie** (sorgenti di una differenza di potenziale costante) sono rappresentate da due **barrette diverse** di cui **la più grande è il polo positivo







Capacità

*Se si applica una tensione (differenza di potenziale) ad un condensatore, collegandolo a una batteria, attraverso fili conduttori, le due **armature** si **caricano***

La tensione ai capi del condensatore è la stessa di quella ai capi della batteria

*Sperimentalmente, la **quantità di carica** Q su ogni armatura è data da*

$$Q = CV$$

*Dove C è una costante di proporzionalità che è detta **capacità***

*L'unità di misura della capacità è il **Farad (F)** pari a un Coulomb/Volt (C/V).*

I condensatori usati negli apparecchi elettronici hanno una capacità compresa tra 1 pF (10^{-12} F) a circa 10 mF (10^{-2} F)

La capacità non dipende da Q e da V** ma solo dalla **forma** e dalle **dimensioni** delle armature, dalla **distanza** tra i conduttori e dalla natura del **mezzo che li separa

Capacità

*La capacità può essere misurata **sperimentalmente** attraverso l'equazione*

$$C = \frac{Q}{V}$$

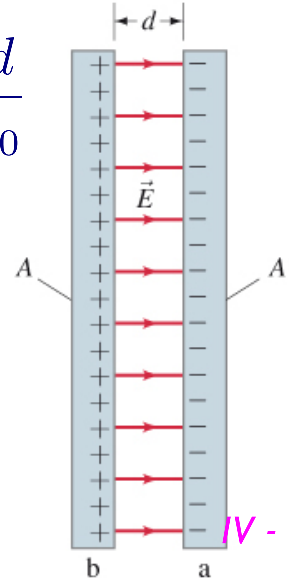
*Per geometrie semplici si può determinare anche **analiticamente**:*

*per un condensatore ad **armature piane e parallele separate da aria**, se la distanza d tra le armature è piccola rispetto alle dimensioni, il campo tra le armature è quasi costante e vale come visto*

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{A\epsilon_0}$$

La differenza di potenziale si ottiene integrando il campo lungo il percorso

$$V_{ba} = V_b - V_a = -\int_a^b \overline{E} \cdot \overline{d\ell} = \int_b^a \overline{E} \cdot \overline{d\ell} = \int_b^a E d\ell = Ed = \frac{Qd}{A\epsilon_0}$$



Da cui sostituendo

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Qd}{A\epsilon_0}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Energia in un condensatore

*Si può calcolare l'energia in un condensatore come il **lavoro** compiuto per caricare il condensatore ad una carica Q*

Inizialmente**, quando il condensatore è scarico **non occorre compiere lavoro** per trasportare una carica dq sulle armature, ma **man mano che il condensatore si carica** e quindi aumenta la tensione V tra le armature, a causa della repulsione elettrica, **occorre compiere lavoro

*Ricordando che il **lavoro** compiuto da una **forza esterna** e pari **all'energia potenziale acquisita dal sistema** e che la tensione elettrica è pari **all'energia potenziale per unità di carica***

$$qW = dU = V dq$$

***Integrando** tale lavoro da una carica 0 a una Q si ha*

$$U = W = \int_0^Q V dq = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{C}\left[\frac{1}{2}q^2\right]_0^Q = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

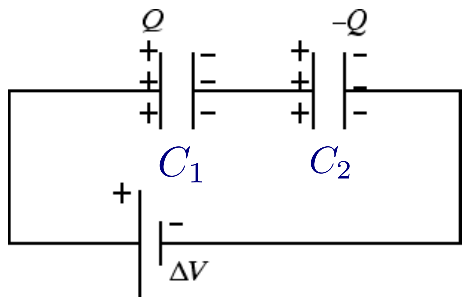
Oppure anche (ricordando che Q= CV)

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}\frac{(CV)^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV$$

Condensatori in serie e in parallelo

Serie

Le cariche Q sulle piastre dei due condensatori sono uguali tra loro. Infatti il generatore provvede a caricare positivamente una delle due piastre del condensatore di sinistra e negativamente una delle due piastre del condensatore di destra. Le altre due piastre si caricano per induzione elettrostatica. La differenza di potenziale ΔV fornita dal generatore la ritroviamo in parte (ΔV_1) ai capi del primo condensatore e in parte (ΔV_2) ai capi del secondo condensatore

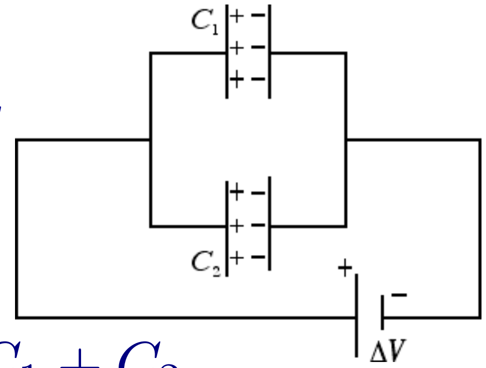


$$C_1 = \frac{Q}{\Delta V_1};\ C_2 = \frac{Q}{\Delta V_2}$$

$$\Delta V = \frac{Q}{C_T} = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \Rightarrow \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Parallelo

La differenza di potenziale ΔV su ciascun condensatore è la stessa, mentre la carica presente su ognuno dei due condensatori è diversa



$$C_1 = \frac{Q_1}{\Delta V};\ C_2 = \frac{Q_2}{\Delta V}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2)\Delta V = C_T \Delta V \Rightarrow C_T = C_1 + C_2$$

Dielettrici

*In molti condensatori, al posto dell'aria, viene inserito tra le armature un **materiale isolante** come carta o plastica che è chiamato **dielettrico**.*

*Esso serve innanzi tutto ad evitare che tra le due armature scocchino **scintille** innescate dalla ionizzazione dell'aria.*

*Inserendo un dielettrico quindi è possibile mantenere le due armature molto **più vicine**, aumentando così la capacità del condensatore.*

*Il dielettrico ha anche la proprietà di **polarizzarsi** e in questo modo di **aumentare la capacità del condensatore**. Infatti se C_0 è la capacità quando le armature sono separate da aria, quando è invece presente un dielettrico si ha*

$$C = \varepsilon_R C_0$$

*Dove ε_R è un numero maggiore di 1 detto **costante dielettrica relativa**. Quindi l'espressione della capacità di un condensatore a strati piani e paralleli diventa*

$$C = \varepsilon_R \varepsilon_0 \frac{A}{d} = \varepsilon \frac{A}{d}$$

*La quantità $\varepsilon = \varepsilon_R \varepsilon_0$ è detta **costante dielettrica assoluta** del materiale*

Dielettrici

I valori della costante dielettrica relativa possono essere anche molto maggiori di 1

TABELLA 24-1 Costanti dielettriche relative (a 20 °C)

Materiale	Costante dielettrica relativa ε_r	Rigidità dielettrica (V/m)
Vuoto	1.0000	
Aria (1 atm)	1.0006	3×10^6
Paraffina	2.2	10×10^6
Polistirene	2.6	24×10^6
Vinile (plastica)	2.4	50×10^6
Carta	3.7	15×10^6
Quarzo	4.3	8×10^6
Olio	4	12×10^6
Vetro	5	14×10^6
Gomma (neoprene)	6.7	12×10^6
Porcellana	6-8	5×10^6
Mica	7	150×10^6
Acqua (liquido)	80	
Titanato di stronzio	300	8×10^6

*In tabella sono anche riportati i valori della **rigidità dielettrica** che rappresenta il massimo valore di campo elettrico sopportabile dal materiale, prima che scocchi una scintilla*

L'acqua** avrebbe un'elevata costante dielettrica perchè è formata da **molecole polari**, ma ha una rigidità dielettrica sostanzialmente nulla perchè è **un conduttore

Dielettrici

Cosa produce l'aumento della capacità?

*Un dielettrico può essere composto da molecole polari che quindi si **orientano** oppure è il campo elettrico stesso che **induce** uno spostamento degli elettroni (comunque legati all'atomo) verso il polo positivo*

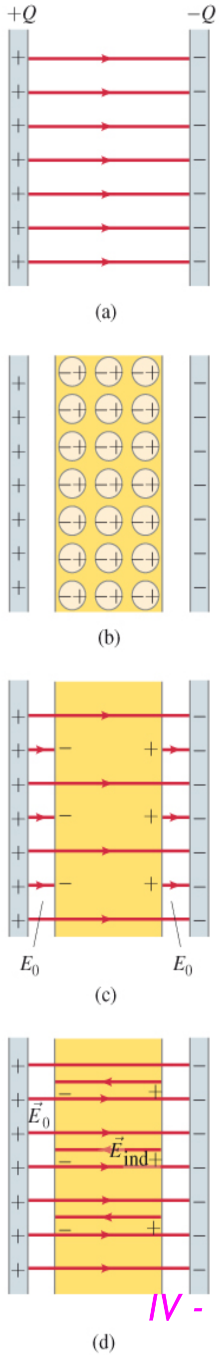
*In entrambi i casi si dice che il dielettrico **si polarizza**.*

*Poichè, a ogni carica negativa che si sposta o che si genera deve corrispondere lo spostamento o la generazione di una carica positiva, l'effetto netto è **un'eccedenza di cariche sul bordo del dielettrico** (positive sul lato dell'armatura negativa e negative sull'altro lato)*

*Una parte delle linee di forza quindi si interrompe su queste cariche **riducendo il campo elettrico** nell'intercapedine e anche la **differenza di potenziale** sulle armature, mentre **la carica rimane la stessa***

*In definitiva si ha così un **aumento della capacità**:*

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{V_0}{\varepsilon_R}} = \varepsilon_R C_0$$



Induttanza

Una corrente elettrica I che scorre in un circuito elettrico produce un campo magnetico nello spazio circostante. Il coefficiente di autoinduzione L del circuito è il rapporto tra il flusso del campo magnetico concatenato e la corrente, che nel caso semplice di una spira è dato da:

$$L = \frac{\Phi_B}{I}$$

L'unità di misura dell'induttanza è detta henry: 1 H = 1 Wb / 1 A, in onore di Joseph Henry. In un induttore di 1 henry, quindi, una variazione di corrente di 1 ampere al secondo genera una forza elettromotrice di 1 volt.

*Si chiama **induttore**, l'elemento circuitale che possiede un'induttanza.*

Induttore con corrente variabile

Se la corrente varia nel tempo, il flusso magnetico Φ_B del campo concatenato al circuito risulta variabile, determinando entro il circuito una f.e.m. indotta che si oppone alla variazione del flusso.

$$\Phi_B = LI \Rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt} \underset{L \text{ costante}}{\Rightarrow} \frac{d\Phi_B}{dt} = L\frac{dI}{dt}$$

dalla Legge di Faraday:

$$V = \mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

si ha:

$$V(t) = -L\frac{dI(t)}{dt} = L\frac{d^2q(t)}{dt^2}$$

dove q(t) è la carica elettrica che attraversa l'induttore e, per la conservazione della carica elettrica

$$I = -\frac{dq(t)}{dt}$$

Energia contenuta in un'induttanza

Supponiamo che un'induttore sia connesso a un generatore DC variabile che aumenta la corrente che attraversa l'induttore da 0 a un valore finale I_{finale}.

Quando la corrente aumenta, viene generato un potenziale $V = -L\,dI/dt$ che si oppone all'aumento di corrente.

Bisogna compiere del lavoro contro questo potenziale per poter caricare l'induttore. Il lavoro fatto durante un tempo dt è:

$$dW = Pdt = -IV\,dt = IL\frac{dI}{dt}dt = LIdI$$

dove P è la potenza elettrica ($P\!=\!IV$)

Integrando nel tempo

$$W = L\int_0^{I_{\text{finale}}} IdI = \frac{1}{2}LI_{\text{finale}}^2$$

Potenza elettrica

In alcuni dispositivi (come stufe, fornelli o lampadine) l'energia elettrica viene trasformata in altre forme di energia come luce o calore

*Questo avviene perchè gli **elettroni accelerati** dal campo elettrico **collidono** con gli atomi del conduttore provocando l'emissione di **radiazione termica o luminosa***

*La **velocità** con cui l'energia (potenziale) elettrica viene trasformata in energia termica o luminosa è la **potenza elettrica** del dispositivo*

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{d(qV)}{dt} = \frac{dq}{dt}V = IV$$

*Dove si è assunto che **il potenziale V sia costante nel tempo***

è facile mostrare che il prodotto dell'intensità di corrente I per la tensione V è effettivamente una potenza ($[M\ L^2\ T^{-3}]$) che si misura in W ovvero in J/s, in quanto:

I è una carica per unità di tempo $[Q\ T^{-1}]$ e si misura in A (ovvero Coulomb/secondo)
V è un'energia per unità di carica $[M\ L^2\ T^{-2}\ Q^{-1}]$ e si misura in V (ovvero Joule/Coulomb), quindi

$$[Q\ T^{-1}][M\ L^2\ T^{-2}\ Q^{-1}]=[M\ L^2\ T^{-3}]$$

Potenza ed energia elettrica

Utilizzando la legge di Ohm l'espressione della potenza elettrica si può anche scrivere come

$$P = IV = I(IR) = I^2R$$

oppure

$$P = IV = \left(\frac{V}{R}\right)V = \frac{V^2}{R}$$

*Tali equazioni valgono solo **per conduttori ohmici** mentre P=IV **vale in tutti i casi**.*

*La **potenza elettrica installata** è una caratteristica degli impianti elettrici che indica la quantità massima di energia disponibile nell'unità di tempo.*

In quelli di casa è di solito 3 kW che sono appena sufficienti per alimentare una lavatrice mentre scalda l'acqua (attraverso una resistenza elettrica) o una stufa elettrica, ma non entrambe (in questo caso la corrente "salta" per eccessiva richiesta)

*Il **consumo di energia elettrica** (che è quello che si paga), di solito non si misura in J ma in **kilowattora** (kWh).*

*Il kWh corrisponde all'energia erogata in un'ora (3600 s) da una potenza di 1000 W, ovvero: **1 Kwh =3.6 x 10^6 J***

Corrente alternata

*La corrente prodotta da una pila elettrica scorre in modo **continuo** sempre dal polo positivo a quello negativo. Per questo motivo è detta **corrente continua** (**DC** dall'inglese direct current)*

*L'alimentazione fornita dalla rete elettrica invece è in **corrente alternata** (**AC**: alternate current). Il motivo è che per la produzione e il trasporto a distanza tramite fili elettrici, tale modalità risulta più efficiente (meno perdite)*

*Nella corrente alternata il verso di percorrenza degli elettroni si **inverte periodicamente** (con una frequenza ν=50 Hz)*

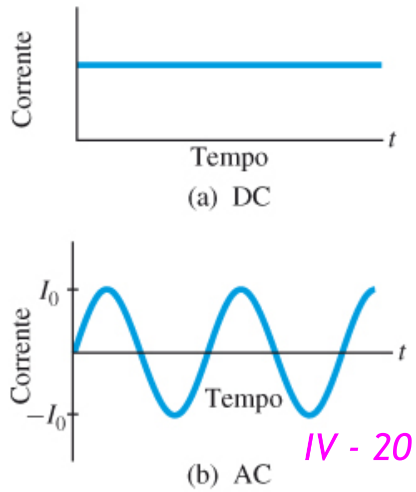
*L'andamento nel tempo della **tensione** in un impianto a corrente alternata segue una legge **sinusoidale***

$$V = V_0 \cos 2\pi\nu t = V_0 \cos \omega t$$

*dove la tensione V_0 è detta **tensione di picco**. Di conseguenza anche la **corrente** in una resistenza R risulta sinusoidale*

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \cos \omega t = I_0 \cos \omega t$$

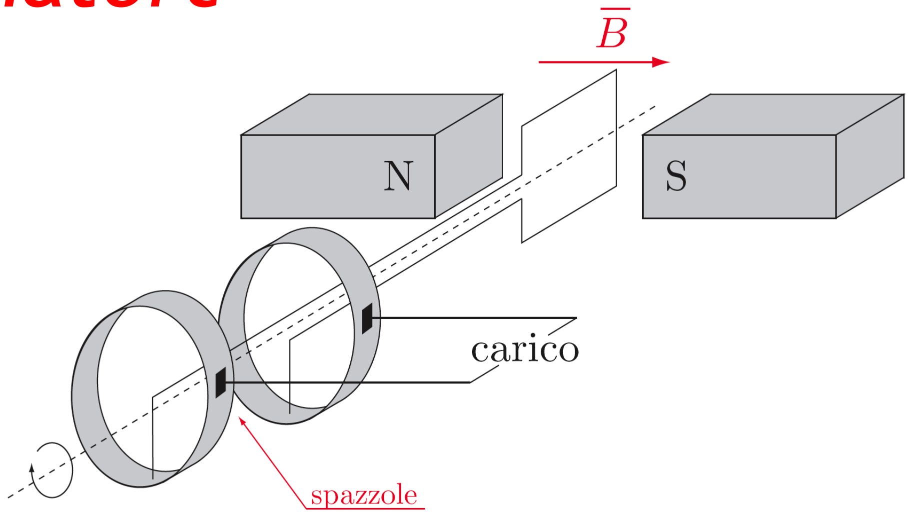
*Dove la corrente I_0 è detta analogamente **corrente di picco***



Alternatore

Principio:

- *la spira ruota all'interno del campo magnetico (costante);*
- *il flusso di campo magnetico attraverso la spira varia in modo sinusoidale nel tempo;*
- *viene generata una forza elettromotrice nel circuito secondo la legge di Faraday.*



$$\Phi = BA\cos\omega t$$

Flusso di campo di induzione magnetica attraverso la superficie A

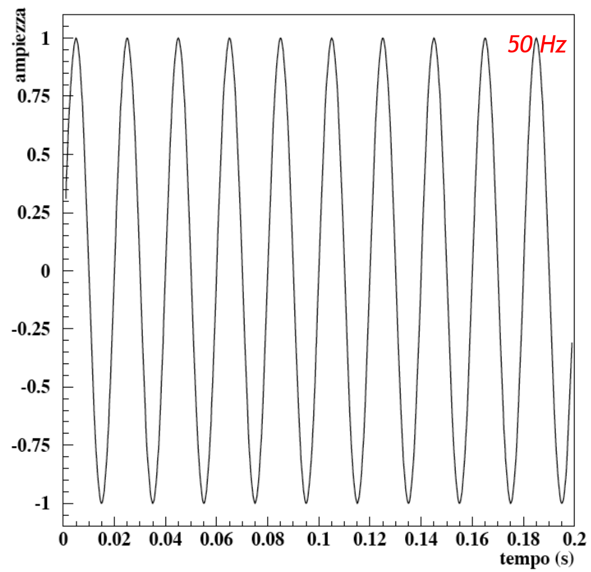
Campo di induzione magnetica

Area della spira

Frequenza di rotazione della spira

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi}{dt} = -NAB\frac{d}{dt}(\cos\omega t) = NAB\omega\sin\omega t$$

Forza elettromotrice indotta

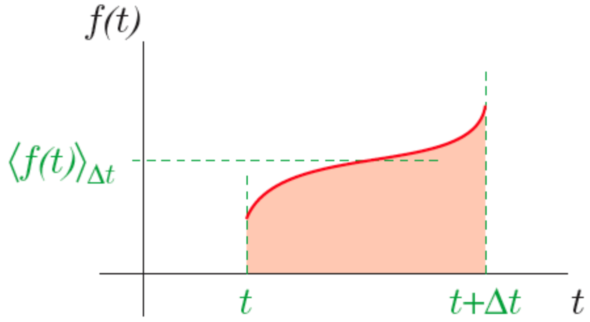


In un sistema reale sono le bobine che ruotano e le spire stanno ferme (v. Energia).

Potenza della corrente alternata

Nota: media di una funzione

$$\langle f(t)\rangle_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t} f(t)dt$$



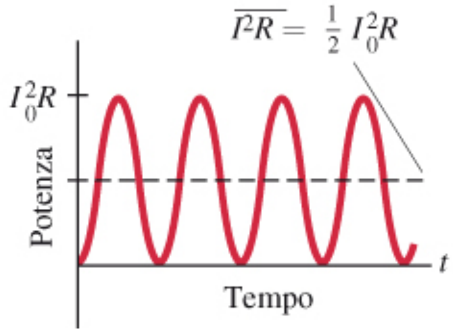
$$\int_0^{2\pi}\cos^2\theta d\theta = \int_0^{2\pi}\sin^2\theta d\theta;\ \cos^2\theta+\sin^2\theta = 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \int_0^{2\pi}\cos^2\theta d\theta = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\cos^2\theta+\sin^2\theta = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} d\theta = \pi$$

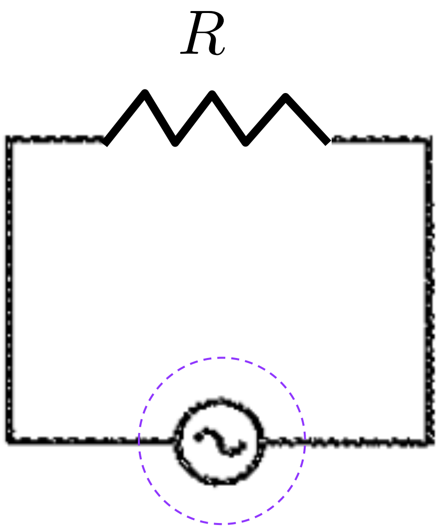
$$\langle\cos^2\theta\rangle = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\cos^2\theta d\theta = \frac{\pi}{2\pi} = \frac{1}{2}$$

*La potenza della **corrente alternata** risulta **la metà** della potenza della **corrente continua** corrispondente ai **valori di picco:***

$$\langle P\rangle = \frac{1}{2}RI_0^2$$



Circuiti in corrente alternata (R)



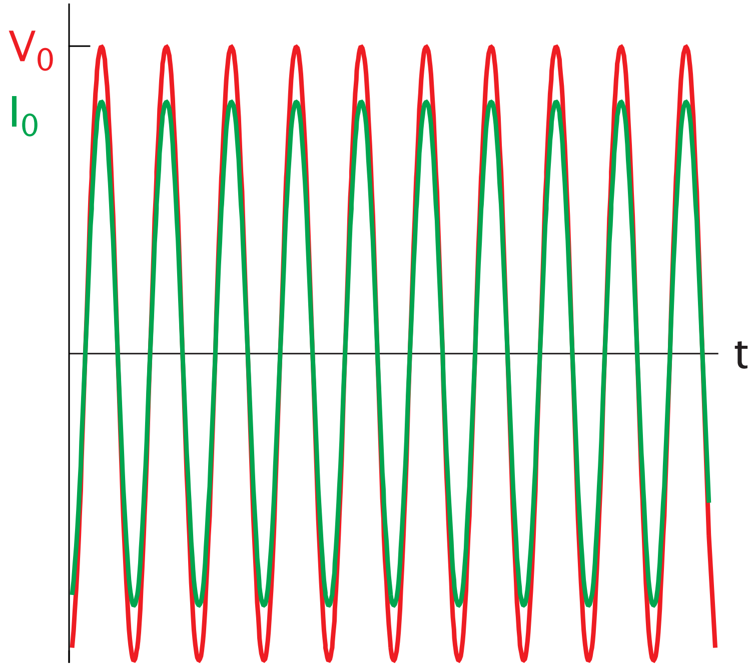
Generatore in corrente alternata

Corrente: $I = I_0 \cos \omega t$

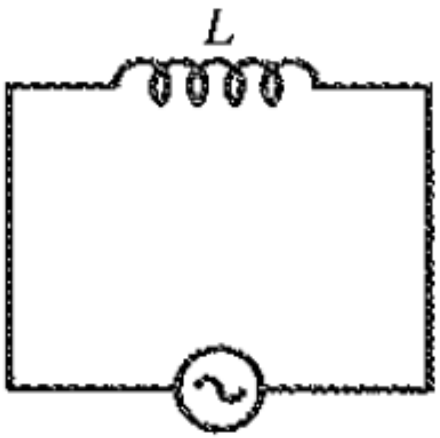
Voltaggio: $V = V_0 \cos \omega t$

Potenza:

$$P = IV = I_0 V_0 \cos^2 \omega t$$



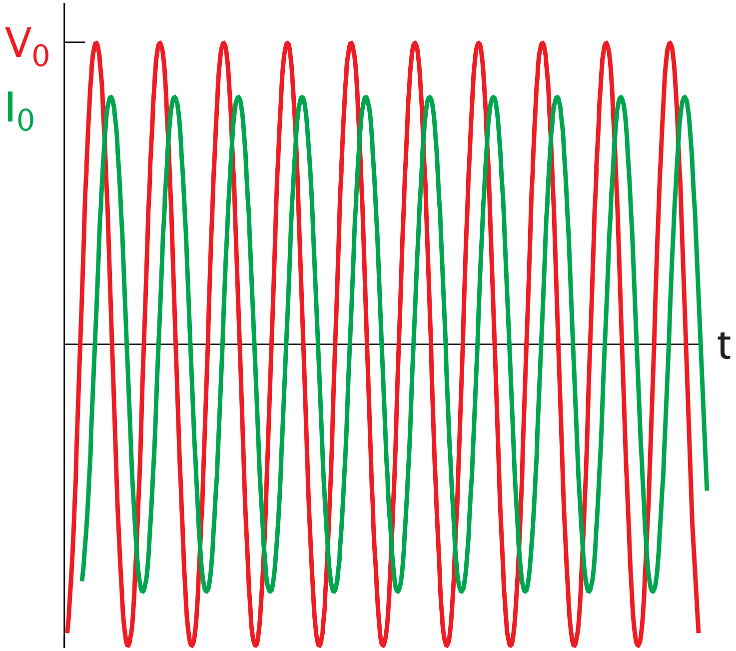
Circuiti in corrente alternata (L)

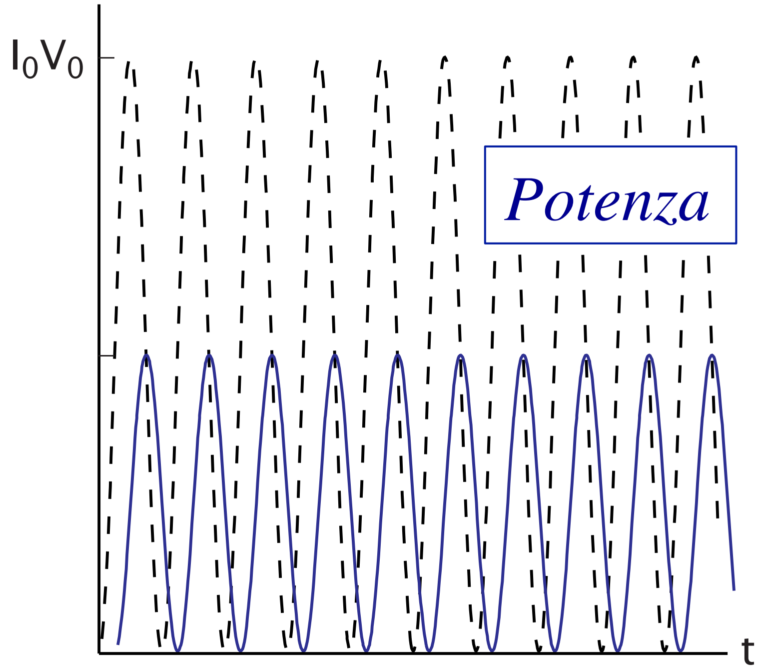


Corrente: $I = I_0 \cos \omega t$

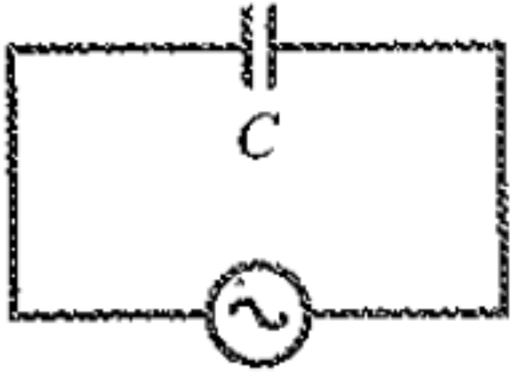
(contro)voltaggio indotto da L:

$$V = L\frac{dI}{dt} = -\omega L I_0 \sin \omega t$$
$$= \omega L I_0 \cos(\omega t + \pi/2)$$





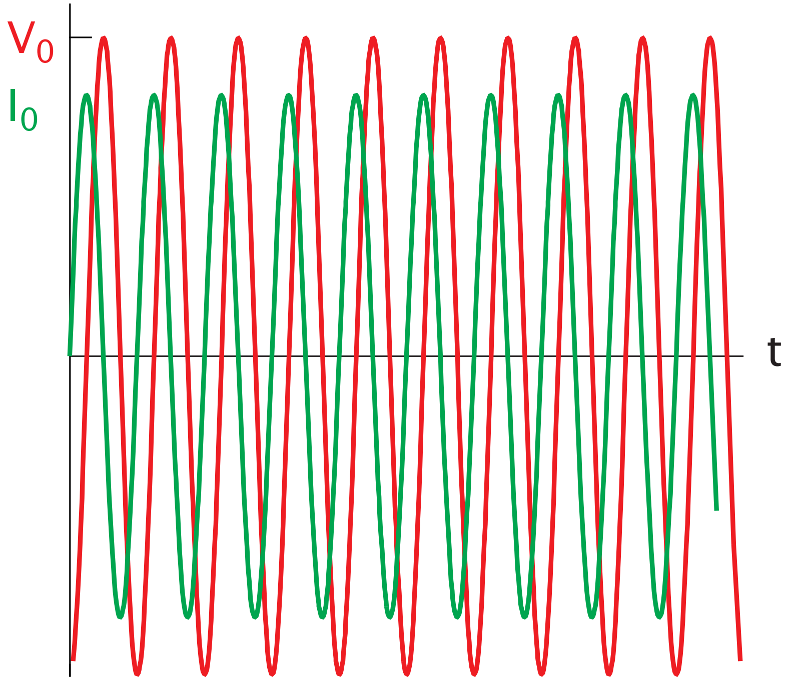
Circuiti in corrente alternata (C)



Voltaggio su C: $V = \dfrac{Q}{C}$

$$I = \frac{dQ}{dt} \Rightarrow Q = \int_0^t I_0 \cos \omega t dt$$

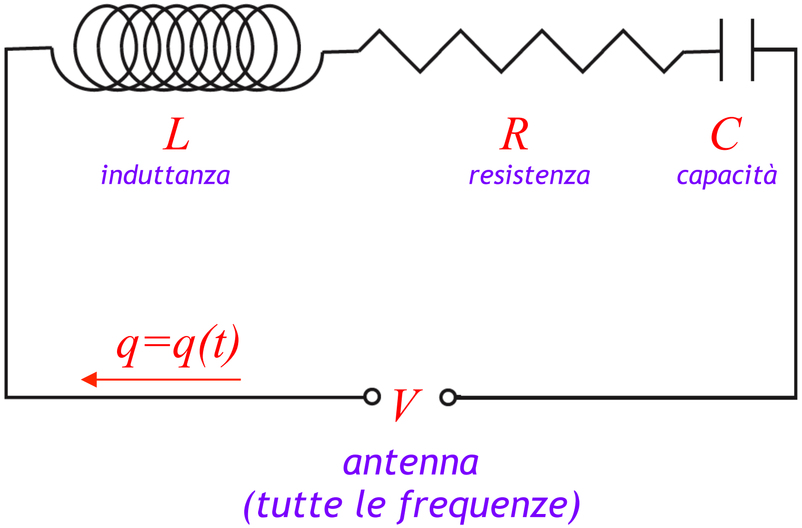
$$= \frac{I_0}{\omega} \sin \omega t$$



$$V = \frac{I_0}{\omega C} \sin \omega t$$

$$= \frac{I_0}{\omega C} \cos(\omega t - \pi/2)$$

Sintonizzatore radio



$$V(t) = L\frac{d^2q(t)}{dt^2} + R\frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C}$$

$$\frac{V(t)}{L} = \frac{d^2q(t)}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{LC}$$

$$\omega_n = \frac{1}{LC}$$

$$q_0 = \frac{V_0}{L\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2) + (R/L)^2\omega^2}}$$

Variando C varia ω_n: l'ampiezza del segnale rivelato è massima per la frequenza (ω_n) su cui la radio è "sintonizzata" (effetto di risonanza)

Superconduttività

A temperature molto basse non lontane dallo 0 assoluto (-273 °C) la resistività di certi metalli o certi composti è ***pressochè nulla****. Si dice allora che tali sostanze si trovano in uno stato di* ***superconduttività***

Il fenomeno è stato scoperto da Kamerlingh Omnes nel 1911 per il mercurio raffreddato a -269 °C.

Successivamente è stato verificato a temperature più alte (fino a circa -110 °C per alcune sostanze ceramiche)

A temperature inferiori ad un valore critico T_C, la resistività risulta inferiore a circa ***10^{-25} Ω/m cioè circa 16 ordini di grandezza inferiore a quella del rame***

Questa proprietà potrebbe essere utilizzata per realizzare ***linee di distribuzione dell'energia elettrica*** *senza perdite*

Viene utilizzata anche per realizzare magneti potentissimi utilizzati negli ***acceleratori di particelle*** *o nei* ***reattori a fusione***