

Corso di Misure Elettroniche
modulo di
Fondamenti di misure a microonde

Concetti base di elettromagnetismo

Prof. Luca Perregrini

Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia
e-mail: luca.perregrini@unipv.it, web: microwave.unipv.it

Sommario

- Forza, lavoro, energia, potenza
- Carica elettrica e principio di conservazione, Legge di Coulomb
- Campo elettrico, corrente e tensione, potenza ed energia elettrica
- Campo magnetico
- Forza di Lorentz, forze agenti tra correnti elettriche
- Equazioni di Maxwell e potenza elettromagnetica

Forza

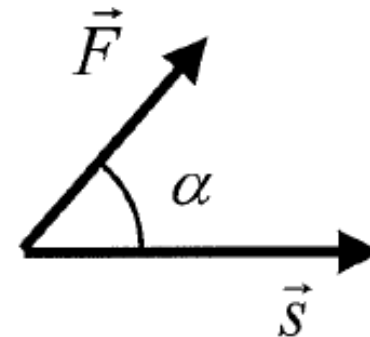
Una forza è una qualunque causa esterna che produce una variazione dello stato di moto o di quiete di un corpo

La forza è rappresentata da un vettore.
Il suo modulo si misura in Newton (N)

Lavoro

Il lavoro è il prodotto scalare tra la forza esercitata e lo spostamento ottenuto

$$\vec{L} = \vec{F} \cdot \vec{s}$$



Il lavoro si misura in Joule (J).
1 J = 1 N m

Energia

L'energia è la capacità potenziale di compiere lavoro

L'energia (come il lavoro) si misura in Joule (J)

L'energia si manifesta in forme diverse e si può trasformare da una forma all'altra. Il lavoro compiuto su un corpo diventa energia immagazzinata, cioè capacità di compiere ulteriore lavoro.

- cinetica
- potenziale gravità
- potenziale elastica
- potenziale elettrica
- termica (calore)
- chimica
- nucleare
-

PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

**In un sistema isolato, l'energia totale rimane costante.
L'energia non si crea e non si distrugge: si trasforma!**

Potenza

La potenza è il lavoro compiuto per unità di tempo

$$\text{potenza} = \frac{\text{lavoro compiuto}}{\text{tempo impiegato}} = \frac{L}{\Delta t}$$

La potenza si misura in Watt (W). $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

Una macchina è tanto più “potente” quanto più riesce a fornire una certa prestazione nel minor tempo possibile.

$$\text{potenza} = \frac{\vec{F} \cdot \vec{s}}{\Delta t} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Definizione equivalente:
Potenza = forza • velocità

Carica elettrica

La carica è una proprietà delle particelle che costituiscono la materia e si misura in Coulomb (C)

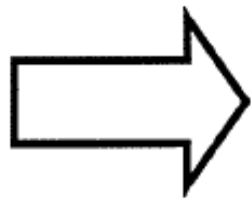
Carica dell'elettrone: $e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Un corpo può avere carica elettrica positiva o negativa

Conservazione della carica elettrica

Legge di conservazione della carica

La carica elettrica non si può creare né distruggere, ma solo trasferire



La carica elettrica totale di un sistema isolato non può variare

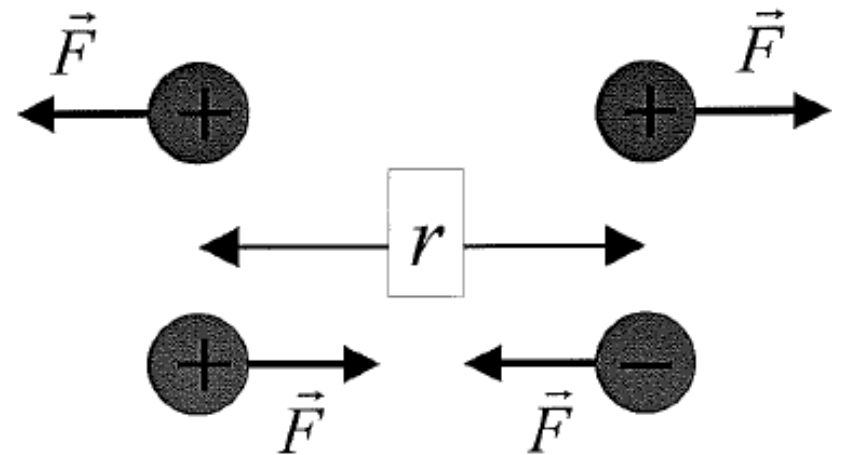
Legge di Coulomb

L'interazione elettrostatica fra due particelle cariche è proporzionale alle loro cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza. La direzione della forza è quella della linea congiungente le cariche stesse

$$\vec{F} = K_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$K_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.987 \cdot 10^9 \approx 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

ϵ_0 è detta permittività dielettrica del vuoto



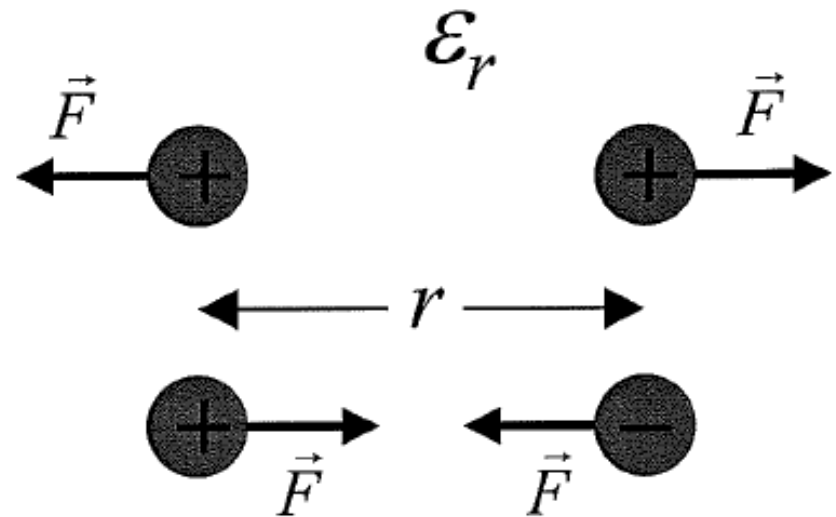
Legge di Coulomb

Se le cariche si trovano in un mezzo materiale, l'interazione elettrostatica diminuisce

$$\vec{F} = K_e' \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$K_e' = \frac{K_e}{\epsilon_r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}$$

ϵ_r è detta costante dielettrica relativa
Per i materiali naturali si ha $\epsilon_r > 1$.



Campo elettrico

La presenza di una carica elettrica Q crea nella regione circostante un campo di forza, detto campo elettrico

Ogni altra carica q (“carica di prova”) che si trova in quella regione risente di una forza di attrazione/repulsione dovuta alla presenza della carica “sorgente” Q .

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = q\vec{E}$$

Esempi di campi elettrici

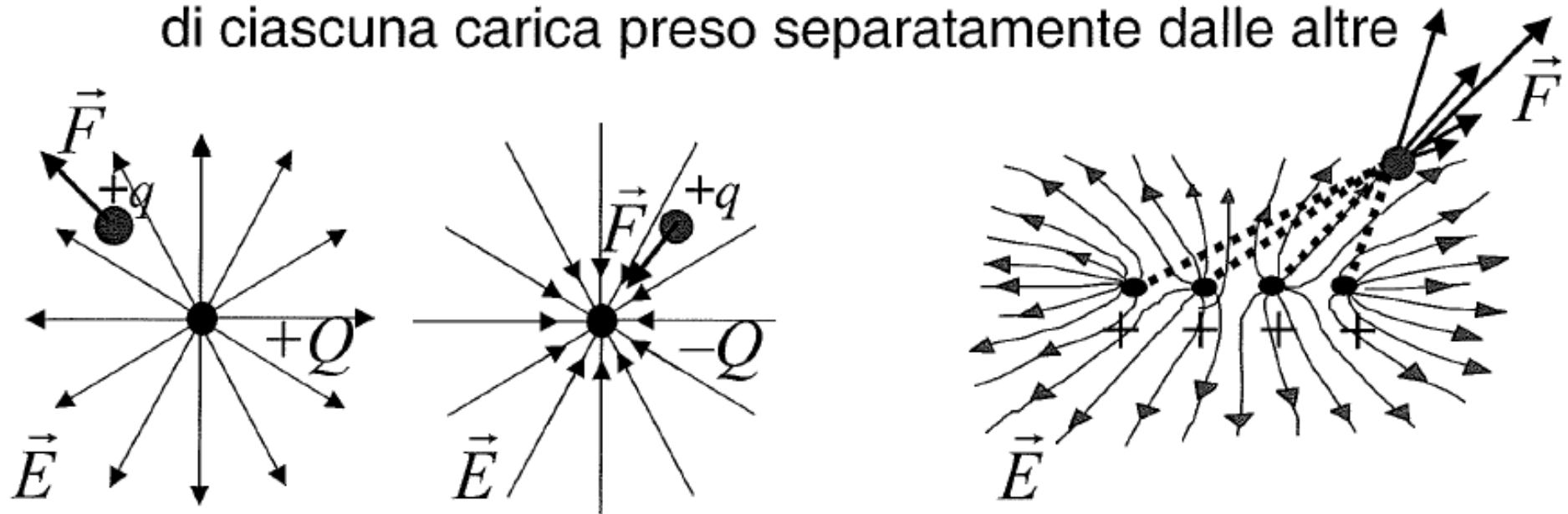
Carica puntiforme Q :

$Q > 0 \Rightarrow$ linee di forza uscenti (forza repulsiva su q)

$Q < 0 \Rightarrow$ linee di forza entranti (forza attrattiva su q)

Distribuzione di cariche:

La forza su q è la risultante vettoriale del contributo di ciascuna carica preso separatamente dalle altre



Campo elettrico

$$\vec{F} = K_e \frac{Qq}{r^2}$$

$$K_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$



$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r$$

\vec{u}_r versore radiale uscente dalla carica Q

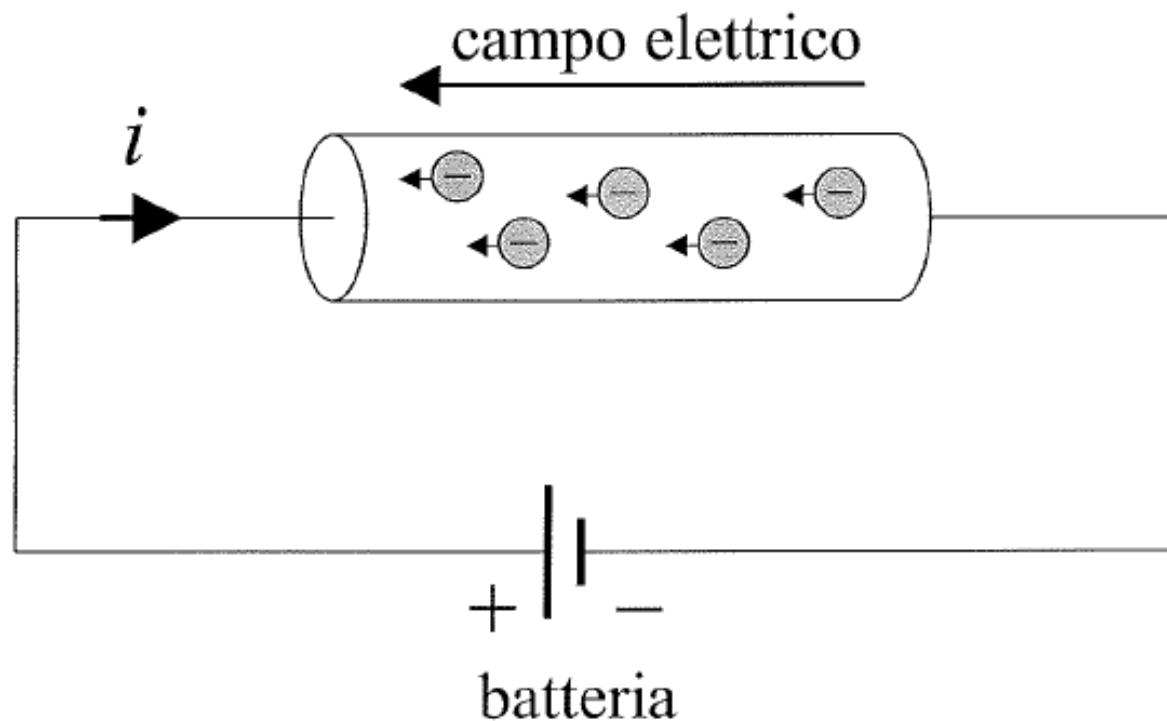
Campo elettrico

In presenza di una distribuzione continua di carica in un volume V riempito con un mezzo di costante dielettrica relativa ϵ_r si ha:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \int_V \frac{Q \vec{u}_r}{r^2} dV$$

Corrente elettrica

La corrente elettrica è dovuta al movimento ordinato delle cariche elettriche in presenza di una forza esterna



Corrente elettrica

La corrente elettrica è la velocità di variazione nel tempo della carica elettrica e si misura in ampere (A)

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \Rightarrow \quad q = \int_0^t i dt$$

Se i non varia nel tempo

⇒ corrente stazionaria o continua

Se i varia nel tempo sinusoidalmente

⇒ corrente alternata

Tensione

La forza elettromotrice che compie il lavoro necessario a spostare le cariche (e quindi a creare una corrente) viene detta *tensione* o *differenza di potenziale*

La tensione v_{ab} fra due punti a e b di un circuito è l'energia necessaria per spostare una carica unitaria da a a b

Tensione

$$v_{ab} = \frac{dw}{dq}$$

w energia in Joule (J)

q carica in Coulomb (C)

La tensione v si misura in *volt* (V)

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C} = 1 \text{ N}\cdot\text{m/C}$$

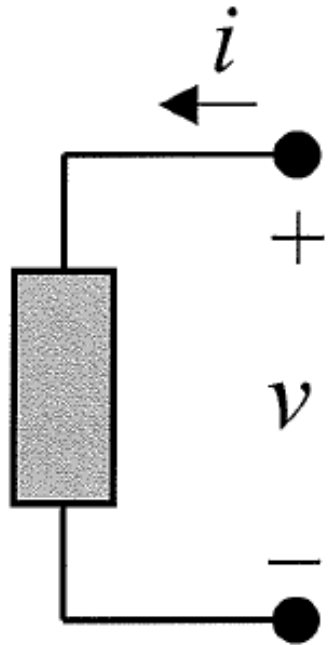
Potenza ed energia

La potenza è la rapidità di assorbimento o emissione di energia nel tempo

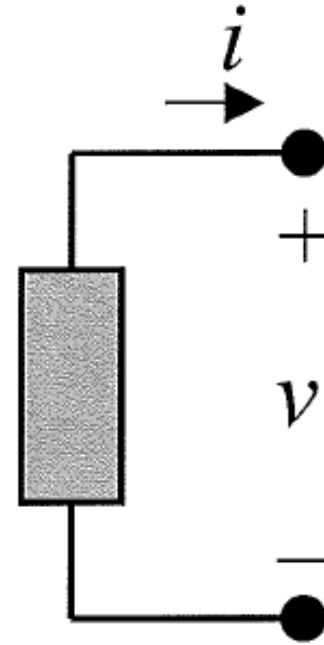
$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = v \cdot i$$

$p = v \cdot i$ è la potenza istantanea assorbita o erogata da un elemento

Convenzione degli utilizzatori



$$p = + v \cdot i$$



$$p = - v \cdot i$$

$p > 0$ potenza assorbita dall'elemento
 $p < 0$ potenza erogata dall'elemento

Energia Elettrica

L'energia elettrica assorbita o erogata da un elemento dall'istante t_0 all'istante t è

$$w = \int_{t_0}^t p \, dt = \int_{t_0}^t v \cdot i \, dt$$

Le aziende produttrici di energia elettrica misurano l'energia in wattore (Wh):

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

Campo Magnetico

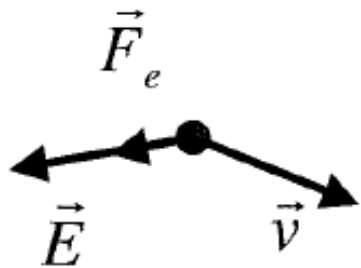
Alcuni materiali hanno la proprietà di generare forze di attrazione o repulsione tra di loro, non riconducibili a interazioni gravitazionali o elettriche

Tali forze vengono attribuite ad un nuovo tipo di campo di forza: il campo di induzione magnetica \vec{B}

Oltre che con materiali magneti, il campo magnetico interagisce con le cariche elettriche in movimento.

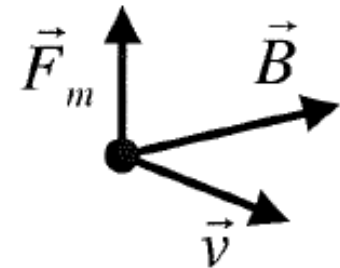
Forza di Lorentz

Su una carica in moto con velocità \vec{v} in una regione in cui vi siano un campo elettrico e un campo magnetico agisce la forza di Lorentz:



$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

The equation is annotated with two ovals. The first oval encircles the term $q\vec{E}$ and has an arrow pointing downwards. The second oval encircles the term $q\vec{v} \times \vec{B}$ and also has an arrow pointing downwards.



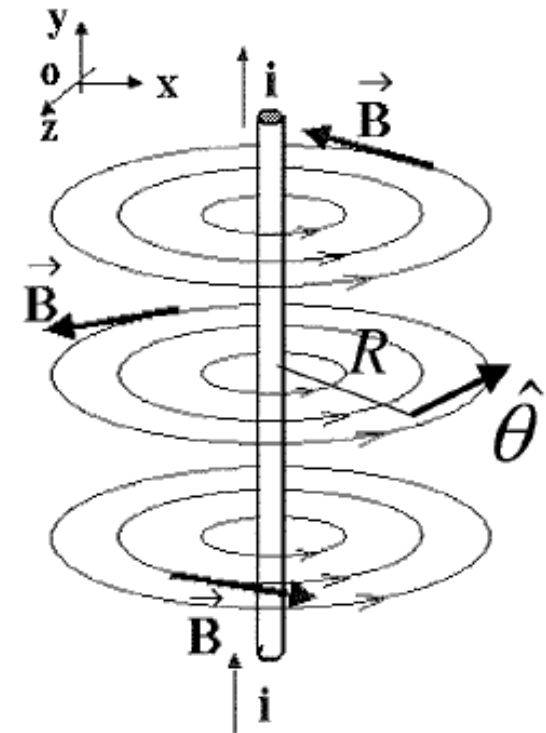
Accelerazione o
rallentamento dovuto
al campo elettrico

Deviazione della
traiettoria dovuta al
campo magnetico

Formula di Biot-Savart

Se la corrente è rettilinea, dalla legge di Ampère-Laplace si deduce:

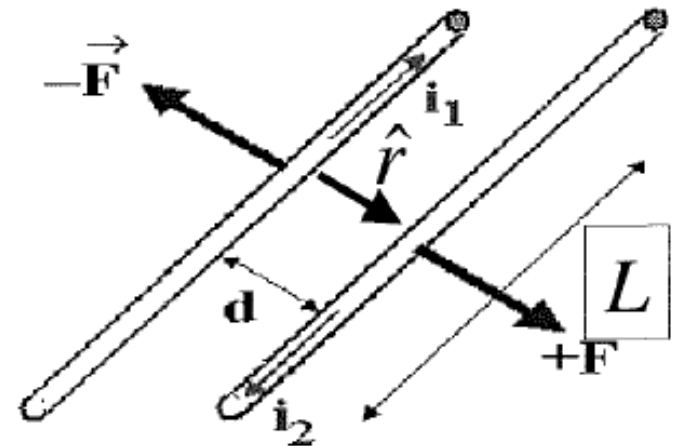
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \hat{\theta}$$



Forze tra correnti

Una corrente produce un campo magnetico. In presenza di un campo magnetico una corrente è soggetta ad una forza. Pertanto due correnti vicine interagiscono.

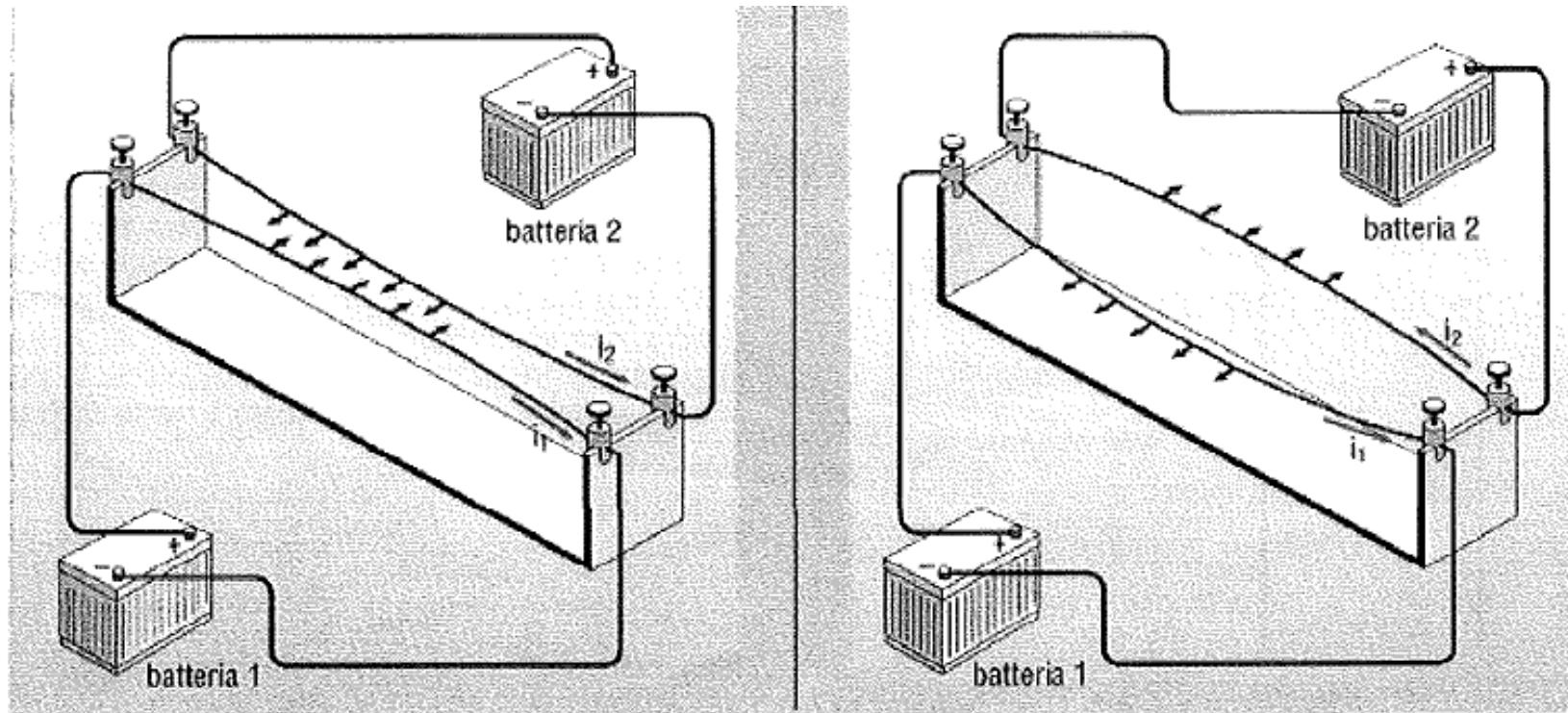
$$\vec{F} = -\hat{r} \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi R} L$$



Due fili (circuiti) percorsi da corrente

- si attraggono se le correnti sono dirette nello stesso senso
- si respingono se le correnti sono dirette in senso opposto.

Forze tra correnti



Due fili (circuiti) percorsi da corrente

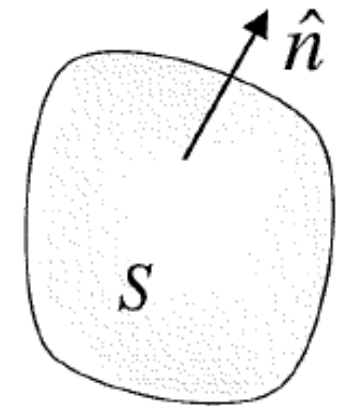
- si attraggono se le correnti sono dirette nello stesso senso
- si respingono se le correnti sono dirette in senso opposto.

Le equazioni di Maxwell

Legge di Gauss per il campo elettrico

Forma integrale:

$$\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0}$$



volume V

Forma differenziale:

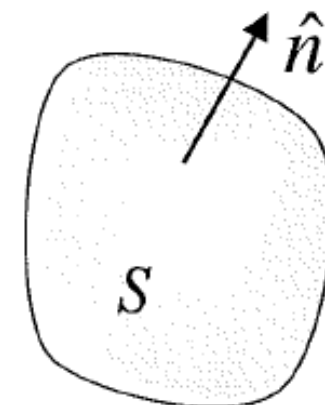
$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

Le equazioni di Maxwell

Legge di Gauss per il campo magnetico

Forma integrale:

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0$$



Forma differenziale:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

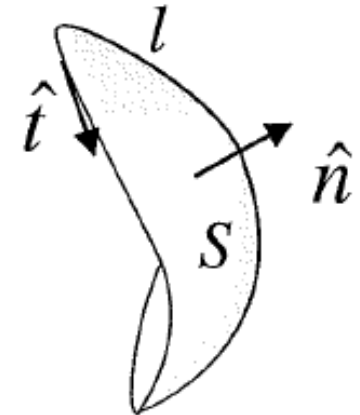
volume V

Le equazioni di Maxwell

Legge di Faraday-Henry

Forma integrale:

$$\oint_l \vec{E} \cdot \vec{t} dl = - \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot \hat{n} dS$$



Forma differenziale:

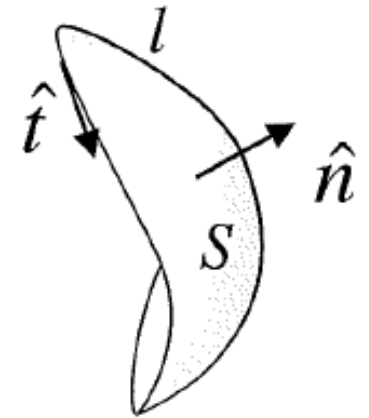
$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{d}{dt} \vec{B}$$

Le equazioni di Maxwell

Legge di Ampere-Maxwell

Forma integrale:

$$\oint_l \vec{B} \cdot \vec{t} \, dl = \mu_r \mu_0 I + \varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS$$



Forma differenziale:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{J} + \varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0 \frac{d}{dt} \vec{E}$$

Potenza elettromagnetica

La potenza elettromagnetica che attraversa la superficie S è data da:

$$P = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \int_S \vec{E} \times \vec{B} \cdot \hat{n} dS$$

