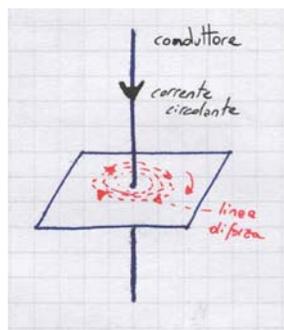


Nozioni sui campi elettromagnetici

Un conduttore attraversato da corrente elettrica continua produce nelle vicinanze un campo magnetico ed esiste quindi un'interazione tra campi elettrici e campi magnetici. In particolare prendendo come riferimento un filo rettilineo di lunghezza indefinita si ha una situazione come in figura



Nelle condizioni rappresentate viene a generarsi un **campo magnetico B** di intensità decrescente a mano a mano che ci si allontana dal conduttore. Tale campo magnetico ha linee di forza disposte secondo cerchi concentrici e il verso di esse si determina con la **regola del cavatappi**; immaginando di avvitare un cavatappi nel verso della corrente circolante nel conduttore, si ottiene il verso delle linee di forza.

Il campo magnetico è calcolabile mediante la relazione:

$$B = K * I / r$$

nella suddetta relazione, chiamata **legge di Biot e Savart**, I è l'intensità della corrente circolante nel filo, r è la distanza dal filo e k una costante che dipende dal mezzo che circonda il filo. Il campo magnetico viene espressa in **Tesla T**.

Per quanto riguarda k esso è espresso nella forma:

$$k = \mu / 2 \pi$$

Dove μ rappresenta la **permeabilità** del mezzo e per il vuoto (e praticamente anche per l'aria) vale $4\pi * 10^{-7}$.

In particolare la permeabilità nel vuoto funziona da riferimento e viene indicata con μ_0 . Le permeabilità di tutti i materiali sono riferite a μ_0 nella forma:

$$\mu = \mu_r * \mu_0$$

dove μ_r è detta **permeabilità relativa**, relativa appunto alla permeabilità nel vuoto.

Questo ci dice che la legge di Biot e Savart può essere anche riscritta, nel caso di filo rettilineo di lunghezza indefinita come:

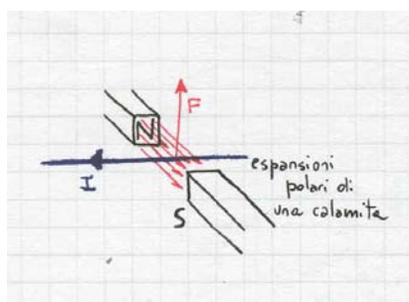
$$B = (\mu_0 / 2\pi) * (I/r)$$

Il fattore $I / (2\pi r)$ è definito **vettore di intensità magnetica** e viene indicato con **H** e si misura in **Asp/m** ovvero Ampere spire per metro.

Sicché si ha che $B = \mu * H$ e conseguentemente che $H = B / \mu$. Questo ci fa capire che l'intensità del campo è direttamente proporzionale al campo applicato e inversamente proporzionale alla permeabilità del mezzo.

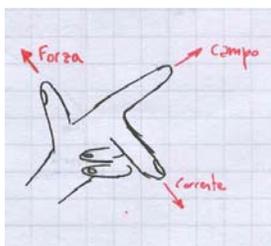
Alla stessa maniera in cui un passaggio di corrente genera un campo magnetico nelle vicinanze del conduttore, si può tranquillamente sostenere che una variazione di campo magnetico nelle vicinanze di un conduttore è in grado di generare una circolazione di corrente in esso.

Nella figura si può vedere un filo avente un lato immerso in un campo magnetico. Al momento che viene applicata corrente si genera una forza sul filo conduttore. L'interazione tra corrente, forza e campo magnetico avviene sui 3 assi x,y,z.



Il vettore forza derivato è determinabile in questo modo:

- la direzione è perpendicolare sia al filo conduttore che al campo magnetico, rientrando nella categoria delle forze non newtoniane
- il modulo risulta determinato dalla relazione: $\mathbf{F} = \mathbf{B} * \mathbf{I} * \mathbf{l}$, dove l è la lunghezza del filo immersa nel campo B
- il verso viene individuato mediante la **regola delle tre dita della mano sinistra**; disponendo pollice, indice e medio della mano sinistra secondo i 3 assi, quindi perpendicolarmente tra loro le 3 dita indicano il verso, rispettivamente di, forza, campo e corrente:



Analizzando la situazione dal punto di vista microscopico si può dire che la corrente circolante nel conduttore è un flusso di cariche elettriche; pertanto si può asserire che la forza globale che viene esercitata sul conduttore non è altro che la risultante delle forze microscopiche esercitate sulle singole cariche in movimento.

Ora, considerando che, data una certa sezione l'intensità di corrente in essa è determinata da:

$I = Q/t = ne/t$ come già visto nel capitolo [principi](#);

quindi la relazione $F = B * I * l$ può anche essere scritta come:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} * (\mathbf{ne}/t) * \mathbf{l}$$

ovvero che

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} * \mathbf{ne} * (\mathbf{l}/t)$$

se consideriamo come t il tempo impiegato da un singolo elettrone per percorrere il conduttore di lunghezza l il rapporto l/t può essere visto come la velocità dell'elettrone e quindi:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} * \mathbf{ne} * \mathbf{v}$$

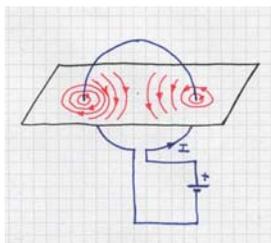
A questo punto posso ottenere la forza \mathbf{F}' agente su un singolo elettrone dividendo entrambi i membri per n e ottengo che:

$$\mathbf{F}' = \mathbf{evB}$$

Tale relazione ci dice che può esistere un campo magnetico solo se si esercita un movimento su una carica elettrica in movimento ed è nota come **legge di Lorentz**. La forza che viene ad agire sulla carica elettrica in movimento è perpendicolare sia al vettore velocità che al vettore campo che la genera.

La legge di Lorentz ci permette anche di capire come quando una carica elettrica devia la sua traiettoria quando nel suo cammino incontra un campo magnetico.

Analizziamo ora cosa accade quando una corrente continua attraversa una spira circolare immersa nel vuoto; in pratica si ha la generazione di un campo magnetico che si sviluppa secondo linee di forza come quelle in figura.

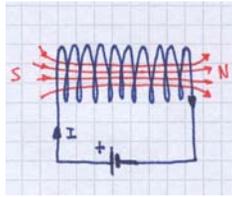


Anche in questo caso vale la regola del cavatappi per determinare il verso del campo generato; il campo magnetico B al centro della spira è un vettore rettilineo rivolto verso di noi ed il suo modulo è determinabile mediante la relazione:

$$\mathbf{B} = \mu_0 * I/2r = \mu_0 * \mathbf{H}$$

dove r è il raggio della spira.

Avvolgendo più spire in successione, si ottiene un dispositivo molto usato nel campo elettrico/elettronico, che si chiama **solenoid**. La situazione, quando esso viene attraversato da corrente, è quella di figura.



Quando il solenoide è sufficientemente lungo il campo magnetico che si forma al suo interno è sensibilmente uniforme e vale:

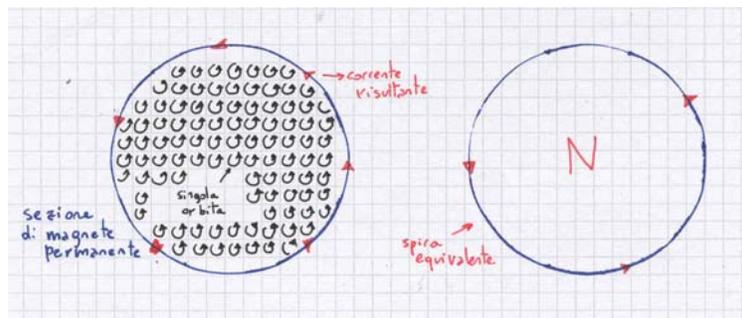
$$B = \mu_0 * nI = \mu_0 * H$$

dove n è il numero di spire nell'unità di lunghezza.

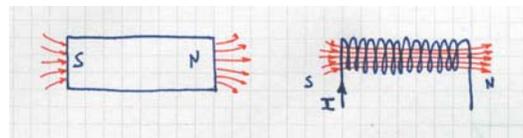
Campi magnetici nei mezzi materiali

Ricordando quello che si è visto parlando dell'atomo e in particolare del fatto che gli elettroni orbitino intorno al nucleo in modo costante, si può immaginare che l'orbita di un singolo elettrone intorno al nucleo sia equivalente alla circolazione di corrente in una spira; pertanto l'orbitare dell'elettrone produce un campo magnetico che è ancora un vettore perpendicolare all'asse dell'orbita stessa. Questo accade anche per l'atomo contiguo e per quello contiguo ancora. La risultante vettoriale dei singoli campi dà origine ad un vettore che, se le spire sono orientate in maniera casuale e disordinata è nullo; se, invece le spire sono orientate tutte in maniera concorde, come accade nei magneti permanenti, allora il vettore risultante è diverso da zero e origina nelle vicinanze un campo magnetico.

La figura sottostante mostra una sezione di magnete permanente; si può notare che in esso le orbite sono tutte concordi tra loro, ma verso il centro del magnete non esistono correnti circolanti, perchè i lati confinanti delle singole orbite sono attraversati da correnti uguali e segno opposto. Sulla periferia, invece si ha una corrente sicuramente diversa da zero, perchè la risultante è la sommatoria di correnti concordi. Per questo motivo un magnete naturale viene paragonato ad una spira attraversata da una corrente equivalente secondo il **principio di equivalenza di Ampere**.

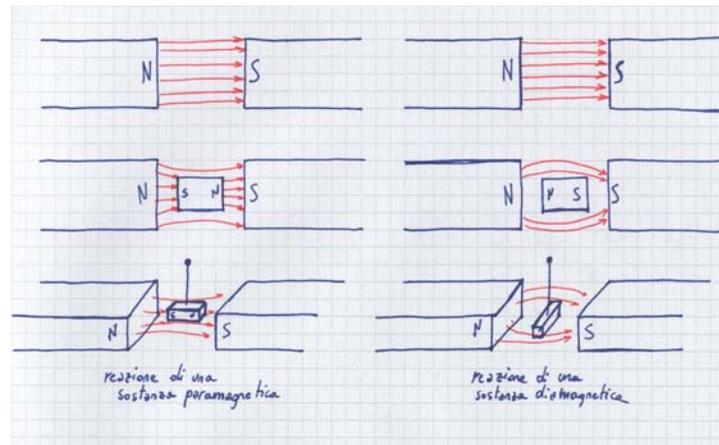


Allo stesso modo un magnete permanente fatto come una sbarretta metallica o una lamina può essere equiparato ad un solenoide:



Nei materiali, il fatto che ci siano più di un elettrone a disegnare orbite (escluso l'idrogeno) e il fatto che gli stessi atomi vadano a conglombarsi in molecole possono creare comportamenti differenti da parte del materiale quando esso è sottoposto ad un campo magnetico. In alcune sostanze, infatti, le strutture atomiche e molecolari possono perdere la caratteristica di orientarsi secondo un campo magnetico, in altre, invece possono mantenerla. Si definisce **momento magnetico** la capacità di un materiale di mantenere un orientamento se sottoposto a campo magnetico. Le sostanze che non hanno tale proprietà, ovvero hanno momento magnetico nullo, si definiscono **diamagnetiche**, quelle che invece la mantengono si chiamano **paramagnetiche**.

Quando una sostanza paramagnetica viene investita da un campo magnetico, le sue "spire elementari" vengono ad orientarsi secondo il campo applicato; in pratica si viene a formare al loro interno un campo indotto che tende a rafforzare il campo induttore. Una lamina libera di ruotare sul proprio asse tenderebbe a disporsi parallelamente alla direzione del campo induttore. In una sostanza diamagnetica, invece, non si crea nessun campo interno, poichè non esistono atomi o molecole che abbiano un proprio momento magnetico e la sostanza non dovrebbe dare, per questo motivo, nessuna reazione al campo induttore. In realtà, per la forza di Lorentz, il campo ha la tendenza a deviare gli elettroni, deformandone le orbite e quindi si crea internamente un campo di entità molto moderata, ma opposto al campo induttore, che ne risulta così indebolito. Una lamina magnetica libera di ruotare sul proprio asse tenderebbe a disporsi perpendicolarmente alla direzione del campo induttore; la figura illustra il concetto.



Sia nel caso di sostanza paramagnetica, che nel caso di sostanza diamagnetica, l'inserzione di un materiale all'interno di un campo magnetico non altera eccessivamente la situazione; questo poichè essi hanno una permeabilità relativa circa uguale a 1, ovvero la loro permeabilità è molto simile a quella del vuoto (o dell'aria). Per esempio immettendo una sbarretta di materiale diamagnetico o paramagnetico all'interno di un solenoide eccitato da corrente si avrà un campo B pari a:

$$B = \mu * n * I = \mu * H$$

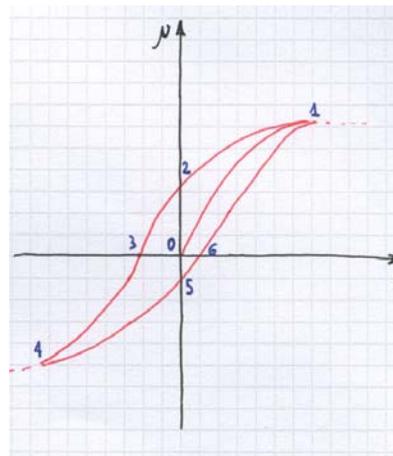
ma essendo μ circa uguale a μ_0 , perchè μ_r è tendente a 1, si capisce che l'inserzione di un materiale del genere in un solenoide non ha praticamente effetto sul campo complessivo.

I materiali ferromagnetici

Esistono in natura, invece, sostanze definite **ferromagnetiche**, in cui la particolare disposizione delle orbite elettroniche e di zone interne in cui i momenti magnetici si trovano concordi, zone definite **regioni di Weiss**, fanno sì che la loro permeabilità relativa sia migliaia di volte maggiore dell'unità; questo rende particolarmente interessante tali materiali sotto il profilo magnetico. Alcuni esempi di materiali ferromagnetici sono il ferro, il cobalto e il nichel. Una sostanza ferromagnetica inserita all'interno di un solenoide moltiplica di diversi ordini di grandezza il campo che si sarebbe ottenuto se il magnete fosse stato avvolto in aria e questo è il principio secondo cui funzionano gli **elettromagneti**, altrimenti detti **elettrocalamite**.

Un'altra caratteristica dei materiali ferromagnetici è quella di non presentare una permeabilità costante, ma variabile a seconda del campo magnetico applicato. In altre parole un materiale ferromagnetico che non ha mai subito un campo magnetico presenta una permeabilità diversa da uno che è già stato magnetizzato.

Esiste una curva chiamata **ciclo di isteresi magnetica** che ci dà un'idea dell'andamento della permeabilità al variare del campo applicato.



Tratto 0-1 Partendo da una sostanza ferromagnetica "vergine" proviamo ad aumentare il campo a cui la si sottopone; il campo indotto cresce in maniera abbastanza lineare (**curva di prima magnetizzazione**) fino a raggiungere il ginocchio in prossimità del punto 1. In tale zona si ha la **saturazione** della sostanza, in quanto tutti i magnetini interni sono stati orientati in maniera concorde. A quel punto il campo induttore può crescere indefinitamente senza creare aumenti significativi sul campo indotto, come si vede nella zona tratteggiata.

Tratto 1-2 Tornando indietro, ovvero facendo decrescere il campo induttore il campo indotto rimane più elevato di quello che si aveva durante la curva di prima magnetizzazione; in particolare quando si arriva ad annullare il campo induttore (punto 2) la sostanza presenta un comportamento ancora magnetico (**magnetizzazione residua**).

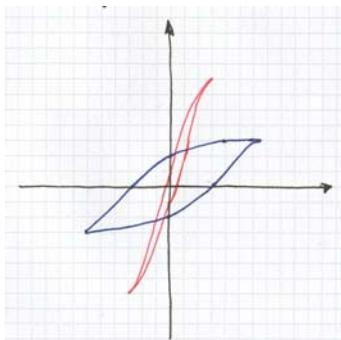
Tratto 2-3 Invertendo ora il campo induttore, ad esempio invertendo la corrente che circola nell'avvolgimento, il campo indotto continua a decrescere fino, finalmente, ad annullarsi (punto 3). Questo ci fa capire che per annullare completamente il magnetismo di un materiale ferromagnetico è necessario applicare un campo inverso a quello con cui era stato magnetizzato e il valore di questo campo (la distanza sull'asse delle ascisse tra il punto 0 e il punto 3) viene chiamato **campo coercitivo**.

Tratto 3-4 Continuando ad aumentare il campo indotto verso valori sempre più negativi i magnetini iniziano a orientarsi nel senso opposto; si ha di nuovo un andamento lineare fino alla saturazione del materiale, quando tutti o quasi i magnetini sono orientati in modo concorde. Analogamente a quanto accadeva per il punto 1, incrementi del campo induttore non hanno praticamente effetto sul campo indotto, quando si raggiunge il punto 4.

Tratto 4-5 Tornando ad invertire il campo verso valori positivi il materiale inizia a smagnetizzarsi in maniera progressiva; in particolare quando si annulla il campo induttore in prossimità del punto 5 vi è ancora una magnetizzazione residua (chiaramente opposta in termini di segno alla situazione al punto 2).

Tratto 5-6 Invertendo il campo ora a valori positivi ci si avvia verso la smagnetizzazione del materiale che avviene intorno al punto 6.

La figura sottostante propone due curve di isteresi, relative a due materiali, uno di tipo ferroso (curva rossa) e uno di tipo acciaioso (curva blu).



Nel caso di materiale ferroso si nota che abbiamo una pendenza molto ripida, che ci consente una rapida magnetizzazione anche con campi modesti e nello stesso tempo un magnetismo residuo praticamente nullo, che permette una smagnetizzazione quasi totale al cessare del campo induttore; queste caratteristiche rendono adatto il ferro per la costruzione degli elettromagneti. Nel caso di materiale acciaioso, invece si nota che esso ha la tendenza a mantenere la magnetizzazione anche al cessare del campo induttore e questo rende particolarmente utile l'acciaio nella costruzione di magneti permanenti.

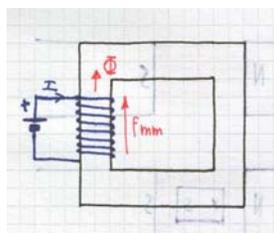
Nell'analisi di circuiti magnetici può essere conveniente l'analisi del **flusso magnetico**, che può essere visto come un "qualcosa" che scorre attraverso il circuito magnetico quando questo viene sottoposto ad un campo. Il flusso viene indicato con la lettera Φ (pronuncia "fi"). L'unità di misura del flusso magnetico è il **Weber**, che si indica con **Wb**. Introduciamo poi il concetto di **tensione magnetica**, o **forza magnetomotrice**, che sarebbe la forza che provoca lo scorrimento del flusso nel circuito magnetico (ad esempio quella generata dal solenoide). La forza magnetomotrice può essere vista come il prodotto del campo H per la lunghezza l degli avvolgimenti che la generano. Quindi si ha che

$$f_{mm} = H * l$$

ma $H = nI/l$ (si noti che avevamo definito $H = nI$, ma considerando n come il numero di spire per metro)

quindi $f_{mm} = (nI/l) * l = nI$ che ci dice che la f_{mm} si misura in **Asp** (Ampere Spira).

La figura sottostante chiarisce i concetti.



A questo punto viene comodo definire una grandezza che tenga conto di quanto una sezione del materiale sottoposto al campo magnetico si lasci attraversare o meno dal flusso; tale grandezza tiene conto della permeabilità e della sezione e viene chiamata **riluttanza magnetica** e indicata con il simbolo \mathcal{R} .

In particolare

$$\mathcal{R} = l / \mu S$$

dove l è la lunghezza del tratto interessato e S la sua sezione.

A questo punto possiamo definire che

$$f_{mm} = N * I = \Phi * \mathcal{R}$$

che viene chiamata **Legge di Hopkinson**.

Si noti che essendoci una rilevante analogia tra il flusso e l'intensità di corrente elettrica, tra la riluttanza e la resistenza e tra la forza magnetomotrice e la tensione elettrica e nella loro interazione la legge di Hopkinson viene anche definita come **legge di ohm magnetica**.

Inoltre il flusso è anche visto come il prodotto del campo B agente su una superficie S , quindi si ha che:

$$\Phi = B * S$$

in particolare per una spira $S = \pi r^2$ e quindi in una spira si ha:

$$\Phi = B\pi r^2$$

mentre per un solenoide il flusso deve essere moltiplicato per il numero di spire, e si ha:

$$\Phi = nB\pi r^2$$

Test di verifica

Esercizio 10-1

Un filo rettilineo di lunghezza indefinita è percorso da una corrente di 10A; qual è il valore del campo magnetico nelle sue vicinanze considerando di effettuare la misura a 6 cm dal filo? ([soluzione](#))

Esercizio 10-2

Determinare il valore del campo all'interno di un solenoide avvolto in aria, composto da 500 spire ogni metro di lunghezza, in cui circolano 5A di corrente; determinare il campo generato se all'interno del solenoide si inserisce un cilindretto di ferro dolce che ha permeabilità relativa 2000 ([soluzione](#))

Esercizio 10-3

Qual è la forza che agisce su ogni centimetro di un conduttore, quando questo viene attraversato da una corrente di 10A ed è disposto perpendicolarmente alle linee di forza di un campo magnetico pari a 5mT? ([soluzione](#))

Esercizio 10-4

Qual è la velocità di un elettrone che si muove perpendicolarmente ad un campo magnetico di 0.08T se esso è soggetto ad una forza di $1.28 \cdot 10^{-12}$ Newton? ([soluzione](#))

Esercizio 10-5

Determinare la carica di una particella che quando si muove con velocità di $2 \cdot 10^7$ m/s perpendicolarmente alle linee di un campo magnetico pari a 0.05T, genera una forza pari a $3.2 \cdot 10^{-13}$ Newton ([soluzione](#))



prossimo capitolo



torna alla pagina dell'elettronica

);/-->

10-4

Sapendo che $F = B \cdot I \cdot l$ e $I = \frac{Q}{t} = m e / t$

otteniamo:

$F = B \cdot \frac{Q}{t} \cdot l$, ma $\frac{l}{t}$ è proprio la velocità e quindi

$$F = B \cdot m e \cdot v \Rightarrow v = \frac{F}{B \cdot m e} = \frac{1,28 \times 10^{-12}}{0,08 \cdot 1 \cdot 1,6 \times 10^{-19}} = \underline{10^8 \text{ m/s}}$$

20-3

La forza in questione è determinabile mediante la:

$$F = B \cdot I \cdot l = 5 \times 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-2} = \underline{0.5 \text{ mN}}$$

10-2

Ricordando che in un solenoide:

$$B = \mu \cdot N \cdot I = \mu_r \mu_0 \cdot N \cdot I$$

in aria $\mu_r \approx 1$ quindi $B = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 500 \cdot 5 = \underline{3.141 \text{ mT}}$

Con il nucleo in ferro dolce si ha:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 2000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 2.513 \cdot 10^{-3}$$

e il nuovo valore del campo: $B' = 2.513 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 5 = \underline{6.282 \text{ T}}$

10-1

Si risolve il problema applicando la legge di Biot e Savard:

$$B = \frac{K \cdot I}{r} \quad \text{dove } K = \mu / 2\pi = \mu \cdot \mu_r / 2\pi, \quad \text{dove } \mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

per l'aria $\mu_r \approx 1$, quindi $K = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \Rightarrow B = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 10}{6 \cdot 10^{-2}} = \underline{3.33 \times 10^{-5} \text{ T}}$

10-5

poiché $F = B \cdot m \cdot e \cdot v$ si ha che:

$$m e = \frac{F}{B \cdot v} = \frac{3.2 \times 10^{-13}}{0.05 \cdot 2 \times 10^7} = \underline{3.2 \times 10^{-9} \text{ C}}$$

che è pari alla carica di 2 elettroni