

1

2

3

Idee per  
il tuo futuro

Stefano Mirandola

# Corso di elettrotecnica ed elettronica

per Elettrotecnica e Automazione

Le applicazioni dell'elettrotecnica  
e dell'elettronica

Contiene un CD-ROM con  
NI Circuit Design Suite software



TECNOLOGIA **ZANICHELLI**

Stefano Mirandola

# **Corso di elettrotecnica ed elettronica**

**per Elettrotecnica e Automazione**

**Le applicazioni dell'elettrotecnica  
e dell'elettronica**

I diritti di elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche), i diritti di noleggio, di prestito e di traduzione sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume. Le richieste per tale tipo di riproduzione vanno inoltrate a

Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi)  
Corso di Porta Romana, n.108  
20122 Milano  
e-mail [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org) e sito web [www.clearedi.org](http://www.clearedi.org)

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale, consultabile al sito [www.zanichelli.it/f\\_catalog.html](http://www.zanichelli.it/f_catalog.html). La fotocopia dei soli esemplari esistenti nelle biblioteche di tali opere è consentita, oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei ed archivi, la facoltà di cui all'art. 71 - ter legge diritto d'autore. Maggiori informazioni sul nostro sito: [www.zanichelli.it/fotocopie/](http://www.zanichelli.it/fotocopie/)

#### Realizzazione editoriale:

- Coordinamento editoriale: Matteo Fornesi, Renata Schivardi
- Collaborazione redazionale e impaginazione: dMB, Firenze
- Progetto grafico: Editta Gelsomini
- Segreteria di redazione: Deborah Lorenzini
- Disegni: Elena Barchi, Bernardo Mannucci

#### Contributi:

- I capitoli 1, 6, 7 sono a cura di Pietro Paolo Longhi
- Rilettura critica: Giovanni Casini

#### Copertina:

- Progetto grafico: Miguel Sal & C., Bologna
- Realizzazione: Roberto Marchetti
- Immagine di copertina: Laborant/Shutterstock

Prima edizione: marzo 2012

L'impegno a mantenere invariato il contenuto di questo volume per un quinquennio (art. 5 legge n. 169/2008) è comunicato nel catalogo Zanichelli, disponibile anche online sul sito [www.zanichelli.it](http://www.zanichelli.it), ai sensi del DM 41 dell'8 aprile 2009, All. 1/B.



#### File per diversamente abili

L'editore mette a disposizione degli studenti non vedenti, ipovedenti, disabili motori o con disturbi specifici di apprendimento i file pdf in cui sono memorizzate le pagine di questo libro. Il formato del file permette l'ingrandimento dei caratteri del testo e la lettura mediante software screen reader. Le informazioni su come ottenere i file sono sul sito [www.zanichelli.it/diversamenteabili](http://www.zanichelli.it/diversamenteabili)

#### Suggerimenti e segnalazione degli errori

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra essi. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli. Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro scrivere al seguente indirizzo:

[lineazeta@zanichelli.it](mailto:lineazeta@zanichelli.it)

Le correzioni di eventuali errori presenti nel testo sono pubblicate nel sito [www.online.zanichelli.it/aggiornamenti](http://www.online.zanichelli.it/aggiornamenti)

Zanichelli editore S.p.A. opera con sistema qualità certificato CertiCarGraf n.477 secondo la norma UNI EN ISO 9001:2008

#### Realizzazione CD-ROM:

- Redazione: Matteo Fornesi, Renata Schivardi
- Segreteria di redazione: Deborah Lorenzini
- Progettazione esecutiva e sviluppo software: duDAT, s.r.l., Bologna
- Interfaccia grafica: Miguel Sal & C., Bologna

Il software installato sul CD-ROM allegato è copyright 2011 National Instruments Corporation.

Tutti i diritti riservati.

LabVIEW, MULTISIM, National Instruments, NI, Ultiboard, il logo di LabVIEW e il logo di National Instruments sono marchi di proprietà di National Instruments.

Il corso, il libro *Corso di elettrotecnica ed elettronica* e il CD-ROM allegato sono prodotti da Zanichelli editore S.p.A. Zanichelli editore S.p.A. è la sola responsabile sia del corso sia del libro *Corso di elettrotecnica ed elettronica* sia del CD-ROM, nonché dei loro relativi contenuti.

Né questo testo, né qualsiasi altro libro o servizio offerto da Zanichelli editore S.p.A. sono pubblicazioni o servizi ufficiali di National Instruments o sono attribuibili in qualsiasi modo a National Instruments.

Il CD-ROM allegato al presente libro di testo include il software Circuit Design Suite versione Education della National Instruments. L'utilizzo del software Circuit Design Suite versione Education è **limitato a fini didattici in ambito domestico**.

Stefano Mirandola

# **Corso di elettrotecnica ed elettronica**

**per Elettrotecnica e Automazione**

**Le applicazioni dell'elettrotecnica  
e dell'elettronica**

# Indice

## 1 Magnetismo ed elettromagnetismo

1	Magnetismo naturale	2
2	Induzione del campo magnetico	6
3	Intensità del campo magnetico	8
4	Forza elettromotrice indotta	11
5	Autoinduzione e induttanza	15
6	Mutua induzione tra circuiti	19
7	Forze tra campo magnetico e corrente	21
8	Materiali paramagnetici, diamagnetici e ferromagnetici	25
9	Circuiti magnetici e legge di Hopkinson	35
	<b>FORMULE</b>	44
	<b>QUESITI</b>	45
	<b>ESERCIZI</b>	45

## 2 La corrente alternata

1	Rappresentazioni vettoriale e complessa di un segnale sinusoidale	46
2	L'impedenza dei bipoli lineari ( $R, C, L$ ) in alternata	51
3	Il metodo simbolico	60
4	La potenza in alternata	62
5	Il sistema trifase	68
	<b>FORMULE</b>	79
	<b>QUESITI</b>	80
	<b>ESERCIZI</b>	81

## 3 I diodi e i transistor

1	Il diodo al silicio	84
2	Impiego dei diodi nei circuiti	95
3	Diodi LED, fotodiodi, Zener	105
4	Il transistor bipolare (BJT)	112
5	Gli amplificatori a BJT	132
6	I transistor FET e gli amplificatori a FET	140
7	La risposta in frequenza degli amplificatori	148
	<b>FORMULE</b>	156
	<b>GUIDA ALLA PROGETTAZIONE</b>	157
	<b>QUESITI</b>	161
	<b>ESERCIZI</b>	162

## 4 L'amplificatore operazionale

---

1	L'amplificatore operazionale ideale	164
2	Circuiti lineari con l'amplificatore operazionale	168
3	Circuiti non lineari con l'amplificatore operazionale	189
	<b>SCHEMI E FORMULE</b>	204
	<b>GUIDA ALLA PROGETTAZIONE</b>	206
	<b>QUESITI</b>	209
	<b>ESERCIZI</b>	209

## 5 I filtri e gli oscillatori

---

1	Lo spettro dei segnali	212
2	I parametri dei filtri	215
3	I filtri passivi	220
4	I filtri attivi	223
5	I generatori di onde rettangolari e triangolari	233
6	Gli oscillatori sinusoidali	242
7	Gli oscillatori al quarzo	253
8	I VCO: oscillatori controllati in tensione	256
	<b>QUESITI</b>	258
	<b>ESERCIZI</b>	259

## 6 Generalità sulle macchine elettriche

---

1	Classificazione generale	262
2	Tipologie di funzionamento	264
3	Comportamento degli isolanti	265
4	Materiali conduttori	267
5	Materiali magnetici	267
6	Perdite	268
7	Rendimento	269
8	Raffreddamento	270

## **7 Il trasformatore**

---

<b>1</b>	Struttura del trasformatore monofase	272
<b>2</b>	Modelli funzionali del trasformatore	275
<b>3</b>	Trasformatore ideale	276
<b>4</b>	Funzionamento a vuoto del trasformatore monofase ideale	276
<b>5</b>	Funzionamento a carico del trasformatore monofase ideale	278
<b>6</b>	Trasformatore reale	280
<b>7</b>	Funzionamento a vuoto del trasformatore monofase reale	282
<b>8</b>	Funzionamento a carico del trasformatore monofase reale	284
<b>9</b>	Dati di targa del trasformatore	285
<b>10</b>	Variazione di tensione da vuoto a carico	286
<b>11</b>	Funzionamento in cortocircuito	290
<b>12</b>	Rendimento del trasformatore	293
<b>13</b>	Trasformatore trifase	295
<b>14</b>	Autotrasformatore	308
<b>15</b>	Prove sui trasformatori	310
<b>16</b>	Trasformatori di misura	319
<b>FORMULE</b>		329
<b>QUESITI</b>		330
<b>ESERCIZI</b>		330

## **Laboratorio**

---

## **Esercitazioni di laboratorio**

---

## **Appendice**

---

Simulazione dei circuiti analogici con Multisim	376
Componenti elettronici	382

## **Indice analitico**

---

- 1**     **Magnetismo ed elettromagnetismo**
  - 2**     **La corrente alternata**
  - 3**     **I diodi e i transistor**
  - 4**     **L'amplificatore operazionale**
  - 5**     **I filtri e gli oscillatori**
  - 6**     **Generalità sulle macchine elettriche**
  - 7**     **Il trasformatore**
- Laboratorio**
- Esercitazioni di laboratorio**
- Appendice**



# 1

## Magnetismo ed elettromagnetismo

In questo capitolo si affronta lo studio dell'elettromagnetismo analizzando i fenomeni magnetici a livello microscopico e macroscopico.

Viene poi introdotto il concetto di induzione magnetica e vengono studiati gli effetti magnetici dei circuiti percorsi da corrente, la forza elettromotrice indotta, l'autoinduzione e la mutua induzione tra circuiti.

Infine si analizzano le differenze tra i materiali paramagnetici, diamagnetici e ferromagnetici.

### 1 Magnetismo naturale

In natura esistono dei materiali particolari (magnetite e altri composti del ferro) capaci di esercitare nello spazio immediatamente circostante delle azioni i cui effetti sono rilevabili attraverso forze che si manifestano sia su materiali dello stesso tipo sia su materiali ferrosi posti nelle loro vicinanze. Ponendo dei provini sperimentali di questi materiali, generalmente realizzati in forma di barrette a parallelepipedo, l'uno vicino dell'altro, si osservano delle mutue interazioni che si trasmettono attraverso lo spazio interposto, come si vede in FIGURA 1.

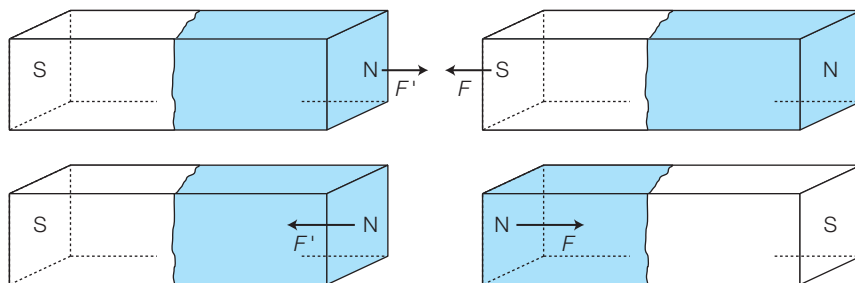


FIGURA 1 Interazioni tra materiali magnetici.

In pratica queste azioni si traducono in forze repulsive o attrattive che tendono ad allontanare o avvicinare i provini sperimentali: si vede che le barrette si attirano o respingono a seconda di come si trovano affacciate le estremità, che vengono chiamate *poli* del magnete.

L'esperimento più comune per visualizzare la distribuzione delle forze magnetiche nello spazio attorno alla barretta si avvale di un minuscolo ago di bussola, costituito da una lamina di magnetite conformata a ferro di lancia, libero di ruotare attorno a un perno centrale, come in FIGURA 2. Quando poniamo l'ago in prossimità degli estremi del provino, esso orienta sempre una stessa punta verso la stessa estremità della barretta magnetica: chiameremo allora *polo sud* l'estremità della barra indicata dall'ago nord della bussola e conseguentemente *polo nord* l'altra.

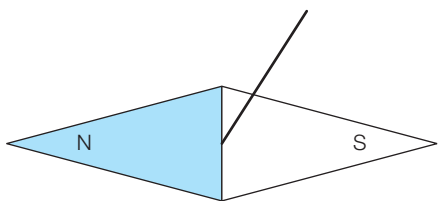


FIGURA 2 Ago di bussola.

Si osserva quindi che avvicinando tra loro due barrette magnetiche si determinano le seguenti azioni:

- i poli omonimi si respingono;
- i poli di nome opposto si attraggono.

Continuando a far muovere l'ago di bussola nelle vicinanze del provino di magnetite si osserva inoltre quanto segue.

- Durante il movimento è possibile tracciare dei percorsi (**linee di forza**) lungo i quali l'asse dell'ago si orienta costantemente in direzione della tangente alla linea stessa.
- Se si colloca sull'ago una molla in grado di misurare la forza torcente che esso subisce durante lo spostamento (FIGURA 3), si vede che la forza di torsione diminuisce man mano che ci si allontana dal provino, fino a risultare praticamente nulla a una certa distanza.

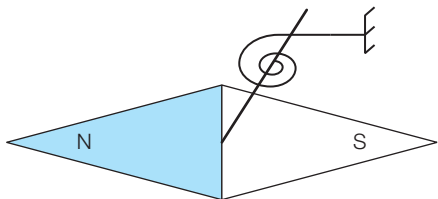


FIGURA 3 Ago di bussola con molla.

- Lungo le linee di forza precedentemente descritte, pur cambiando la direzione dell'ago di bussola, la forza torcente rimane la stessa e varia solo man mano che ci si allontana dal provino, fino ad annullarsi a una certa distanza. In FIGURA 4 sono evidenziati, per un provino a forma di parallelepipedo, alcuni tracciati delle linee di forza ottenuti spostando l'ago di bussola.

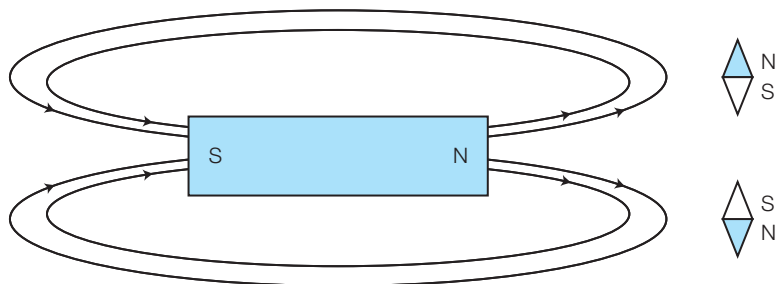


FIGURA 4 Linee di forza.

Per le linee di forza del campo magnetico in conclusione vale quanto segue:

- a) in ogni punto l'azione del campo ha direzione tangente alla linea stessa;
- b) su ogni linea di forza l'azione del campo ha intensità costante in ogni punto;
- c) man mano che ci si allontana dall'elemento magnetico l'azione si riduce, tendendo a scomparire in pratica a grande distanza.

Sapevamo già dall'esperimento visto in FIGURA 1 che poli omonimi si respingono mentre poli opposti si attraggono; questo spiega il fatto che l'ago di una vera bussola ha sempre una estremità colorata: sarà quella che punta verso il polo Nord geografico (cui corrisponde il polo sud magnetico della Terra, essendo a livello macroscopico anch'essa un gigantesco magnete con i poli collocati in prossimità dei poli geografici Nord e Sud). Un modello molto semplificato della Terra dal punto di vista magnetico è rappresentato in FIGURA 5.

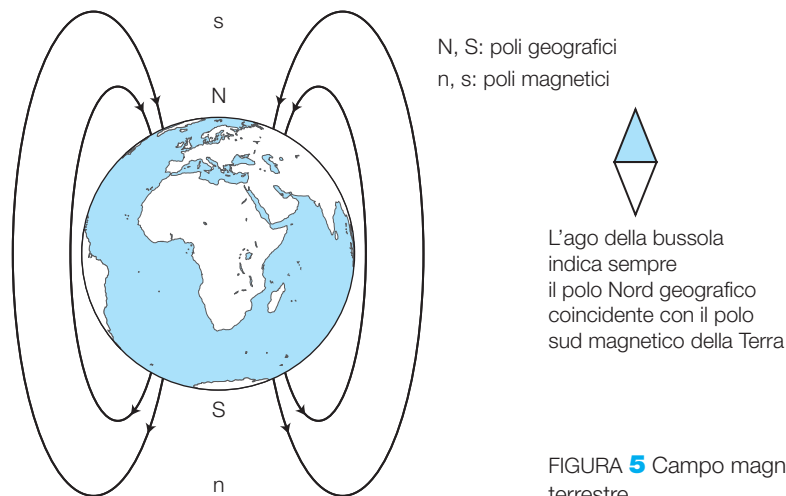


FIGURA 5 Campo magnetico terrestre.

## Origine del magnetismo naturale

Il magnetismo naturale ha origine dalle proprietà atomiche della materia ed è dovuto al movimento degli elettroni attorno al nucleo atomico.

In pratica, nella sua più semplice approssimazione, un atomo può essere considerato come un sistema in cui, attorno a un nucleo centrale dove si concentra la massa, sede della carica positiva posseduta dai protoni che ivi si trovano, ruotano orbite di elettroni. Si può considerare l'orbita di ogni elettrone come una piccola spira magnetica, dalla quale esce il campo prodotto dal movimento delle cariche negative, come rappresentato in FIGURA 6.

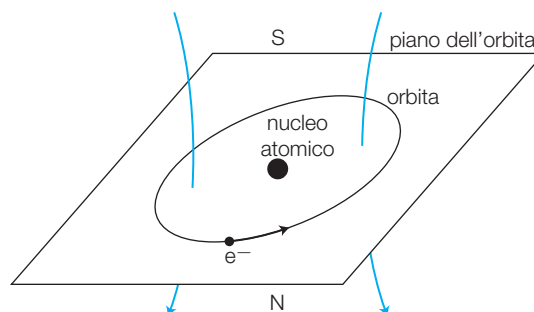


FIGURA 6 Modello atomico.

L'insieme degli atomi orientati magneticamente determina, nella struttura del campione di sostanza in esame, dei macromagneti che costituiscono dei **domini** (di Weiss) la somma dei cui effetti viene rilevata all'esterno sotto forma di induzione magnetica naturale (FIGURA 7).

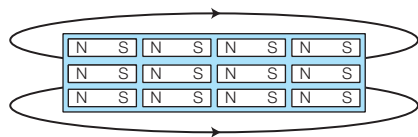


FIGURA 7 Schema di domini orientati all'interno di un campione di magnete.

Nei magneti naturali questa è la situazione tipica, con effetti più o meno accentuati a seconda della percentuale dei domini orientati rispetto al totale di quelli possibili, determinando in questo modo l'intensità della induzione prodotta. Osserviamo che la capacità di generare il campo dipende dalla temperatura in quanto l'agitazione termica tende ad aumentare le vibrazioni molecolari, con l'effetto di rendere casuale l'orientamento di molti domini che finiscono con l'annullarsi a vicenda, riducendo fino ad annullare le proprietà magnetiche.

Per tutti i metalli ferrosi (quelli capaci di produrre effetti magnetici) esiste una temperatura caratteristica, chiamata **punto di Curie**, in corrispondenza della quale le proprietà magnetiche si annullano: per il Ferro (Fe) tale valore è attorno a 1000 °C.

Per concludere questa parte, si può evidenziare il percorso delle linee di forza prodotte da un magnete a parallelepipedo mettendolo in presenza di uno strato di limatura di ferro disposta su un piano: scuotendo leggermente il piano, si ottiene l'immagine di FIGURA 8 dove la limatura tende ad «addensarsi» in corrispondenza delle linee del campo, producendo la nota distribuzione che è stata oggetto degli studi degli scienziati dell'Ottocento che hanno poi prodotto le conoscenze moderne.

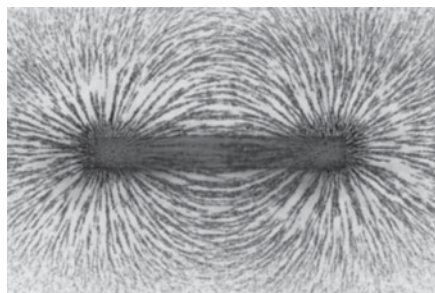


FIGURA 8 Disposizione della limatura di ferro in presenza di un campo magnetico prodotto da una barretta.

Tornando al magnete permanente a parallelepipedo (ma l'esperienza vale per magneti di qualunque forma) si nota che anche se esso viene frantumato in parti più piccole, ognuna di esse presenta sempre entrambe le polarità N, S. *Non è quindi mai possibile separare la carica magnetica positiva da*

*quella negativa, per cui non esiste la sorgente unitaria di carica come invece è per i fenomeni elettrici.*

*Per quanto detto, le linee di forza sono sempre linee chiuse che si concatenano con la loro sorgente, a differenza di quelle del campo elettrostatico.*

*Per convenzione, le linee di forza «escono» sempre dal nord ed «entrano» sempre nel sud.*

## 2 Induzione del campo magnetico

Per le osservazioni fatte in precedenza si può concludere che il campo magnetico è un **campo vettoriale** presente nella zona di spazio che circonda il magnete: a ogni punto dello spazio circostante il magnete si può associare un vettore avente una ben precisa direzione e un verso di orientazione: il vettore di questo campo costituisce l'elemento base per lo studio dei successivi campi generati da correnti elettriche.

Come definito al punto a) di pagina 3, se si fa muovere un provino magnetico di piccolissime dimensioni (tale da non perturbare in modo significativo il campo principale: si usa il solito piccolissimo ago di bussola) nel campo generato dal magnete si ottiene che la forza torcente alla quale esso è sottoposto dispone l'ago in direzione sempre tangente alla linea di forza passante per il punto in cui esso si trova; il verso è tale da rispettare la correlazione tra le polarità della sonda e il magnete principale (FIGURA 9).

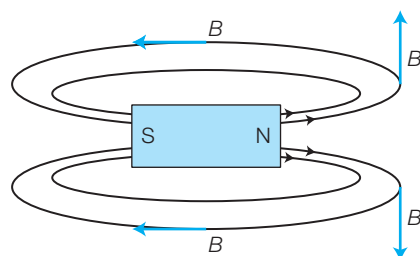


FIGURA 9 Campo vettoriale.

► La forza che si produce è proporzionale all'**induzione del campo magnetico** che rappresenta, punto per punto, la capacità magnetizzante che il magnete è in grado di produrre nello spazio circostante.

L'unità di misura dell'induzione magnetica è il **tesla (T)**, scelta in memoria del fisico croato **Nikola Tesla**, pioniere degli studi elettrotecnici tra la fine dell'Ottocento e la prima metà del Novecento. Il vettore induzione magnetica si indica con la lettera **B**.

### Effetto magnetico della corrente elettrica

Tra il 1820 e il 1830 il fisico danese **Hans Christian Oersted** scoprì che un campo magnetico non viene prodotto solamente da materiale magnetico (come la magnetite) ma viene generato anche da una corrente elettrica: i suoi studi hanno aperto la via all'elettrotecnica moderna. Se si fa percorre-

re un conduttore da una corrente continua  $I$ , questo produce nello spazio circostante un campo magnetico (evidentemente generato dal movimento degli elettroni lungo il conduttore), le cui linee di forza sono costituite da circonferenze concentriche al conduttore stesso, come in FIGURA 10.



FIGURA 10 Campo prodotto dalla corrente in un conduttore rettilineo.

L'immagine del fenomeno, utilizzando la limatura di ferro come nel caso precedente, sarà quella di FIGURA 11.

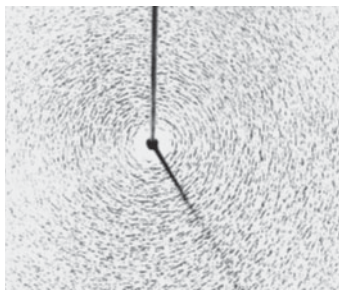


FIGURA 11 Disposizione della limatura di ferro su un piano ortogonale a un filo percorso da corrente elettrica.

Il senso delle linee di forza si determina con la «regola del cavatappi a vite destra»: si suppone cioè di avere un cavatappi che avanzi ruotando a destra; si fa ruotare il cavatappi in modo che esso si muova nel senso della corrente: le linee di forza avranno il verso corrispondente alla sua rotazione.

## Forza magnetomotrice

La correlazione tra la corrente che passa nel conduttore e l'induzione prodotta nello spazio che lo circonda viene espressa dalla grandezza  $\mathcal{F}$ , chiamata **forza magnetomotrice del campo magnetico**.

Questa grandezza è funzione della corrente che produce il campo e del numero di volte che questa corrente agisce; un numero espresso dal cosiddetto **numero di spire**, espressione mutuata dai *solenoidi* di cui ci occuperemo in seguito.

Nel nostro caso consideriamo solo il passaggio di un filo elettrico quindi il numero di spire è 1; definiamo comunque la forza magnetomotrice del campo con l'espressione:

$$\mathcal{F} = N \cdot I \quad (1.1)$$

dove:

- $N$  = numero di spire (numero puro);
- $I$  = intensità di corrente nel conduttore [A].

L'unità di misura della forza magnetomotrice prende il nome di **amperspire (Asp)**.

### 3 Intensità del campo magnetico

Possiamo introdurre l'unità di misura del campo magnetico (in questo caso generato dal passaggio di una corrente in un conduttore), servendoci di un dispositivo fondamentale nell'elettrotecnica: il **solenioide**.

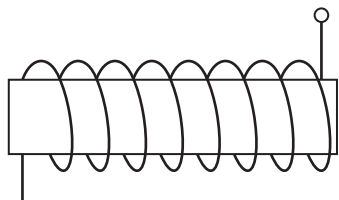


FIGURA 12 Solenoide rettilineo.

Il solenoide è costituito da un conduttore avvolto in un certo numero di spire affiancate, poste su di un supporto isolante, come in FIGURA 12.

Le spire vengono fatte percorrere da una corrente: essa produce un campo magnetico che ha la stessa configurazione di quello prodotto da un magnete permanente avente la stessa forma del solenoide (in questo caso un blocco a forma di parallelepipedo o cilindretto).

La configurazione del campo prodotto è del tipo di quella rappresentata in FIGURA 13 (il procedimento per individuare le linee di forza è quello già visto in precedenza per i magneti naturali) dove si vede che le linee di forza del campo sono parallele all'interno del solenoide mentre si distribuiscono nello spazio circostante secondo lo schema già noto per il magnetismo naturale.

Il verso del campo magnetico lungo le linee di forza e le polarità che il solenoide produce sono ancora determinabili con la regola del cavatappi a vite destra: facendo coincidere il suo asse con quello del solenoide e facendolo ruotare nel senso della corrente lungo le spire si ha che la direzione nella quale la vite entra nel solenoide indica il polo nord e quindi anche il verso di orientazione dell'induzione lungo le linee di forza, come indicato in FIGURA 13. Per le applicazioni elettrotecniche ha interesse conoscere il campo nella zona interna al solenoide: si pensi a tutte le applicazioni come bobine di campanelli, relè attuatori, trasformatori, in cui si utilizzano le proprietà elettromagnetiche per produrre azioni meccaniche ed elettriche.

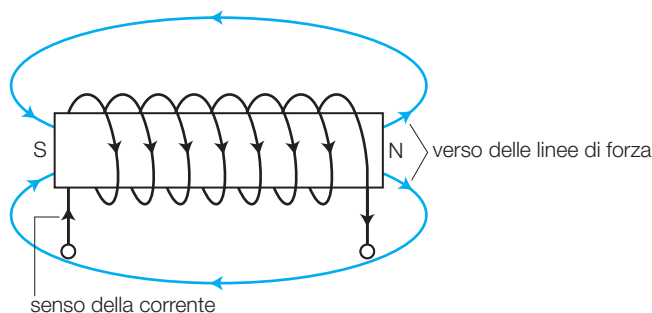


FIGURA 13 Verso delle linee di forza nel solenoide.

Il campo all'interno del solenoide è uniforme e dipende dall'intensità della corrente, dal numero di spire che agiscono contemporaneamente e dalla lunghezza del solenoide stesso.

Osserviamo che il campo interno può essere considerato uniforme solo se il solenoide è **lungo**: questa condizione si verifica per bobine con lunghezza almeno 6-7 volte il diametro.

Il campo magnetico si indica con la lettera  $H$  e può essere calcolato con la formula:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (1.2)$$

nella quale:

- $N$  = numero di spire totali che costituiscono il solenoide (anche se realizzato in più strati avvolti l'uno sull'altro);
- $I$  = intensità di corrente nelle spire, in ampere;
- $l$  = lunghezza del solenoide, in metri.

L'unità di misura dell'intensità del campo deriva da quella della forza magnetomotrice già vista ed è la seguente: **amperspire/metro** oppure, in modo abbreviato, **Asp/m**.

Ovviamente il termine a numeratore della formula che fornisce il campo magnetico era già noto: si tratta della forza magnetomotrice  $\mathcal{F} = N \cdot I$  già vista in precedenza.

### Legge di Biot e Savart

Si può calcolare l'intensità del campo magnetico prodotto da una corrente  $I$  circolante in un conduttore rettilineo di lunghezza infinita (condizione solo teorica: in pratica la formula vale per conduttori lunghi da qualche decina di centimetri in su), alla distanza  $d$  dall'asse del conduttore (FIGURA 14) con la formula:

$$H = \frac{I}{2\pi d} \quad (1.3)$$

Esprimendo la distanza  $d$  in metri e la corrente in ampere, il campo  $H$  risulta in Asp/m.

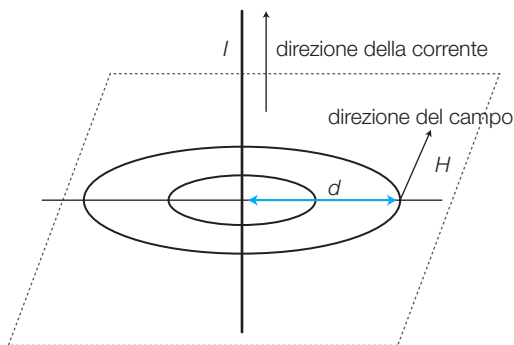


FIGURA 14 Direzione del campo magnetico.



## Induzione e permeabilità magnetica

Il vettore campo magnetico  $H$  è correlato strettamente al vettore induzione magnetica  $B$ , di cui è in pratica l'elemento generatore in quanto, a parte i significati che vedremo in seguito quando parleremo di relazioni tra campo e correnti,  $B$  rappresenta l'effetto di  $H$  quando l'azione magnetica si sviluppa attraverso un mezzo materiale, compresi l'aria e il vuoto.

La relazione è la seguente (in aria o nel vuoto):

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (1.4)$$

dove il termine  $\mu_0$  si chiama **permeabilità** di aria o vuoto e vale:

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

L'unità di misura di  $\mu_0$  è in henry/metro, nel Sistema Internazionale (SI); l'henry (H) sarà introdotto successivamente nel PARAGRAFO 5. La permeabilità magnetica assoluta rappresenta il coefficiente di passaggio tra un caso teorico generico e quanto avviene effettivamente quando l'azione magnetica si sviluppa nell'aria o nel vuoto.

Vedremo in seguito cosa succede quando l'effetto magnetico si applica a un mezzo materiale e quali risultati, assai particolari peraltro, si verificano. Ricordiamo ancora le unità di misura:

$$B \text{ [T]}; \quad H \text{ [A/m]}; \quad \mu_0 \text{ [H/m]}$$

## Flusso magnetico

Se consideriamo il campo prodotto da un magnete (sia naturale sia generato da una corrente in un solenoide) sappiamo che nello spazio circostante si stabilisce un campo di forze caratterizzato dalla presenza del vettore  $B$ , definito in ogni punto dalla sua direzione, verso e intensità. Osserviamo la FIGURA 15: se consideriamo le linee di forza che escono dal polo N del magnete e attraversano la superficie  $S$ , perpendicolare alle linee stesse, si ha che ogni area elementare nella quale possiamo suddividere la superficie  $S$  viene attraversata da una linea cui si associa un ben preciso valore di  $B$ ; alla superficie totale allora possiamo associare la somma dei valori puntuali di  $B$  che la attraversano.

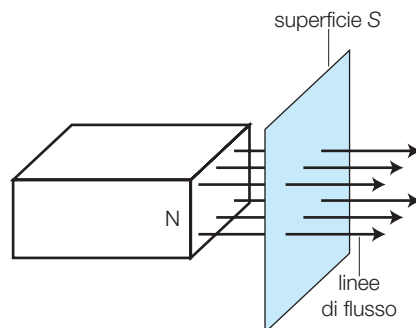


FIGURA 15 Linee di flusso.

La grandezza che esprime questa caratteristica prende il nome di **flusso magnetico** e si esprime con la formula seguente:

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.5)$$

► Il **flusso magnetico** quindi rappresenta l'effetto complessivo del vettore  $B$  (induzione magnetica) sulla superficie  $S$  considerata.

Se la superficie presenta un'inclinazione rispetto alle linee di forza, occorre considerare solo la componente perpendicolare, per esempio nel caso di FIGURA 16 si ha  $S' = S \cdot \cos(\alpha)$ .

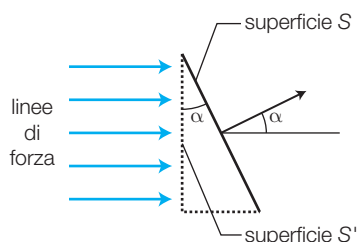


FIGURA 16 Flusso utile.

Questa formula esprime il fatto che il **flusso utile** che attraversa la superficie è quello determinato dalla componente normale delle linee di forza che insistono su di essa, per cui il valore di  $\Phi$  effettivo sulla superficie  $S$  in questo caso sarà:

$$\Phi = B \cdot S \cos(\alpha) \quad (1.6)$$

Il flusso ha come unità di misura il **weber (Wb)** per cui risulta subito un'altra nuova unità di misura (derivata da quanto detto sopra) per l'induzione  $B$ .

Si ricava:

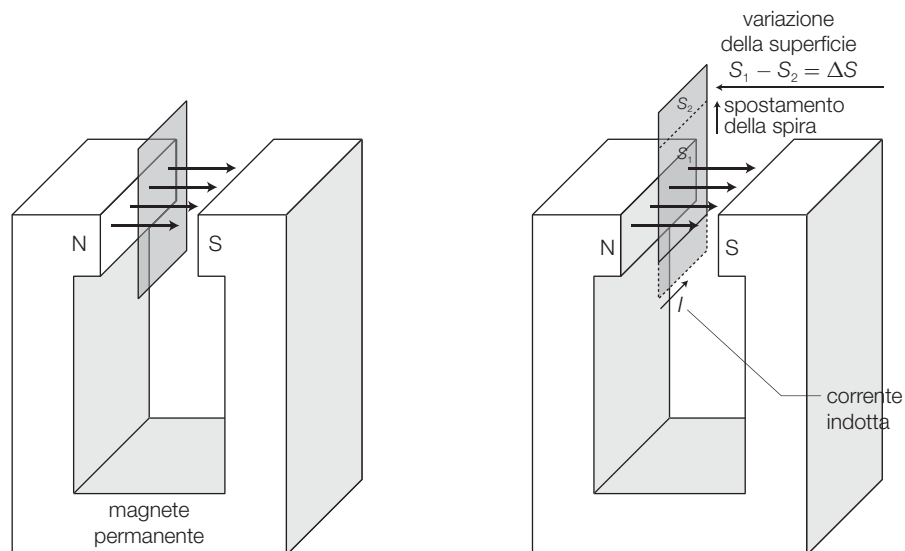
$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1.7)$$

che esprime l'induzione anche come **flusso per unità di superficie** (utile), per cui un'altra unità di misura per  $B$  (oltre al tesla) è **Wb/m<sup>2</sup>**, ancora molto usata nella pratica tecnica.

## 4 Forza elettromotrice indotta

Consideriamo una spira di filo elettrico a forma rettangolare (in generale una spira può essere pensata come un circuito di filo elettrico chiuso). Spostando la spira in un campo magnetico si verifica un importantissimo fenomeno, chiamato **induzione elettromagnetica**, in virtù del quale si ottiene la circolazione di una corrente in un circuito chiuso isolato sfruttando esclusivamente le proprietà del campo magnetico e l'energia che esso trasferisce nello spazio circostante. Osserviamo la FIGURA 17, a pagina seguente: la spira viene spostata perpendicolarmente alle linee di forza che sono rettilinee e parallele fra le espansioni polari del magnete (traferro). L'induzione magnetica  $B$  nel traferro è praticamente costante (se si escludono i bordi) per cui la densità delle linee di flusso sull'area della spira è costante. Muovendo la spira dalla posizione 1 alla posizione 2, l'area sottesa dalla spira subisce una variazione del flusso che la attraversa, in ragione della variazione del numero delle linee di forza che passano attraverso di essa.

FIGURA 17 Induzione elettromagnetica.



In seguito allo spostamento della spira dalla posizione 1 ( $S_1$ ) alla posizione 2 ( $S_2$ ) si avrà una variazione di flusso:

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = B \cdot S_1 - B \cdot S_2 \quad (1.8)$$

avendo supposto costante  $B$  e imputando la variazione del flusso alla sola variazione della superficie di concatenamento.

► Si chiama **flusso concatenato** con una spira il flusso che attraversa l'area sottesa dalla spira stessa; **variazione di flusso concatenato** la differenza tra il flusso iniziale e quello finale dopo un movimento della spira o una variazione dell'induzione a parità di superficie.

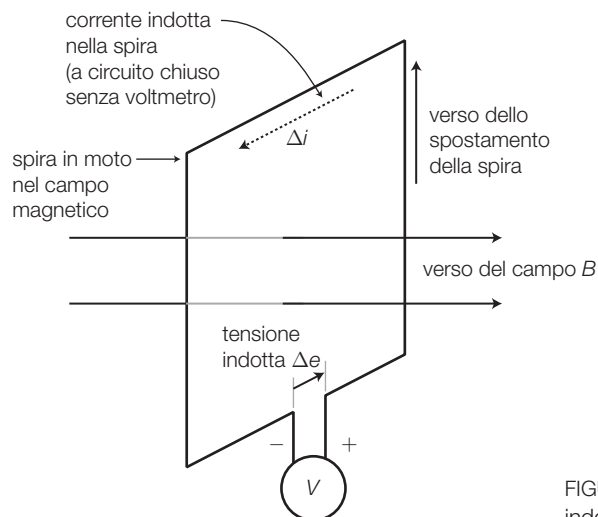


FIGURA 18 Tensione e corrente indotta nella spira in moto.

Facendo compiere il movimento della spira in un tempo  $\Delta t$ , in essa nasce una **forza elettromotrice indotta**  $\Delta e$  misurabile con un voltmetro interrompendo la spira (FIGURA 18):

$$\Delta e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.9)$$

Se la continuità elettrica della spira viene ripristinata in essa circola una corrente  $\Delta i$ . Il segno « $-$ » indica che il fenomeno di induzione avviene comunque a spese di una energia, in questo caso fornita dal lavoro meccanico di spostamento della spira (si vedrà nel seguito che la corrente indotta provoca un campo magnetico contrario a quello principale, che contrasta il movimento della spira e richiede l'apporto di energia esterna).

► La formula precedente esprime la cosiddetta **legge dell'induzione elettromagnetica** (o **legge di Faraday-Neumann-Lenz**), che può essere enunciata anche nel seguente modo:

*quando il flusso magnetico concatenato con un circuito chiuso subisce una variazione, nel circuito stesso nasce una forza elettromotrice indotta proporzionale alla variazione del flusso nell'unità di tempo, il cui verso è tale da opporsi alla causa che la ha generata (segno « $-$ »).*

Passando alle variazioni infinitesime possiamo scrivere la formula precedente nel seguente modo:

$$de = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.10)$$

che esprime in termini di derivata l'induzione elettromagnetica, consentendo di estendere la definizione precedente al concetto di velocità di variazione del flusso concatenato:

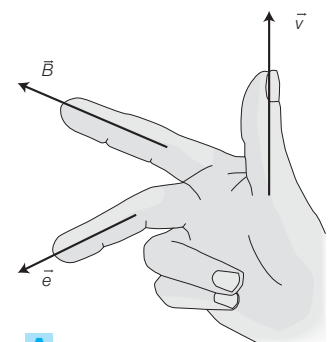
*la forza elettromotrice indotta in un circuito chiuso è proporzionale alla velocità di variazione del flusso concatenato col circuito stesso.*

Il verso delle tensioni indotte si ricava con le regole della mano destra e di Fleming.

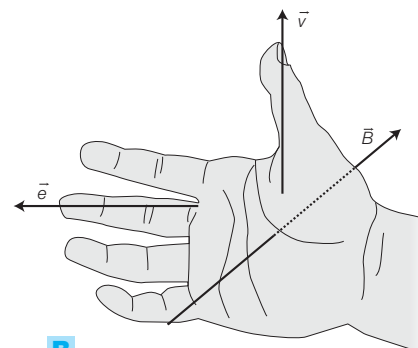
- La **regola della mano destra** si applica con il pollice disteso verso l'alto, l'indice e il medio a formare un angolo di  $90^\circ$  tra loro (FIGURA 19A): il pollice indica la direzione del movimento (velocità  $\vec{v}$ ); l'indice quella del campo magnetico ( $\vec{B}$ ); il medio quella della f.e.m. indotta ( $\vec{e}$ ).
- La **regola di Fleming** si applica con la mano aperta, il pollice posto perpendicolarmente alle dita, mantenendo la mano su un unico piano (FIGURA 19B): il pollice indica la direzione del movimento; il campo entra nel palmo; il verso della tensione indotta esce dalle dita distese.

## Calcolo della forza elettromotrice indotta in un conduttore

Osserviamo che la nascita di una f.e.m. indotta in una spira chiusa avviene unicamente per effetto della variazione del flusso concatenato in essa: è del tutto equivalente se la variazione avviene per un movimento della spira con conseguente variazione del flusso concatenato o per effetto della variazione del campo stesso: il trasformatore funziona utilizzando le variazioni del flusso inducente provocate dalla corrente alternata che lo alimenta per trasferire potenza dalla bobina primaria a quella secondaria, entrambe immobili.



**A**



**B**

**FIGURA 19**

**A)** Regola della mano destra.

**B)** Regola di Fleming.

Adesso consideriamo una spira avente un lato mobile che si muove con velocità  $v$  perpendicolarmente alle linee di flusso, secondo il modello di FIGURA 20: immaginiamo di far muovere il lato inferiore della spira passando dalla posizione più bassa a quella superiore, facendo avvenire lo spostamento in un tempo  $\Delta t$ .

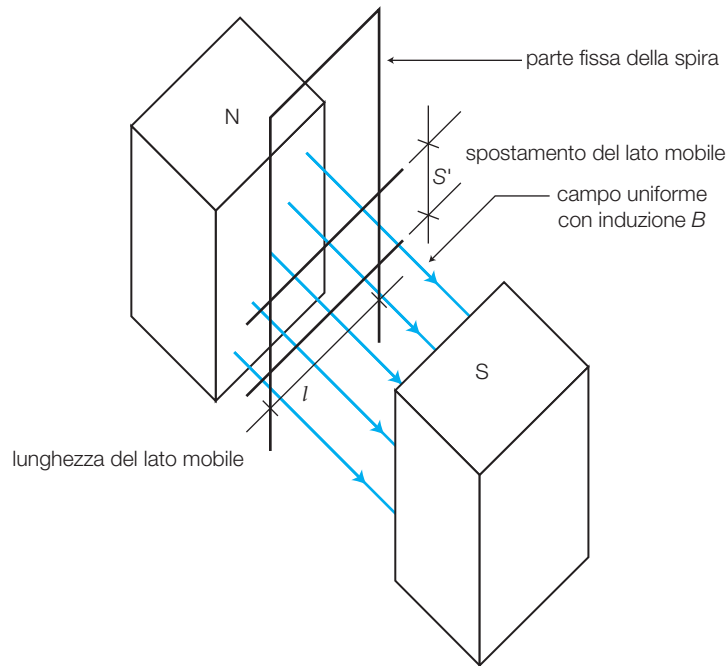


FIGURA 20 Forza elettromotrice indotta.

Per la legge dell'induzione elettromagnetica, trascurando il segno meno, si avrà la generazione di una f.e.m. indotta per effetto dello spostamento, che ha prodotto una variazione del flusso concatenato in quanto è variata l'area della spira:

$$\Delta e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Sappiamo che  $\Delta \Phi = B \cdot \Delta S$ , essendo  $\Delta S$  la variazione della superficie responsabile della variazione di flusso quindi possiamo esprimere la variazione  $\Delta S$  in funzione di velocità e tempo, ottenendo:  $\Delta S = v \cdot \Delta t \cdot l$ .

Sostituendo nella FORMULA 1.10 l'espressione di  $\Phi$  scritta in funzione di  $B$  e della velocità, e considerando che  $\Delta S$  di fatto è negativa (la superficie si sta riducendo), si ottiene:

$$\Delta e = \frac{B \cdot v \cdot \Delta t \cdot l}{\Delta t} \quad (1.11)$$

Semplificando e trascurando il  $\Delta$  (per ottenere un risultato generale) ne deriva la seguente espressione:

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (1.12)$$

che fornisce il valore della f.e.m. indotta in un conduttore in moto con velocità  $v$  perpendicolarmente alle linee di flusso di un campo magnetico.