

# RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

**L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.**

**Parte ottava: Magnetismo ed elettromagnetismo**

A cura della Redazione

## 8.1 - Magneti naturali e artificiali

*Si chiama magnete un corpo capace di attirare a sé altri corpi costituiti da ferro o sue leghe. I magneti possono essere naturali o artificiali.*

Esistono in natura alcuni minerali, come la magnetite, che possiedono la proprietà di attirare a sé corpi metallici purché costituiti da ferro o sue leghe.

Un corpo che presenta la proprietà suddetta costituisce un magnete naturale ed i fenomeni associati si dicono magnetici.

Un magnete può anche essere ottenuto, con particolari trattamenti, da sostanze che non sono naturalmente magnetiche, come il ferro e le sue leghe (ghisa e acciaio), o alcune speciali leghe di alluminio, il cobalto e il nichel: questi magneti si dicono artificiali.

I magneti artificiali si dividono ulteriormente in permanenti e temporanei: i primi, una volta magnetizzati, conservano questa caratteristica, mentre quelli temporanei la perdono non appena cessa la causa che ha prodotto in loro la magnetizzazione.

Mentre tutti i metalli sono buoni conduttori elettrici, non tutti sono magneticamente attivi. In generale lo sono il ferro e le sue leghe che vengono quindi classificati come ferromagnetici. Altri metalli, come il rame e le sue leghe, l'alluminio, ecc. e i corpi non metallici, si comportano in modo neutro per cui vengono detti diamagnetici (tra questi vale la pena citare anche l'aria). Altri ancora hanno caratteristiche analoghe ai ferromagnetici, ma in misura meno spiccata e si chiamano paramagnetici.

## 8.2 - Caratteristiche dei magneti

*Ogni magnete presenta un polo nord e un polo sud. In un magnete libero di muoversi, il primo si orienta verso il nord geografico e il secondo verso il sud. Poli di nome contrario si attraggono, poli omonimi si respingono.*

Si consideri un piccolo magnete permanente, a forma di ago, libero di ruotare attorno al proprio punto centrale come, ad esempio, l'ago di una bussola.

Se si immerge questo ago entro la limatura di ferro, esimendolo si può vedere che esso ne rimane coperto, specialmente alle estremità.

Da questo semplice esperimento è facile dedurre che, in detti punti, l'attività magnetica è massima; trattandosi di un fenomeno caratteristico, i fisici hanno chiamato le estremità dei magneti con il nome di poli.

I due poli di un magnete non sono equivalenti e per rendersi conto di questo fatto basta porre la bussola lontana da altri magneti: si può vedere che il suo ago si orienta immediatamente secondo una direzione ben determinata che corrisponde all'incirca con quella dei poli terrestri (Figura 8.1). Questo fatto dimostra anche che la terra si comporta come un magnete avente i suoi poli quasi coincidenti con i poli geografici.

Da questa constatazione è nata la denominazione dei poli dell'ago e di qualsiasi corpo magnetizzato: si chiama polo nord (indicato con  $N$ ) l'estremità di un magnete che, orientandosi liberamente, si rivolge verso il nord geografico, si chiama polo sud ( $S$ ) l'altra estremità che si rivolge verso il sud geografico.

Si prendano ora due magneti a forma di barretta e li si ponga vicini: si può vedere che se si trovano di fronte i due poli nord o i due poli sud si manifesta una azione di repulsione, mentre se sono affiancati un polo nord e un polo sud essi si attraggono (Figura 8.2). Se ne deduce, quindi, che poli magnetici di ugual nome si respingono e poli di nome opposto si attirano (si noti l'analogia con la legge di Coulomb che regola le forze agenti tra cariche elettriche).

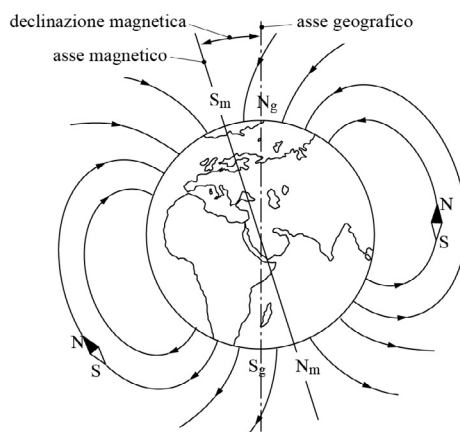


Figura 8.1- Rappresentazione del magnetismo terrestre. I poli magnetici ( $N_m$  e  $S_m$ ) della Terra non si trovano esattamente in corrispondenza dei poli geografici ( $N_g$  e  $S_g$ ) definiti come i due punti attraverso i quali passa l'asse di rotazione della Terra, i poli magnetici si trovano rispettivamente in Alaska e nell'Antartide. L'angolo di cui è ruotato l'asse magnetico rispetto a quello geografico è detto declinazione magnetica.

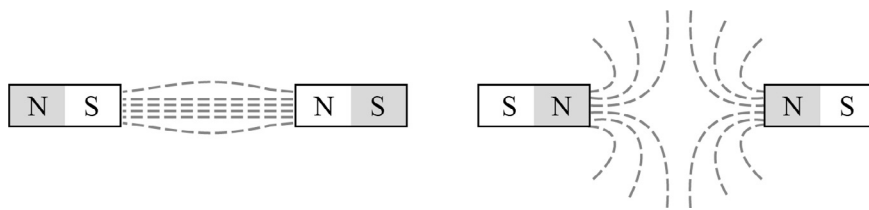


Figura 8.2 - Attrazione e repulsione tra magneti: poli di nome contrario si attraggono, poli di nome uguale si respingono.

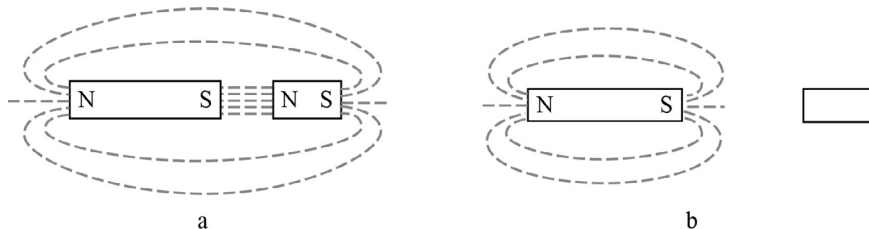


Figura 8.3 - Magnetizzazione per induzione.

Una forza di attrazione si riscontra anche nel caso in cui si ponga un pezzo di ferro vicino ad un magnete, ma poiché la forza di attrazione, come si è detto sopra, si verifica fra poli magnetici di nome contrario, ciò significa che il pezzo di ferro risulta da quel momento magnetizzato. Questa magnetizzazione, provocata dall'influenza esercitata dal polo del magnete più vicino al pezzetto di ferro, viene detta per induzione: l'estremità del pezzo vicina, ad esempio, al polo *S* del magnete diviene un polo *N*, mentre l'estremità lontana assume la polarità *S* (Figura 8.3a), come si potrebbe verificare avvicinando un ago magnetico. Naturalmente, se si tratta di un materiale che si magnetizza solo temporaneamente, quando viene allontanato dal magnete permanente esso perde le polarità acquistate per induzione (Figura 8.3b).

Se si prende ora un magnete permanente e lo si divide in due parti al centro, in modo da separare il polo *N* dal *S*, si trova che sulle due facce ottenute dal taglio si hanno ancora un *N* un *S* (Figura 8.4), si ottengono cioè due magneti ciascuno dotato di due poli.

Se si ripete l'operazione quante volte si vuole, dal taglio si ottengono sempre dei magneti, di dimensioni via via più piccole, ma ciascuno con i suoi due poli. Verrebbe quindi da domandarsi fino a che punto sia possibile spingere la divisione di un magnete in pezzetti sempre più piccoli; nel primo Capitolo si è visto che la materia è formata di atomi e perciò si potrebbe idealmente pensare di dividere il magnete fino a ridurlo ad un solo atomo: ebbene, anche l'atomo si comporterebbe come una piccolissima calamita, con i suoi poli.

Questo fatto può essere sfruttato per immaginare un qualsiasi corpo magnetizzato come costituito da un numero grandissimo di magnetini elementari, tutti orientati nello stesso senso come indicato in figura 8.5.

Nei corpi non magnetizzati i magnetini elementari sono invece disposti a caso in ogni direzione per cui le loro azioni si elidono reciprocamente.

La magnetizzazione per induzione si spiega con la capacità che possiede un magnete di fare orientare i suddetti magnetini in una direzione determinata.

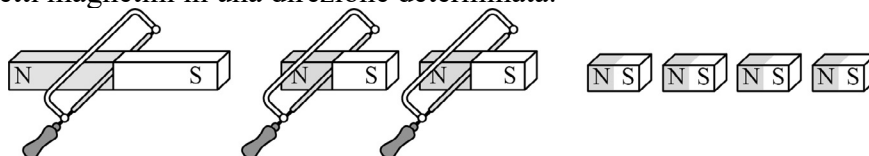


Figura 8.4 - La divisione di un magnete in più parti dà luogo a magneti con i poli disposti in modo analogo a quelli del magnete di origine.

	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	
N	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	S
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	

Figura 8.5 - Disposizione schematica dei magnetini all'interno di un magnete.

### 8.3 - Campo magnetico

*Per campo magnetico s'intende la regione dello spazio nel quale si manifestano o si rilevano fenomeni magnetici. Si può evidenziare tramite un ago magnetico che, posto nel campo, assume un particolare orientamento.*

Fra i fenomeni magnetici e quelli legati al campo elettrico esistono alcune analogie: ciò può far pensare che si possa definire, in modo del tutto analogo, un campo magnetico come la regione dello spazio entro la quale si manifestano o si rilevano degli effetti magnetici. Di conseguenza si possono anche definire delle linee di forza magnetiche, analoghe a quelle già viste per il campo elettrico; in particolare, esse corrispondono a curve che hanno la caratteristica di avere, per tangente, le linee che individuano la direzione assunta da un ago magnetico, liberamente orientato, posto in ogni punto delle suddette curve (Figura 8.6). Per convenzione, si attribuisce a queste linee il verso che viene indicato dal polo nord dell'ago liberamente orientato. Si può infine pensare che queste linee si prolunghino all'interno del magnete andando dal S, dove entrano, al polo N dove escono.

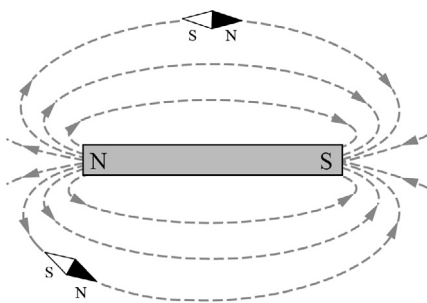


Figura 8.6 - Andamento delle linee di forza di un campo magnetico.

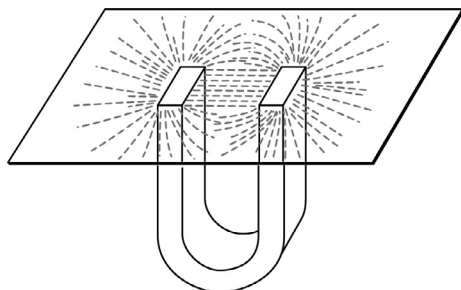


Figura 8.7 - Visualizzazione dall'andamento delle linee di forza del campo magnetico.

La nozione di linee di forza del campo magnetico risulta di più facile dimostrazione e comprensione che nel caso elettrostatico grazie alla possibilità di realizzare gli spettri magnetici. Basta a questo scopo porre sopra un foglio di carta della limatura di ferro e appoggiarvi al di sotto un magnete (Figura 8.7), scuotendo poi leggermente il foglio, i vari pezzettini di limatura si comportano come dei minuscoli aghi le cui polarità sono stabilite dalla magnetizzazione indotta e quindi tendono a disporsi parallelamente alle linee di forza, facendo apparire sul foglio una figura, lo spettro, che

riproduce esattamente l'andamento delle linee di forza.

## 8.4 - Elettromagnetismo

*Per elettromagnetismo s'intende quella branca della fisica che studia le relazioni che intercorrono tra fenomeni elettrici e magnetici. Base dell'elettromagnetismo è la constatazione che qualsiasi conduttore percorso da corrente crea attorno a sé un campo magnetico.*

*Le linee di forza del campo magnetico creato da una corrente che percorre un conduttore rettilineo hanno forma circolare e sono disposte concentricamente al conduttore stesso. Il verso delle linee di forza corrisponde al senso di rotazione di un cavatappi che avanzi lungo la direzione secondo cui fluisce la corrente.*

Le prime constatazioni dei rapporti che esistono fra corrente elettrica e campo magnetico risalgono al 1820 quando Oersted (1777-1851) scoprì che un ago magnetico, liberamente sospeso, posto in vicinanza di un conduttore percorso da corrente tende a disporsi trasversalmente rispetto al medesimo.

Ampere (1775-1836) precisò, successivamente, che il polo nord di un ago magnetico posto al di sopra di un conduttore percorso da corrente continua si volge verso la destra di una persona che guardi il conduttore da sopra avendo la testa nella direzione verso cui fluisce la corrente (Figura 8.8).

La presenza di un campo magnetico intorno ad un filo conduttore percorso da corrente può infine essere facilmente evidenziata con il metodo degli spettri magnetici: infilando nel conduttore un cartoncino sul quale è stata posta della limatura di ferro, si potrà constatare come detta limatura si disponga secondo cerchi concentrici al filo (Figura 8.9).

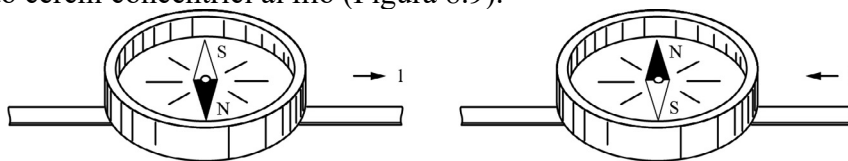


Figura 8.8 - Posizione assunta da un ago magnetico posto in prossimità di un conduttore percorso da corrente.

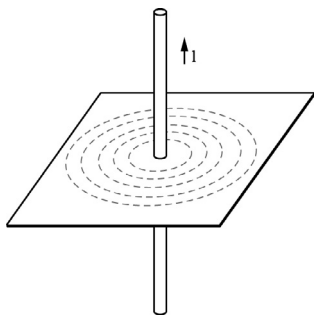


Figura 8.9 - Andamento delle linee di forza del campo magnetico esistente intorno ad un conduttore rettilineo percorso da corrente

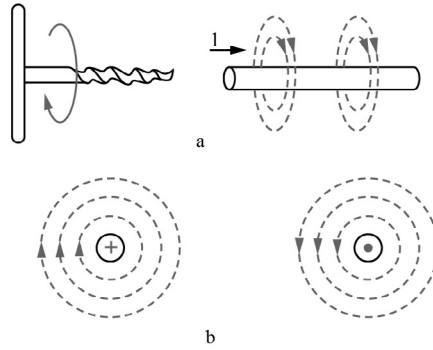


Figura 8.10 - Applicazione della regola del cavatappi o di Maxwell per la determinazione del verso delle linee di forza del campo magnetico esistente intorno ad un conduttore rettilineo percorso da corrente.

Il verso di queste linee di forza non può più essere stabilito come per i magneti naturali, non essendo in questo caso individuabili i poli, ma si può determinare applicando la regola di Ampere. Risulta però ancora più semplice applicare la regola del cavatappi o di Maxwell (1831-1879) la quale afferma (Figura 8.10a) che le linee di forza circolari hanno un verso corrispondente al senso di rotazione di un cavatappi che avanzi nello stesso senso della corrente. Per le rappresentazioni grafiche è in uso la convenzione di indicare un punto entro il cerchietto raffigurante il conduttore, se la corrente sale dal foglio verso l'osservatore e una croce, se la corrente scende dall'osservatore verso il foglio (Figura 8.10b).

I fatti esposti permettono di enunciare alcune proprietà fondamentali ed assoluta niente generali della corrente elettrica:

- a una corrente è sempre associato un campo magnetico che si stabilisce con il fluire della corrente e scompare con l'estinguersi della medesima;
- le linee di forza del campo magnetico sono sempre concatenate con la corrente che le produce;
- l'andamento delle linee di forza del campo magnetico dipende dalla geometria del circuito elettrico; per un conduttore rettilineo le linee di forza hanno forma circolare e sono disposte concentricamente al conduttore.

Finora si è parlato di conduttore rettilineo, ma esso può anche essere disposto in

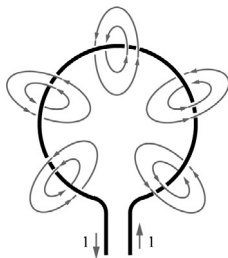


Figura 8.11 - Andamento delle linee di forza del campo magnetico esistente intorno ad una spira percorsa da corrente.

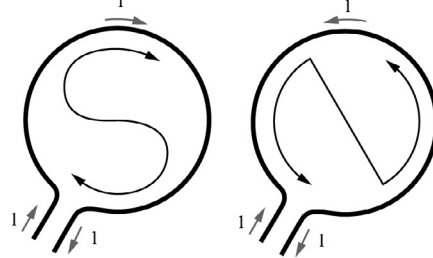


Figura 8.12 - Applicazione della regola di Burch per la determinazione delle polarità magnetiche di una spira percorsa da corrente.

modo da formare una spira. In questo caso il campo magnetico assume una configurazione diversa da quella vista in precedenza così come si può dedurre dalla figura 8.11; le linee di forza sono però

ancora concatenate con il conduttore.

Dalla figura 8.11 si può ancora rilevare che le linee di forza, che si sviluppano in punti diametralmente opposti della spira, la attraversano nello stesso senso, per cui è lecito considerare la spira come un minuscolo magnete avente i suoi poli nelle due facce del piano in cui giace la spira stessa. Per la determinazione delle polarità si può ricorrere alla regola di Burch che consiste nello scrivere entro la spira le lettere *N* o *S* con le loro punte rivolte nel senso della corrente (Figura 8.12): la lettera, le cui estremità vanno nel senso della corrente, indica la polarità della faccia che si guarda.

## 8.5 - Solenoidi e elettromagneti

*Per solenoide si intende un gruppo di spire affiancate costituite da un filo metallico avvolto ad elica e aventi uguale area.*

*Se le spire sono percorse da corrente il solenoide costituisce un elettromagnete e si comporta come un magnete naturale.*

Si supponga ora di disporre parecchie spire, percorse da corrente nello stesso senso, una accanto all'altra così come indicato in figura 8.13. Si vede subito che esse si affiancano con le polarità *N-S* allineate, come se si mettessero in fila tanti magnetini: il risultato è che il complesso delle spire forma un unico magnete con le polarità *N* e *S* alle estremità, come ogni magnete naturale.

Per raggiungere questo risultato non è necessario mettere assieme tante spire separate, ma si può avvolgere più volte su se stesso il medesimo conduttore (Figura 8.14), realizzando così un solenoide o bobina.

Gli effetti magnetici ottenibili con un solenoide eccitato da una corrente possono essere verificati mediante della limatura di ferro disposta su di un foglio che sia attraversato dalle spire: si può così vedere (Figura 8.15) che la limatura si orienta, esternamente al solenoide, nel modo già noto per i magneti permanenti, mentre all'interno essa si dispone parallelamente all'asse del solenoide, mostrando come queste linee di forza si chiudano all'interno del percorso.

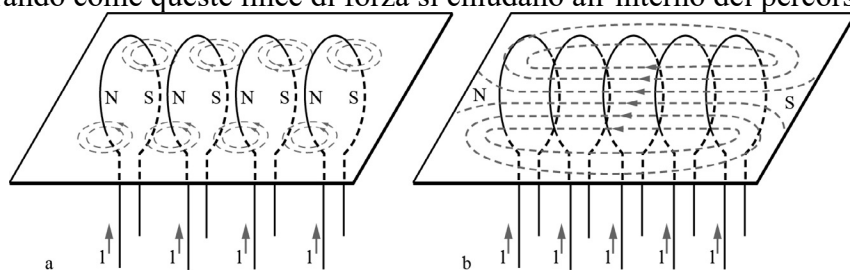


Figura 8.13 - Andamento del campo magnetico creato da più spire affiancate e percorse da corrente nello stesso senso:  
a - campo magnetico creato dalle singole spire;  
b - campo magnetico risultante.

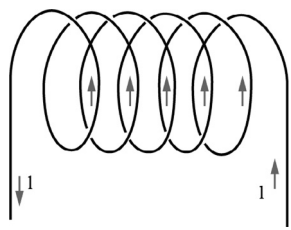


Figura 8.14 - Rappresentazione schematica di un solenoide.

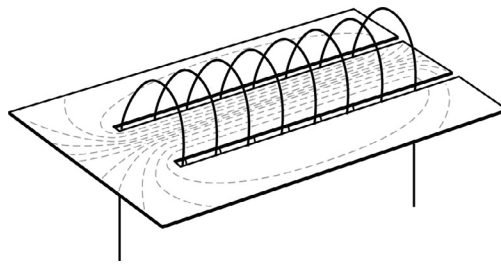


Figura 8.15 - Visualizzazione dell'andamento del campo magnetico creato da un solenoide.

L'analogia con i magneti permanenti porta perciò a concludere che con un solenoide eccitato si possono ripetere tutte le esperienze già viste in precedenza; in particolare, risulta verificata la legge di attrazione-repulsione in base alla polarità, sia che l'esperienza sia effettuata con due solenoidi, sia con un solenoide ed un magnete naturale.

La principale differenza, a questo riguardo, consiste nel fatto che le polarità di un solenoide sono stabilite dal senso della corrente che lo percorre per cui, invertendo la corrente, mutano anche le polarità.

Il solenoide eccitato presenta una caratteristica particolare di notevole interesse: se si pone al suo interno un nucleo di ferro, questi si magnetizza con polarità corrispondenti a quelle del solenoide (Figura 8.16a). Si ottiene così un magnete temporaneo che produce un campo magnetico molto più intenso.

Le stesse polarità si trovano, a causa della magnetizzazione per induzione, anche se il nucleo non è all'interno, ma vicino al solenoide (Figura 8.16 b) e sono, secondo la regola generale, contrarie per le parti vicine, per cui si esercita un'azione di attrazione. Il nucleo pertanto viene succhiato entro il solenoide e si arresta solo quando esso viene a trovarsi all'interno, avendo portato i suoi poli in corrispondenza di quelli di ugual nome del solenoide (Figura 8.16 a).

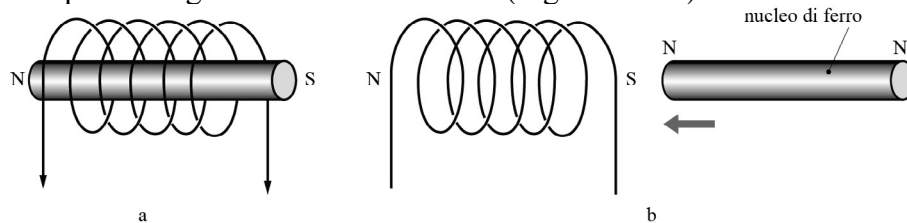


Figura 8.16 - Inserimento di un nucleo di ferro entro un solenoide:

a - il nucleo all'interno del solenoide risulta magnetizzato;

b - il nucleo posto esternamente al solenoide risulta anch'esso magnetizzato ed è inoltre attratto dal solenoide stesso.

## 8.6 - Forza magnetomotrice e flusso magnetico

*La forza magnetomotrice (f.m.m.), proporzionale alla corrente, è la grandezza che eccita il campo magnetico (causa).*

*Il flusso magnetico è lo stato magnetico che si manifesta per effetto della f.m.m. (effetto).*

Finora si è parlato del campo magnetico solo qualitativamente, ma è possibile definire un certo numero di grandezze ad esso relative e le relazioni intercorrenti tra le stesse.



Quanto verrà esposto è valido sia per i campi magnetici formati da magneti naturali che per quelli ottenuti da elettromagneti. Poiché però quest'ultimo caso è, nella pratica, di gran lunga più importante e le varie grandezze sono abitualmente definite con unità di misura legate alle correnti elettriche, d'ora in poi si svolgeranno tutti i ragionamenti facendo riferimento agli elettromagneti. È tuttavia opportuno non dimenticare che ogni considerazione rimane valida anche per i magneti naturali.

Per introdurre l'argomento e renderlo più facilmente comprensibile è conveniente fare riferimento ad un solenoide in aria chiuso, il cui asse forma cioè una linea chiusa.

Ciò può essere agevolmente ottenuto avvolgendo in modo uniforme su un anello di materiale non metallico un certo numero di spire così come è indicato nella figura 8.17.

La presenza del materiale non metallico ha solo funzione meccanica e per quanto detto al paragrafo 8.1 esso si comporta come l'aria (materiale diamagnetico).

La forma data al solenoide permette di confinare entro lo stesso tutte le linee del campo magnetico che può essere prodotta da una corrente iniettata nell'avvolgimento. Un dispositivo di questo tipo si chiama anche toro magnetico.

La regione interna al solenoide costituisce quindi un circuito magnetico nel quale sono presenti le linee di forza del campo magnetico.

Si definisce come tensione magnetica il prodotto della corrente  $I$  che passa nel conduttore per il numero di spire  $N$  che costituiscono il solenoide:

$$M = N \cdot I$$

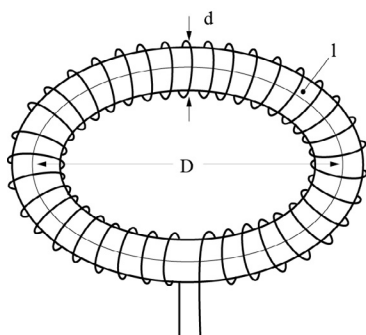


Figura 8.17 - Circuito magnetico realizzato con un solenoide chiuso percorso da corrente (toro magnetico). Il mezzo interposto è diamagnetico.

La tensione magnetica è la causa dei fenomeni magnetici e presenta analogia con la f.e.m. di un generatore in un circuito elettrico. Essa si esprime in amperspire (Asp) e, come si è visto per la tensione elettrica, anche la tensione magnetica può essere considerata una forza magnetomotrice (f.m.m.) oppure una caduta di tensione magnetica. Si ha una forza magnetomotrice agli estremi di un solenoide percorso da corrente (così come si aveva una f.e.m. ai capi di un generatore), mentre si ha una c.d.t. magnetica fra i due punti di un circuito magnetico che non comprendano elettromagneti o magneti naturali.

Si definisce invece flusso magnetico ( $\Phi$ ) l'insieme delle linee di forza del campo. Il flusso che si stabilisce nel circuito magnetico è l'effetto prodotto dalla f.m.m. ed è proporzionale a quest'ultima. Il flusso magnetico presenta quindi analogia con la corrente del circuito elettrico e si misura in weber (Wb).

*La legge di Hopkinson dice che la f.m.m, e il flusso sono tra loro proporzionali secondo un coefficiente che rappresenta la riluttanza del circuito magnetico.*

Considerando l'analogia tra circuiti elettrici e circuiti magnetici, viene intuitivo scrivere una relazione del tipo:

$$M = R_m \cdot \Phi$$

che rappresenta la legge di Hopkinson, o legge di Ohm magnetica.

Il simbolo  $R_m$  è detta riluttanza del circuito magnetico in analogia a quanto a suo tempo definito per la resistenza del circuito elettrico.

Appare fin d'ora intuitivo che la riluttanza è una grandezza che dipende dalle caratteristiche fisiche del circuito magnetico.

La formula che esprime la riluttanza di un circuito magnetico del tipo considerato è la seguente:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

dove:

$l$  = lunghezza del circuito magnetico;

$S$  = sezione;

$\mu$  = permeabilità magnetica, una grandezza sulla quale ci si soffermerà nel prossimo Capitolo.

La riluttanza, che si esprime in amperspire/weber, può essere considerata come l'ostacolo che il circuito presenta allo stabilirsi del flusso. Sulla modalità di calcolo si tornerà al Capitolo 9.

## 8.7 - Induzione e intensità del campo magnetico

*Per induzione magnetica si intende la densità del flusso magnetico riferita ad una superficie di sezione unitaria disposta perpendicolarmente alle linee di forza del campo magnetico.*

Per continuare nella definizione delle grandezze magnetiche si fa ancora riferimento al solenoide chiuso della figura 8.17 con la sola ulteriore precisazione di assumere il diametro medio del toroide ( $D$ ) molto più grande di quello del solenoide ( $d$ ). Ciò permette, almeno in prima approssimazione, di considerare il campo magnetico interno all'avvolgimento uniforme se si prende in esame un tratto abbastanza piccolo del circuito magnetico.

A questo punto è possibile definire due altre grandezze magnetiche: l'induzione e l'intensità del campo.

L'induzione magnetica  $B$  è il flusso che taglia la superficie di sezione unitaria disposta perpendicolarmente alle linee di forza del campo magnetico. Detta  $S$  la sezione considerata del circuito magnetico (Figura 8.18), il legame tra il flusso che l'attraversa e l'induzione può essere espresso con la relazione:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

L'induzione si esprime in tesla ( $T$ ) se il flusso è misurato in weber e la sezione in metri quadrati. Anche in questo caso è possibile una analogia con il circuito elettrico e più precisamente con la

densità di corrente. L'induzione magnetica dà, infatti, una misura dello sfruttamento del materiale di cui è costituito il circuito magnetico e fornisce il grado di addensamento delle linee di flusso.

Facendo riferimento al solenoide chiuso preso come esempio, si può osservare che se si mantiene costante il flusso e si varia la sezione del solenoide l'induzione varia in modo inversamente proporzionale (le linee di flusso risultano più addensate se la sezione diminuisce).

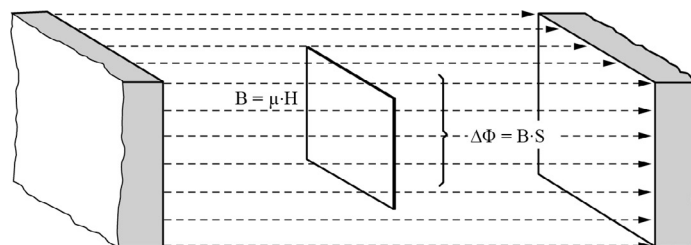


Figura 8.18 - Sezione del circuito magnetico con il solenoide chiuso.

*L'intensità del campo magnetico, o forza di campo, esprime il rapporto tra le f.m.m. e la lunghezza del circuito magnetico (caso del solenoide chiuso).*

L'intensità del campo magnetico o forza di campo  $H$  esprime invece il rapporto tra la f.m.m.  $M$  e la lunghezza  $l$  del circuito magnetico:

$$H = \frac{M}{l}$$

La forza di campo si misura perciò in amperspire al metro (Asp/m) ed è una grandezza che esprime lo stato di magnetizzazione dello spazio entro il quale si manifestano le azioni magnetiche.

Tenendo presente che:

$$M = N \cdot I$$

la forza del campo può essere espressa anche nel seguente modo:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

Da questa relazione si rileva che, per il solenoide chiuso considerato,  $H$  è direttamente proporzionale alla corrente che circola nell'avvolgimento.

Circa il significato di  $H$  si può osservare che, se si riduce il diametro  $D$  del toro e quindi la lunghezza del circuito magnetico  $l$  senza modificare il numero delle spire e la corrente (quindi a pari f.m.m.), l'intensità del campo magnetico aumenta in modo inversamente proporzionale alla lunghezza.

Si noti che nella determinazione dell'intensità del campo magnetico non interviene l'area delle spire e quindi la forza magnetica è la stessa sia che l'avvolgimento sia di piccolo o grande diametro; inoltre non ha importanza che le spire siano avvolte su più strati, purché il numero di spire comprese nella unità di lunghezza rimanga sempre il medesimo. Infine è molto importante notare come la forza magnetica non dipenda dal materiale entro il quale essa agisce: il valore di  $H$  rimane lo stesso sia che il campo si crei nell'aria che nel ferro.

*La legge di Biot e Savart (1774-1862/1791-1841) dice che l'intensità del campo magnetico ad una certa distanza da un conduttore rettilineo è direttamente proporzionale alla corrente che percorre il conduttore e inversamente proporzionale alla distanza considerata.*

Un secondo esempio tipico di campo magnetico è quello che si manifesta intorno ad un conduttore percorso da corrente.

Facendo riferimento alla figura 8.19, detta  $I$  la corrente nel conduttore, le linee di forza del campo magnetico risultano disposte su cerchi concentrici e la loro densità va diminuendo allontanandosi dal conduttore stesso.

Il valore della intensità del campo  $H$  può essere determinato punto per punto con la legge di Biot e Savart e cioè:

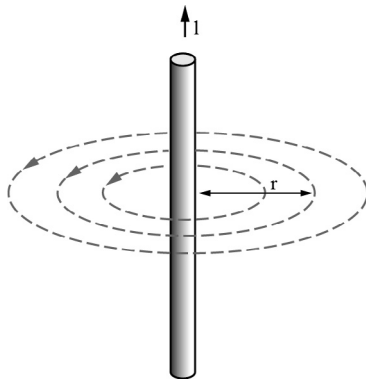


Figura 8.19 - Il campo magnetico che si manifesta intorno ad un conduttore percorso da corrente presenta in ogni suo punto una intensità che è inversamente proporzionale alla sua distanza  $r$  dal conduttore.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

dove:  $r$  = distanza del punto considerato dal centro del conduttore. Come si vede  $H$  è inversamente proporzionale alla distanza  $r$ .

## 8.8 - Relazione tra induzione e intensità di campo

*La permeabilità magnetica rappresenta il legame tra induzione e intensità di campo.*

Le formule riportate nel paragrafo precedente consentono di stabilire il legame esistente tra l'induzione e l'intensità del campo magnetico.

Ricordando le relazioni, che si riportano per chiarezza:

$$M = R_m \cdot \Phi \qquad R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \qquad H = \frac{M}{l} \qquad B = \frac{\Phi}{S}$$

si può scrivere:

$$M = \frac{l}{\mu \cdot S} \Phi = \frac{l \cdot B}{\mu} \qquad M = H \cdot l$$

uguagliando le quali si ottiene:

$$\frac{l \cdot B}{\mu} = H \cdot l$$

dalla quale:

$$B = \mu \cdot H$$

Questa relazione, di importanza fondamentale, dice che induzione e intensità di campo sono legate dalla permeabilità del mezzo e sono tra loro proporzionali a condizione che  $\mu$  sia costante.

## 8.9 - Energia del campo magnetico

*Per energia del campo magnetico s'intende la quantità di energia elettrica necessaria per stabilire il campo magnetico stesso.*

*Questa energia viene immagazzinata dal campo magnetico durante la circolazione di corrente e viene restituita quando detto campo viene annullato.*

Il campo magnetico non assorbe energia per essere mantenuto, ma solamente per essere costituito. Tale energia, che resta immagazzinata dal campo, viene restituita quando si annulla quest'ultimo. Si può quindi dire che il campo magnetico è sede di energia magnetica, in modo analogo a quanto visto a proposito del campo elettrico che è sede di energia elettrostatica. Si può immaginare questa energia come il vincolo posto agli atomi per restare orientati nel senso del campo finché permane la f.m.m. applicata; appena cessa la f.m.m. gli atomi riprendono il loro orientamento originale e restituiscono l'energia accumulata.

Il valore dell'energia può essere calcolato, come per il campo elettrico, in base alle due grandezze che contribuiscono a formare il campo e cioè la f.m.m. e il flusso magnetico. Per il caso semplice del solenoide chiuso si può scrivere:

$$W = \frac{1}{2} M \cdot \Phi$$

Si può anche osservare che l'energia per unità di volume dello spazio racchiuso dal solenoide (energia specifica) può essere calcolato in base ai valori di induzione e di intensità di campo. Infatti se si indica con  $V$  il volume del circuito magnetico (corrispondente al prodotto della sezione  $S$  per la lunghezza  $l$ ) si può scrivere:

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \frac{M \cdot \Phi}{V} = \frac{1}{2} H \cdot B \cdot \frac{l \cdot S}{V} = \frac{1}{2} H \cdot B$$

dove il rapporto  $W/V$  rappresenta appunto l'energia accumulata nel volume unitario.

Tenendo conto della relazione  $B = \mu \cdot H$  (e quindi  $H = B/\mu$ ) si può scrivere:

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \mu \cdot H^2$$

Per la determinazione dell'energia accumulata dal campo magnetico intorno ad un conduttore percorso da corrente, si deve operare come per il caso precedente, considerando cioè tanti volumi in cui si può assumere  $H$  e  $B$  costanti, ad esempio considerando delle corone circolari attorno al conduttore e la lunghezza di quest'ultimo. L'energia globale si determina poi sommando i vari contributi.

Per quanto riguarda l'apporto di energia richiesto per formare il campo risulta intuitivo che esso

sia a carico del circuito elettrico. L'energia accumulata viene poi restituita al momento della interruzione del circuito elettrico in quanto anche il campo magnetico si deve annullare. Tale restituzione può avvenire in varie forme sulle quali si ritornerà in seguito.

## 8.10 - Generalizzazione delle leggi del circuito magnetico

*L'induzione magnetica è una grandezza vettoriale che può variare di valore e di direzione punto per punto.*

Nei paragrafi precedenti si è proceduto alla definizione di alcune grandezze magnetiche imponendo alcune condizioni che hanno permesso di semplificare la trattazione. È ora opportuno rendere i concetti più generali sottraendosi alle restrizioni imposte.

Per fare ciò è conveniente prendere in esame circuiti magnetici diversi dal solenoide chiuso precedentemente considerato.

Si consideri, ad esempio, il solenoide aperto riportato nella figura 8.20. Se nel circuito passa corrente si crea un campo magnetico le cui linee di forza sono disposte come indicato nella stessa figura. Le stesse linee di forza rappresentano il percorso del circuito magnetico.

Per questo caso la f.m.m. ha ancora l'espressione:

$$M = N \cdot I$$

che deve sempre essere considerata la causa all'origine dei fenomeni magnetici.

Il flusso magnetico che si stabilisce è pure rappresentabile con le linee di forza, si deve però osservare che il grado di addensamento di dette linee è diverso nei vari tronchi del circuito magnetico. In particolare le linee sono molto più addensate all'interno del solenoide che non fuori; ne consegue che l'induzione ti sarà molto più elevata all'interno del solenoide dove assume il valore:

$$H = \frac{\Phi}{S}$$

essendo  $S$  la sezione del solenoide stesso.

All'esterno del solenoide, il particolare andamento delle linee di (lusso rende difficile un calcolo semplice. L'induzione peraltro può essere definita qualitativamente individuando sezioni abbastanza piccole di circuito magnetico perpendicolari alle linee di forza come indicato nella figura 8.20. Per ogni sezioni elementare considerata, il rapporto tra il flusso che attraversa la sezione e l'area di quest'ultima fornisce l'entità dell'induzione.

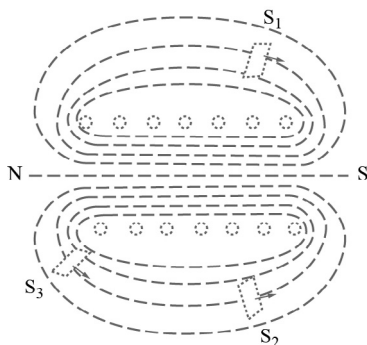


Figura 8.20 - Valutazione dell'induzione del campo magnetico all'esterno di un solenoide.

Esaminando la figura citata si può infine fare una importantissima osservazione: l'induzione è caratterizzata anche da un ben definito orientamento nello spazio. Ad esempio, se si confrontano le situazioni delle sezioni elementari  $S_1$  e  $S_2$ , si può notare che il flusso in gioco ha la stessa entità, ma le linee di forza sono dirette in modo diverso nello spazio. Questa caratteristica si esprime dicendo che l'induzione è una grandezza vettoriale e che deve essere espressa oltre che dall'ampiezza anche da un senso (graficamente per mezzo di una freccia).

In linea di principio si può quindi dire che l'induzione è una grandezza che varia in ampiezza e senso da punto a punto.

*Anche l'intensità del campo magnetico è una grandezza vettoriale che può variare di valore e di direzione.*

Considerazioni analoghe possono essere fatte a proposito dell'intensità del campo magnetico.

Per semplicità ci si limita a considerare il campo all'interno del solenoide. Se la lunghezza di quest'ultimo è notevolmente più grande del diametro e si può ammettere che le linee di forza siano parallele, il valore di  $H$  può ancora essere determinato con la relazione:

$$H = \frac{M}{l} = \frac{N \cdot I}{l}$$

dove, in questo caso,  $l$  non rappresenta la lunghezza di tutto il circuito magnetico, ma solo quella del solenoide.

Poiché  $H$  è legata all'induzione dalla permeabilità magnetica anche l'intensità del campo magnetico deve essere considerata una grandezza vettoriale che può variare di intensità e direzione da punto a punto dello spazio.

*Per energia accumulata in un campo magnetico si intende la somma delle energie accumulate nei vari volumi elementari in cui può essere diviso lo spazio dove il campo è presente.*

Per quanto riguarda l'energia accumulata dal campo magnetico, non essendo quest'ultimo uniforme, per il suo calcolo bisogna procedere in modo più complesso. Più precisamente, si può pensare di suddividere lo spazio in cui si manifesta il campo magnetico in tanti volumi di dimensioni ridotte nei quali l'induzione  $B$  e l'intensità di campo  $H$  sono costanti, calcolare il valore di energia accumulata da ciascun volume partendo dall'energia specifica ed effettuare infine la somma dei contributi di tutti i volumi.

## ESERCIZI SVOLTI

**Esercizio 1** - Un toro magnetico in aria è costituito da 980 spire che sono percorse dalla corrente di 8,5 A. Se la riluttanza del circuito magnetico è di  $125 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1}$ , si calcoli il valore del flusso.

*Soluzione*

Si calcola la f.m.m. che è data dalla formula:

$$M = N \cdot I = 980 \cdot 8,5 = 8\,330 \text{ Asp}$$

Il flusso magnetico si determina applicando la legge di Hopkinson:

$$\Phi = \frac{M}{R_m} = \frac{8\,330}{125 \cdot 10^3} = 0,0666 \text{ Wb}$$

**Esercizio 2** - Una superficie di area pari a  $0,258 \text{ m}^2$  è interessata da un flusso di  $0,825 \text{ Wb}$ . Supposto il campo uniforme, si calcoli il valore di induzione.

*Soluzione*

Il calcolo è immediato con la formula:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,825}{0,258} = 3,198 \text{ T}$$

**Esercizio 3** - In un solenoide chiuso agisce una f.m.m. di 28 500 Asp. La lunghezza del circuito magnetico è di 825 mm. Si calcoli il valore della intensità di campo magnetico.

*Soluzione*

Dopo la conversione della lunghezza in metri:

$$825 \text{ mm} = 0,825 \text{ m}$$

il valore dell'intensità di campo si calcola con la formula:

$$H = \frac{M}{l} = \frac{28\,500}{0,825} = 34\,545 \text{ Asp/m}$$

**Esercizio 4** - Un conduttore rettilineo è percorso da una corrente di 28 A. Si calcoli l'intensità del campo elettrico alla distanza di 22 mm dal centro del conduttore e si indichi il verso delle linee di forza.

*Soluzione*

Dopo la conversione delle unità di misura:

$$22 \text{ mm} = 0,022 \text{ m}$$

si applica la legge di Biot e Savart:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{28}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,022} = 202,7 \text{ Asp/m}$$

Le linee di forza risultano concentriche al conduttore e il loro verso è destrorso per chi guarda lungo il conduttore nel verso della corrente.

**Esercizio 5** - In un campo magnetico l'induzione è di 2,2 T e l'intensità di 1 200 Asp/m. Quale è il valore della energia specifica accumulata dal campo?

*Soluzione*

L'energia specifica, ossia l'energia accumulata sulla unità di volume dello spazio considerato si calcola con la relazione:

$$W = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{1}{2} \cdot 2,2 \cdot 1\,200 = 1\,320 \text{ J/m}^3$$

**Esercizio 6** - In un campo magnetico l'energia immagazzinata specifica è di  $18\,600 \text{ J}$  e l'induzione di 1,95 T. Si calcoli il valore dell'intensità di campo e quello della permeabi-



lità del materiale.

*Soluzione*

L'intensità di campo risulta:

$$H = \frac{2 \cdot W}{B} = \frac{2 \cdot 18\,600}{1,95} = 19\,077 \text{ Asp/m}$$

Il valore della permeabilità è:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1,95}{19\,077} = 0,1 \text{ H/m}$$

**Esercizio 7** - In un campo magnetico insistono una f.m.m. di 6 500 Asp e un flusso di 0,58 Wb. Si calcoli l'energia accumulata.

*Soluzione*

L'energia si calcola con le formule:

$$W = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \Phi = \frac{1}{2} \cdot 6\,500 \cdot 0,58 = 1\,885 \text{ J}$$

**Esercizio 8** - Determinare l'intensità del campo magnetico all'interno di un solenoide rettilineo di lunghezza pari a 328 mm costituito da 1 100 spire attraversate da una corrente di 1,85 A. Si calcola la f.m.m.:

*Soluzione*

$$M = N \cdot I = 1\,100 \cdot 1,85 = 2\,035 \text{ Asp}$$

Il campo magnetico presenta una intensità calcolabile con la formula:

$$H = \frac{M}{l} = \frac{2\,035}{328 \cdot 10^{-3}} = 6\,204 \text{ Asp/m}$$

**Esercizio 9** - All'interno di un solenoide rettilineo di lunghezza 280 mm, l'intensità del campo è di 580 Asp/m. Si calcoli il valore della corrente applicata se le spire sono 320.

*Soluzione*

Si calcola il valore della f.m.m.:

$$M = H \cdot l = 580 \cdot 280 \cdot 10^{-3} = 162,4 \text{ Asp}$$

La corrente si determina ora con la formula:

$$I = \frac{M}{N} = \frac{162,4}{320} = 0,507 \text{ A}$$

**Esercizio 10** - Si deve realizzare un solenoide lineare lungo 0,25 m entro il quale si vuole produrre una intensità di campo di 1 050 Asp/m.

Si calcoli il numero di spire necessarie e la sezione da attribuire al conduttore in modo che la corrente iniettata di 5,20 A comporti una densità di corrente non superiore a 2 A/mm<sup>2</sup>.

*Soluzione*

Si può calcolare immediatamente il valore della f.m.m.

$$M = H \cdot l = 1\,050 \cdot 0,25 = 262,5 \text{ Asp}$$

Il numero di spire si calcola quindi con la relazione:

$$N = \frac{M}{I} = \frac{262,5}{5,25} = 50 \text{ spire}$$

Se il valore di  $N$  risultasse non intero, si prende il valore intero immediatamente superiore. La sezione del conduttore deve quindi essere non inferiore a:

$$S = \frac{I}{D} = \frac{5,20}{2} = 2,6 \text{ mm}^2$$

**Esercizio 11** - Un conduttore viene utilizzato per creare un campo magnetico circolare che alla distanza di 18 mm è di 125 Asp/m. Quale corrente deve circolare nel conduttore?

*Soluzione*

Si deve per prima cosa riportare le unità di misura e quelle del Sistema Internazionale:

$$18 \text{ mm} = 0,018 \text{ m}$$

Si applica quindi la legge di Biot e Savart:

$$I = 2 \pi \cdot r \cdot H = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,018 \cdot 125 = 14,13 \text{ A}$$

## ESERCIZI DA SVOLGERE

**Es. 1** - Un toro magnetico è realizzato con 3 250 spire e genera una forza magnetomotrice di 9 250 Asp. Quale è la corrente fornita al circuito elettrico?

(Risultato: 2,846 A)

**Es. 2** - In un campo magnetico uniforme l'induzione è di 1,2 T. Si calcoli il flusso che attraversa una sezione perpendicolare alle linee di flusso di area  $1\,270\text{ mm}^2$ . Per lo stesso caso si valuti il flusso che attraversa una sezione della stessa superficie ma disposta parallelamente alle linee di flusso.

(Risultato:  $1,52 \cdot 10^{-3}\text{ Wb}$ )

**Es. 3** - Calcolare la riluttanza di un circuito magnetico che con una forza magnetomotrice di 3 250 Asp produce un flusso di 1,25 Wb.

(Risultato:  $2\,600\text{ H}^{-1}$ )

**Es. 4** - Un conduttore lineare attraversato da corrente produce a una distanza di 15 mm dal suo centro una intensità di campo magnetico di 328 Asp/m. Si calcoli il valore della corrente.

(Risultato: 30,9 A)

**Es. 5** - Si calcoli l'energia accumulata in un campo magnetico nel quale sono presenti una f.m.m. di 2 520 Asp e un flusso di 1,25 Wb,

(Risultato: 1 575 J)

**Es. 6** - Si calcoli l'energia specifica di un campo magnetico uniforme in cui l'induzione è di 2,8 T e l'intensità di campo di 22,5 Asp/m.

(Risultato:  $31,5\text{ J/m}^3$ )

**Es. 7** - Si vuole realizzare un solenoide lineare della lunghezza di 0,380 m nel quale il campo magnetico abbia una intensità di 2 750 Asp/m. Se la corrente è di 2,5 A quante spire sono necessarie?

(Risultato: 418 spire)