



# UNITÀ 19

## INDUZIONE E ONDE ELETTRICHE

### 19.1

## Il flusso del vettore $\vec{B}$

**IDEA-CHIAVE** Il flusso del campo magnetico attraverso una superficie dipende da come è orientata la superficie stessa rispetto alle linee del campo.

### La corrente indotta

Il galvanometro è uno strumento che può misurare correnti molto piccole; se ha lo zero centrale permette di misurare correnti positive e correnti negative.

Consideriamo un circuito chiuso formato da una bobina collegata a un galvanometro a zero centrale, come nella → figura 1a.

Se avviciniamo un magnete alla bobina, si nota che il galvanometro segna un passaggio di corrente in senso antiorario [→ figura 1b].

Se il magnete sta fermo non passa più corrente; se invece viene allontanato dalla bobina, nel circuito passa di nuovo corrente ma in verso opposto [→ figura 1c].

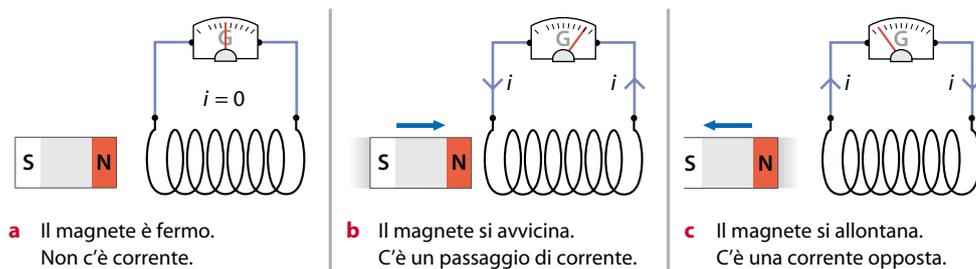
La corrente che circola nei due casi viene chiamata **corrente indotta**. Questa corrente non è creata da una pila, ma dal movimento del magnete. Anche se il magnete sta fermo e la bobina si muove avanti e indietro, nel circuito c'è una corrente indotta. L'intensità della corrente è più grande se il movimento della bobina è più veloce.

Da dove proviene la corrente indotta? Cosa succede quando uno dei due oggetti si muove rispetto all'altro? Consideriamo le linee del campo prodotto dal magnete.

Se magnete e circuito sono fermi l'uno rispetto all'altro, il numero delle linee che attraversano la bobina è costante e nel galvanometro non circola corrente indotta.

Quando, invece, i due oggetti si muovono l'uno rispetto all'altro, il numero delle linee che attraversano la bobina cambia nel tempo. Per esempio, se il magnete si avvicina alla bobina ferma, il numero di linee del campo che attraversa la bobina aumenta, mentre, quando si allontana, il numero delle linee diminuisce.

**Figura 1**  
Corrente indotta in una bobina.

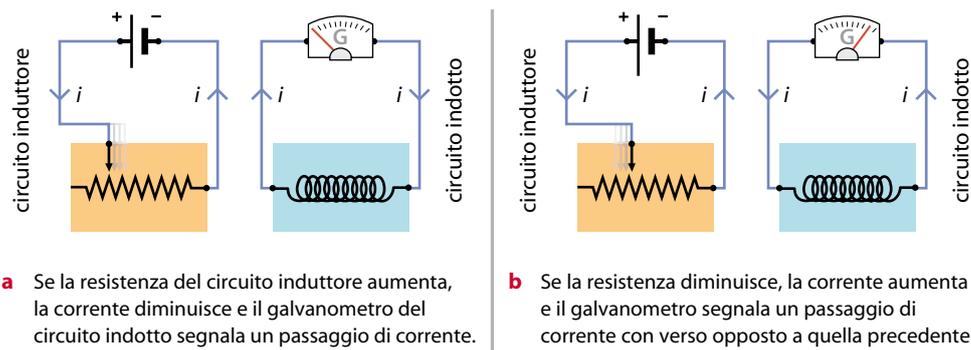


**Figura 2**  
Circuito induttore e circuito indotto.

## Un altro esempio di corrente indotta

Nella → figura 2a, a sinistra c'è un circuito comprendente una pila e un reostato, a destra un circuito con una bobina e un galvanometro. Chiamiamo *circuito induttore* il primo e *circuito indotto* il secondo. Aumentando la resistenza del reostato, per la prima legge di Ohm, la corrente  $i$  nel circuito induttore diminuisce; in tal caso si osserva che il galvanometro segnala una corrente indotta.

Se facciamo diminuire la resistenza del reostato, la corrente  $i$  aumenta; il galvanometro segnala una corrente indotta che circola in verso opposto a quella precedente [→ figura 2b].



Interpretiamo il fenomeno. La corrente nel circuito induttore crea un campo magnetico.

Se facciamo variare la corrente, varia anche il campo magnetico, quindi varia il numero delle linee di campo che attraversano la bobina del circuito indotto. Anche in questo caso, la corrente indotta è prodotta da una variazione del numero di linee del campo che attraversano la bobina del circuito indotto e in esso nasce una corrente indotta.

## La definizione di flusso

Possiamo rendere quantitative le osservazioni precedenti introducendo una nuova grandezza fisica, che dipende dal campo  $\vec{B}$  e dalla superficie che le linee del campo attraversano. Consideriamo un campo magnetico uniforme  $\vec{B}$  e una superficie piana di area  $A$  immersa nel campo. Indichiamo con  $\vec{n}$  la normale alla superficie [→ figura 3] e con  $B_{\perp}$  la componente del campo diretta lungo la normale.

Si chiama flusso del vettore  $\vec{B}$  attraverso la superficie il prodotto tra l'area  $A$  della superficie e la componente  $B_{\perp}$ . Indichiamo il flusso con  $\Phi(B)$  (si legge «fi di B»):

$$\Phi(B) = A \cdot B_{\perp}$$

Se  $\alpha$  è l'angolo che il vettore  $\vec{B}$  forma con la normale  $\vec{n}$  alla superficie, la componente  $B_{\perp}$  si calcola con il prodotto  $B \cdot \cos \alpha$ , perciò il flusso di  $\vec{B}$  è:

$$\Phi(B) = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

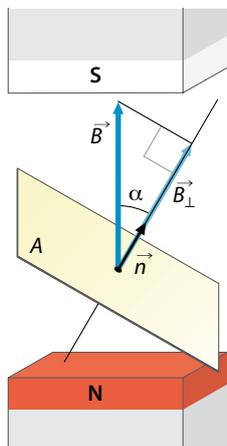
Nel SI il flusso magnetico si misura in weber (simbolo Wb):

$$1 \text{ Wb} = (1 \text{ m}^2) \times (1 \text{ T})$$

**ESEMPIO 1** L'area della superficie è  $20 \text{ cm}^2$ , il campo  $\vec{B}$  di valore  $0,5 \text{ T}$  forma un angolo di  $60^\circ$  con la normale alla superficie. Il flusso di  $\vec{B}$  vale:

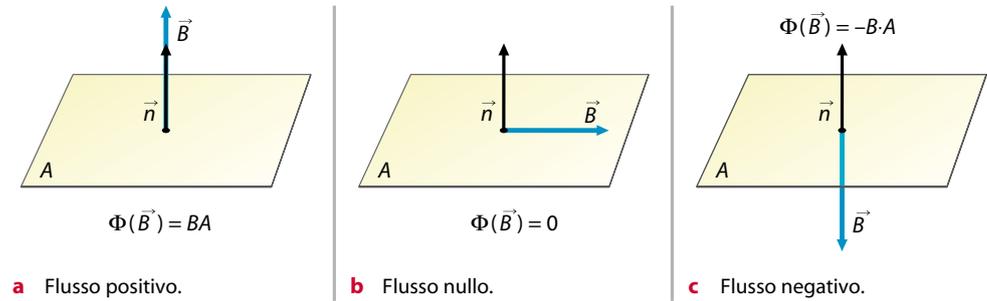
$$\Phi(B) = (20 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (0,5 \text{ T}) \times 0,5 = 5,0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

**Figura 3**  
 $\vec{n}$  è la normale alla superficie di area  $A$ ;  $B_{\perp}$  è diretta lungo la normale alla superficie.



Il flusso del vettore  $\vec{B}$  attraverso una superficie può essere positivo, negativo o nullo a seconda del valore dell'angolo  $\alpha$ ; è massimo in valore assoluto quando il vettore  $\vec{B}$  è perpendicolare alla superficie, è nullo quando è parallelo [→ figura 4].

**Figura 4**  
Il flusso può essere positivo, negativo o nullo a seconda del valore che assume l'angolo fra il vettore  $\vec{B}$  e la normale alla superficie.

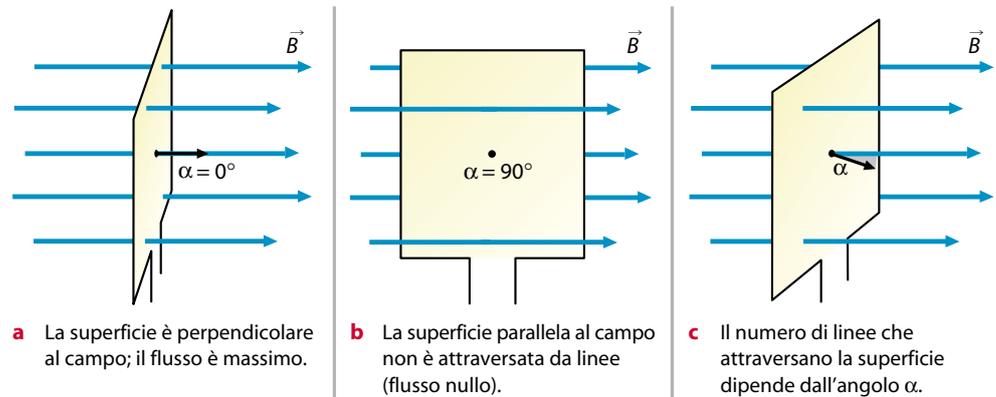


## ■ Variazioni di flusso e linee del campo magnetico

Il flusso dipende dal numero di linee di campo che attraversano la superficie. Consideriamo, infatti, la spira rettangolare della → figura 5; essa è immersa in un campo magnetico uniforme  $\vec{B}$  ed è libera di ruotare intorno al proprio asse.

Nella → figura 5a il campo è perpendicolare alla spira, il numero di linee che l'attraversano è massimo e il flusso è massimo. Nella → figura 5b il campo è parallelo alla superficie; nessuna linea attraversa la superficie, il flusso è nullo. In una posizione intermedia [→ figura 5c], alcune linee attraversano la superficie. Il flusso assume un valore compreso fra zero e il prodotto  $A \cdot B$ ; tale valore dipende dall'angolo  $\alpha$ .

**Figura 5**  
Flusso attraverso una superficie.



Pertanto nel circuito indotto c'è corrente se cambia il numero di linee del campo. Poiché il numero di linee del campo e il flusso che attraversano una superficie sono legati:

Nasce una corrente indotta ogni volta che il flusso del vettore  $\vec{B}$  attraverso il circuito indotto cambia nel tempo.

Poiché nella definizione di flusso intervengono tre grandezze  $A$ ,  $B$  e  $\alpha$ , una variazione di flusso si manifesta ogni volta che cambia nel tempo una delle tre grandezze.

## ■ Il flusso attraverso una bobina

Ora possiamo interpretare le esperienze qualitative sulla corrente indotta in termini di flusso magnetico. Il flusso del vettore  $\vec{B}$  attraverso una spira di area  $A$  è:

$$\Phi(B) = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

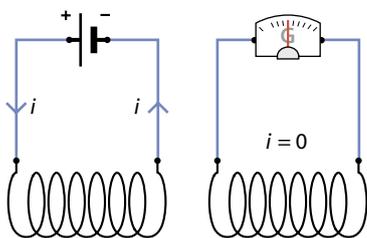
il flusso attraverso una bobina di  $N$  spire tutte di area  $A$  è  $N$  volte maggiore:

$$\Phi(B) = N \cdot A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

Perciò, per avere grandi variazioni di flusso, si utilizzano bobine con molte spire.

### ■ La corrente indotta

- 1 Osserva la figura seguente. Per certi versi la situazione è analoga a quella della figura 1 di pag. 1.



- Se muoviamo uno dei due circuiti, nel galvanometro passa una corrente indotta? Spiega.

### ■ La definizione di flusso

#### 2 Vero o falso?

- a) Il flusso di  $\vec{B}$  è una quantità sempre positiva.  V  F  
 b) Se la direzione del campo magnetico è perpendicolare alla superficie il flusso è massimo.  V  F  
 c) Aumentando l'intensità di  $\vec{B}$  il flusso aumenta.  V  F  
 d) Il valore del flusso non dipende da quello della superficie ma solo dal suo orientamento rispetto a  $\vec{B}$ .  V  F  
 e) L'unico modo per avere flusso nullo è che il campo magnetico sia nullo.  V  F

- 3 Una spira di raggio 10 cm è posta in un campo magnetico di intensità 0,50 T, perpendicolarmente alle linee di campo.

- Calcola il flusso di  $\vec{B}$  attraverso la superficie della spira.  
 ► Di quanto deve aumentare il raggio della spira se vogliamo che il flusso raddoppi?

- 4 Una spira rettangolare di lati 6,0 cm e 8,0 cm si trova in un campo magnetico uniforme di intensità 2,0 T. Indica con  $\alpha$  l'angolo che il vettore  $\vec{B}$  forma con la normale alla spira.

- Completa la seguente tabella.

$\alpha$	0	30	60	90	120
$\Phi$ (B)	.....	.....	.....	.....	.....

### ■ Variazioni di flusso e linee del campo magnetico

- 5 Considera un magnete posto di fronte a una spira rettangolare in modo che le linee del campo prodotto dal magnete siano perpendicolari alla spira.

- Mentre il magnete si avvicina alla spira, il numero delle linee che attraversano la spira aumenta o diminuisce?  
 ► Il flusso di  $\vec{B}$  aumenta o diminuisce?  
 ► E se il magnete si allontana, che cosa succede al flusso del campo magnetico?

- 6 Il flusso del campo attraverso una superficie è massimo quando l'angolo  $\alpha$  fra  $\vec{B}$  e la normale  $\vec{n}$  alla superficie è nullo.

- Per quale valore dell'angolo il flusso assume il valore massimo negativo?

- 7 Un magnete è posto vicino a una bobina e le linee del campo prodotto dal magnete attraversano la bobina. Il magnete viene allontanato velocemente.

- Il flusso del campo che attraversa la bobina aumenta o diminuisce?  
 ► La variazione del flusso dipende da quale polo era di fronte alla bobina?

- 8 All'interno di un campo magnetico uniforme di intensità 0,8 T, viene posta una spira quadrata di lato 5,0 cm. La normale al piano della spira forma un angolo  $\alpha$  di 45° con le linee del campo.

- Calcola la variazione del flusso magnetico attraverso la spira quando l'angolo  $\alpha$  varia da 45° a 90°.

- 9 Una spira circolare, che giace in un campo magnetico di intensità  $3,5 \times 10^{-3}$  T su un piano perpendicolare al campo magnetico, ruota di 30°.

- Sapendo che  $\Delta\Phi = -6,3 \times 10^{-4}$  Wb, determina il raggio della spira.

### ■ Il flusso attraverso una bobina

- 10 Una bobina è formata da 50 spire rettangolari, di lati 4,0 cm e 5,0 cm e si trova in un campo magnetico di intensità  $2,0 \times 10^{-3}$  T perpendicolare alla bobina.

- Calcola il flusso attraverso la bobina.  
 ► Calcola la variazione di flusso se la bobina ruota di 45°.

- 11 Un solenoide lungo 15 cm è formato da 40 spire. Si fa variare la corrente nel solenoide da 1,5 A a 2,5 A.

- Di quanto varia il campo magnetico?  
 ► Qual è la variazione di flusso attraverso una spira di raggio 3,0 cm disposta perpendicolarmente all'asse del solenoide?

- 12 Nella tabella sono riportate le grandezze che permettono di calcolare il flusso magnetico attraverso una bobina di  $N$  spire, ognuna di area  $A$ , disposta perpendicolarmente a  $\vec{B}$ .

- Completala nelle parti mancanti.

$N$	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$\Phi$ (B) (Wb)
20	8,0	0,40	.....
50	.....	0,50	$3,0 \times 10^{-4}$
100	10	.....	$5,0 \times 10^{-4}$



Altri problemi sul **flusso del vettore  $\vec{B}$**  a fine unità, p. 26

## ■ La causa delle correnti indotte

Tutte le volte che varia il flusso magnetico attraverso un circuito chiuso, nel circuito viene generata una corrente indotta. Poiché sappiamo che una corrente è prodotta da una differenza di potenziale, dobbiamo supporre che nel circuito indotto si crei una differenza di potenziale che fa circolare la corrente indotta. Questa differenza di potenziale non è fornita da una pila o da un altro generatore di d.d.p., ma da una variazione del flusso magnetico che attraversa il circuito indotto; d'ora in poi la chiameremo **d.d.p. indotta** (o tensione indotta).

variazione di flusso magnetico  $\Rightarrow$  d.d.p. indotta  $\Rightarrow$  corrente indotta

Per accertare la presenza di una d.d.p. indotta in un circuito, basta sostituire il galvanometro, che segnala il passaggio di corrente, con un voltmetro.

## ■ La legge di Faraday-Neumann

Il legame tra la differenza di potenziale indotta, che indichiamo con  $\Delta V_i$ , e la variazione di flusso magnetico  $\Delta\Phi(B)$  è stabilito dalla **legge di Faraday-Neumann**:

La d.d.p. indotta in un circuito chiuso è direttamente proporzionale alla variazione di flusso magnetico e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo in cui avviene tale variazione.

$$\Delta V_i = \frac{\Delta\Phi(B)}{\Delta t}$$

d.d.p. indotta (V)
variazione di flusso (Wb)
intervallo di tempo (s)

La d.d.p. indotta è tanto maggiore quanto più velocemente varia il flusso del campo magnetico  $\vec{B}$  che attraversa il circuito.

Se il circuito indotto ha una resistenza  $R$ , per la prima legge di Ohm vi circola una corrente indotta:

$$i_{\text{indotta}} = \frac{\Delta V_i}{R}$$

**ESEMPIO 1** Se il flusso di  $\vec{B}$  attraverso una spira varia di 0,002 Wb in un centesimo di secondo, la d.d.p. indotta nella spira vale:

$$\Delta V_i = \frac{\Delta\Phi(B)}{\Delta t} = \frac{0,002 \text{ Wb}}{0,01 \text{ s}} = 0,2 \text{ V}$$

Se la spira ha una resistenza di 10  $\Omega$ , la corrente indotta che vi circola è:

$$i_{\text{indotta}} = \frac{0,2 \text{ V}}{10 \Omega} = 0,02 \text{ A}$$

La d.d.p. indotta da una variazione di flusso non è costante nel tempo e provoca una corrente indotta non continua. Infatti, si vede sperimentalmente che l'ago del galvanometro, dopo essersi spostato, torna sullo zero perché la corrente si annulla quando il flusso non varia più. Così come è scritta, la legge di Faraday-Neumann permette di calcolare una d.d.p. media e non istantanea.



## La legge di Lenz

Il fisico russo Emilij C. Lenz (1804-1865) ha stabilito il verso della corrente indotta:

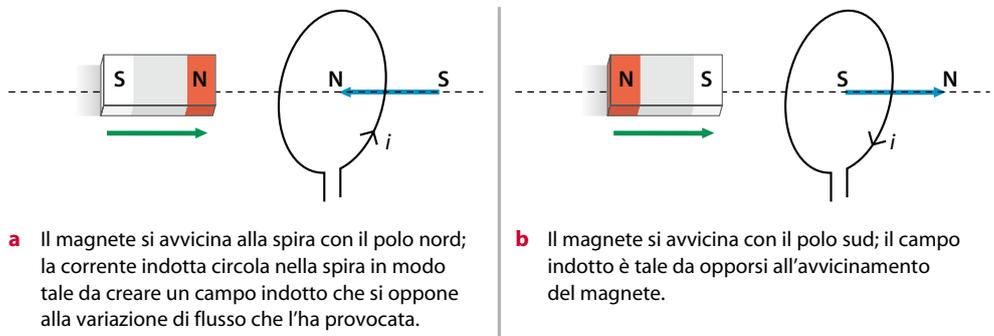
Una corrente indotta circola sempre in verso tale da creare un campo magnetico indotto che si oppone alla causa che l'ha generato, cioè alla variazione di flusso.

Chiariamo la legge di Lenz con l'esempio della → figura 1, in cui un magnete viene spinto verso una spira circolare (→ figura 1a). La corrente indotta circola nella spira in modo tale che il campo che essa genera si oppone al movimento del magnete. Viceversa, se il magnete viene spinto con il polo sud verso la spira (→ figura 1b), la corrente indotta circola in verso opposto e in tal modo oppone il polo sud al magnete e lo respinge.

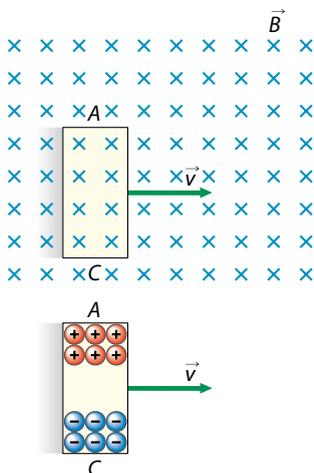
Tenendo presente la legge di Lenz, la legge di Faraday-Neumann va riscritta ponendo un segno meno davanti alla variazione di flusso nel tempo:

$$\Delta V_i = \frac{-\Delta\Phi(B)}{\Delta t}$$

**Figura 1**  
Verifica della legge di Lenz.



**Figura 2**  
Mentre la sbarra si muove, la forza di Lorentz spinge gli elettroni verso l'estremo C che si carica negativamente; nello stesso tempo l'estremo A si carica positivamente. Fra A e C si crea una differenza di potenziale.



La corrente indotta trasporta energia elettrica. Da dove proviene questa energia se nel circuito non c'è un generatore?

Per rispondere, vediamo cosa succederebbe se la legge di Lenz non fosse vera. La corrente indotta produrrebbe un campo magnetico nella spira con un polo sud che verrebbe attratto dal magnete. Quindi non sarebbe necessario compiere lavoro sul magnete per farlo avanzare, in contraddizione con il principio di conservazione dell'energia.

L'energia elettrica delle cariche che si muovono nella spira deriva dal lavoro che viene fatto per spingere il magnete. La legge di Lenz è coerente con il principio di conservazione dell'energia.

## La forza elettromotrice indotta

Se il flusso di  $\vec{B}$  cambia attraverso un circuito aperto, in esso non può circolare corrente. Il fenomeno dell'induzione però è presente ugualmente; ai capi del circuito aperto si stabilisce una forza elettromotrice indotta che indichiamo con f.e.m.<sub>indotta</sub>. La legge di Faraday-Neumann-Lenz vale ancora nella forma:

$$f.e.m._{indotta} = \frac{-\Delta\Phi(B)}{\Delta t}$$

Consideriamo la sbarra della → figura 2. Nella sbarra sono presenti elettroni liberi. Mentre essa si muove in un campo magnetico che entra nel piano del foglio, gli elettroni sono trascinati con la stessa velocità nel verso del movimento e su ognuno di essi si esercita la forza di Lorentz che li spinge verso l'estremo C della sbarra. Il risultato è che l'estremo C si carica negativamente e l'estremo A si carica positivamente. Per effetto di questa redistribuzione delle cariche, agli estremi della sbarra si crea una f.e.m. indotta.



## RICHIAMO

Quando due variabili sono direttamente proporzionali, il loro rapporto si mantiene costante.

## L'induttanza di una bobina

Quando una bobina di lunghezza  $l$ , composta da  $N$  spire, viene percorsa da una corrente di intensità  $i$ , lungo l'asse della bobina si crea un campo magnetico che si calcola con la formula:

$$B = \frac{2\pi \cdot k \cdot N \cdot i}{l}$$

Il flusso di  $\vec{B}$  attraverso le  $N$  spire, ognuna di area  $A$ , è direttamente proporzionale a  $B$ :

$$\Phi(B) = N \cdot A \cdot B$$

Poiché  $B$  è direttamente proporzionale alla corrente  $i$  che attraversa la bobina, possiamo affermare che il flusso di  $\vec{B}$  è direttamente proporzionale alla corrente  $i$  e quindi il rapporto tra flusso e corrente è costante:

$$\frac{\Phi(B)}{i} = \text{costante}$$

La costante di proporzionalità si chiama **induttanza** o *coefficiente di autoinduzione* della bobina. Nel SI l'induttanza si misura in weber/ampere, cioè in henry (simbolo H):

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ Wb}}{1 \text{ A}}$$

L'induttanza, che di solito si indica con la lettera  $L$ , è una proprietà intrinseca di ogni circuito e dipende dalle caratteristiche geometriche. Nel caso di una bobina l'induttanza è:

$$L = \frac{\Phi(B)}{i} = \frac{N \cdot A \cdot B}{i} = \frac{2\pi \cdot k \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

**ESEMPIO 1** Una bobina lunga 10 cm, di 400 spire, ognuna di area 20 cm<sup>2</sup>, ha un'induttanza:

$$L = \frac{6,28 \times (2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2) \times 400^2 \times (20 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{0,1 \text{ m}} = 0,04 \text{ H}$$

## L'autoinduzione

Nel circuito della → figura 1, la pila fa circolare una corrente  $i$  nella bobina. La corrente crea a sua volta un campo magnetico  $\vec{B}$  che attraversa le spire della bobina. Modificando il valore della corrente, il valore di  $\vec{B}$  cambia e quindi cambia il flusso che attraversa ogni spira della bobina.

Se al tempo  $t_1$  la corrente vale  $i_1$  e al tempo  $t_2$  vale  $i_2$ , i rispettivi valori del flusso sono:

$$\Phi_1(B) = L \cdot i_1 \text{ e } \Phi_2(B) = L \cdot i_2$$

la conseguente variazione di flusso nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  è

$$\Delta\Phi(B) = \Phi_2(B) - \Phi_1(B) = L \cdot i_2 - L \cdot i_1 = L \cdot \Delta i$$

Per la legge di Faraday-Neumann, nel circuito nasce una tensione indotta. Questo fenomeno si chiama **autoinduzione** e la tensione prodotta si dice *autoindotta*.

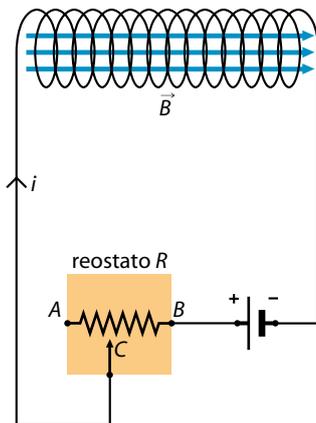
Il valore della tensione autoindotta è:

$$\Delta V_{\text{autoindotta}} = \frac{-\Delta\Phi(B)}{\Delta t} = \frac{-L \cdot \Delta i}{\Delta t}$$

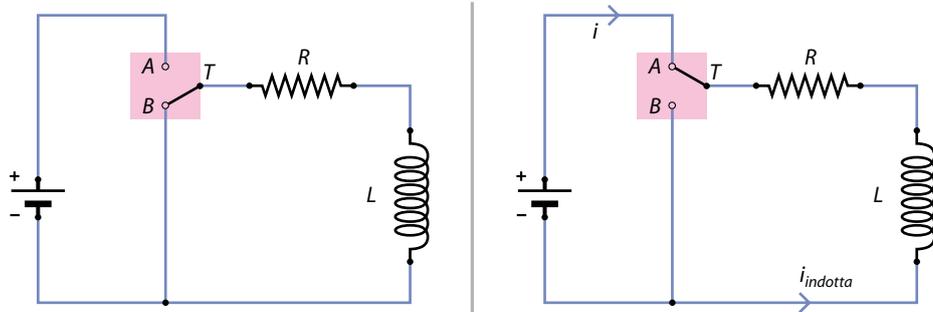
La tensione autoindotta è proporzionale all'induttanza del circuito. Il segno meno deriva dal fatto che è valida la legge di Lenz, perciò la f.e.m. autoindotta si oppone alla causa che la genera. Ciò significa che la bobina si oppone sia all'aumento sia alla diminuzione della corrente che l'attraversa.

**Figura 1**

Con il reostato si può modificare la corrente che passa nella bobina. Al variare della corrente, varia il flusso del campo che attraversa la bobina stessa.



**Figura 2**  
Apertura e chiusura  
di un circuito.



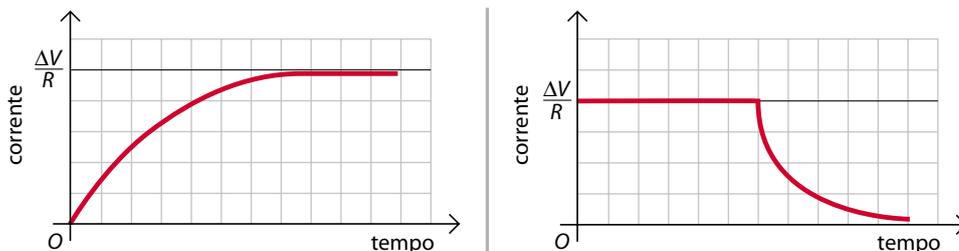
**a** Nel circuito aperto non circola corrente.

**b** Il circuito viene chiuso, la corrente aumenta.

Per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, si crea una tensione autoindotta che fa circolare nella bobina una corrente indotta opposta a quella principale. Ne deriva che la corrente non cambia istantaneamente raggiungendo il valore  $\frac{\Delta V}{R}$ , come avverrebbe in assenza della bobina. La presenza della bobina induce un ritardo nel cambiamento della corrente, come illustrato nella  $\rightarrow$  figura 3a.

Nella  $\rightarrow$  figura 3b, invece, è riportato l'andamento della corrente all'apertura del circuito (l'interruttore viene spostato sul punto B come nella  $\rightarrow$  figura 2a). Anche questo andamento si giustifica allo stesso modo: aprendo il circuito si genera una tensione autoindotta che si oppone alla diminuzione di corrente; perciò la corrente non diventa subito zero, come avverrebbe se non ci fosse la bobina.

**Figura 3**  
Effetti dell'autoinduzione.



**a** Per effetto dell'induttanza  $L$ , la corrente non raggiunge subito il valore massimo ma impiega un certo tempo.

**b** Se il circuito viene aperto, la corrente raggiunge il valore zero con un certo ritardo, dovuto alla presenza dell'induttanza  $L$ .

## ■ L'energia magnetica

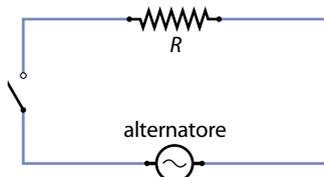
L'energia fornita dalla pila si ripartisce fra resistenza e induttanza. La potenza assorbita dalla resistenza  $R$  è data da  $R \cdot i^2$ , quella invece assorbita dall'induttanza viene immagazzinata nella bobina e si chiama *energia magnetica*. Si può dimostrare che l'energia magnetica, che indichiamo con  $U_m$ , si calcola con l'espressione

$$U_m = \frac{1}{2} L \cdot i^2$$

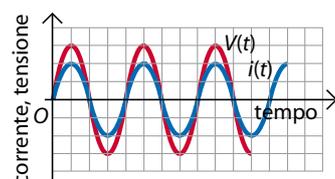
perciò è direttamente proporzionale all'induttanza  $L$  e al quadrato della corrente  $i$ .



**Figura 1**  
Corrente alternata in un resistore.

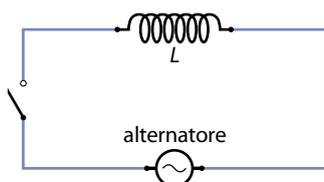


**a** Resistore collegato a un generatore che fornisce una tensione alternata.

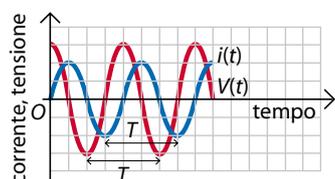


**b** La corrente è alternata e in fase con la tensione che la produce.

**Figura 2**  
Corrente alternata in una bobina.



**a** Bobina di induttanza  $L$  collegata a un alternatore.



**b** La corrente è in ritardo rispetto alla tensione, raggiunge il valore massimo dopo un quarto di periodo.

## Corrente alternata in un resistore

Nel circuito della → figura 1a un resistore  $R$  è collegato a un alternatore che fornisce una tensione alternata di tipo sinusoidale:

$$V(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$V(t)$  è la tensione istantanea,  $V_m$  quella massima,  $\omega$  la velocità angolare del rotore:  $\omega = 2\pi f$ .

Chiudendo l'interruttore, anche la corrente istantanea  $i(t)$  che passa nel circuito è di tipo sinusoidale e varia tra valori positivi e valori negativi con la stessa frequenza della tensione. Poiché la frequenza è il reciproco del periodo, corrente e tensione oscillano con lo stesso periodo e in ogni ciclo raggiungono i valori massimi negli stessi istanti. Si dice allora che corrente e tensione sono *in fase* [→ figura 1b].

L'intensità di corrente istantanea si calcola con la prima legge di Ohm:

$$i(t) = \frac{V(t)}{R}$$

La corrente massima è  $i_m = \frac{V_m}{R}$ .

## Corrente alternata in una bobina

Nel circuito della → figura 2a una bobina di induttanza  $L$  è collegata a un generatore di tensione alternata. Supponiamo che i fili di collegamento abbiano resistenza trascurabile; inoltre, consideriamo trascurabile anche la resistenza della bobina.

Quando l'interruttore viene chiuso, il circuito è percorso da una corrente alternata che non è in fase con la tensione, ma raggiunge il suo massimo dopo un quarto di periodo [→ figura 2b].

Infatti, nella → figura 2b si ha il massimo di  $V(t)$  per  $t = 0$  e il massimo di  $i(t)$  per  $t = T/4$ . La corrente è *in ritardo* rispetto alla tensione.

Si può dimostrare che, in questo caso, la corrente massima si calcola con la formula:

$$i_m = \frac{V_m}{\omega \cdot L}$$

**ESEMPIO 1** L'induttanza della bobina è 0,5 H, la tensione massima 311 V, la frequenza 50 Hz. In tali condizioni,  $\omega = 2\pi \cdot f = 314 \text{ rad/s}$ ; la corrente massima è:

$$i_m = \frac{311 \text{ V}}{(314 \text{ rad/s}) \times (0,5 \text{ H})} = 1,98 \text{ A}$$

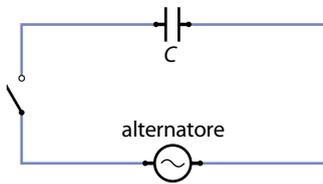
## Corrente alternata in un condensatore

Quando colleghiamo una pila a un condensatore, dopo breve tempo il condensatore è carico e la corrente si interrompe. Se invece il condensatore è collegato a un alternatore [→ figura 3a] e i fili di collegamento hanno resistenza trascurabile, la tensione variabile  $V(t)$  del generatore è applicata alle armature del condensatore, perciò quest'ultimo si carica e si scarica in un periodo, dando vita a una corrente alternata.

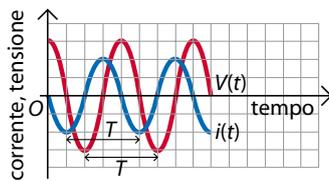
In questo caso, la corrente ha un andamento periodico come la tensione, ma è *in anticipo* di un quarto di periodo [→ figura 3b]. La corrente massima vale:

$$i_m = \omega \cdot C \cdot V_m$$

**Figura 3**  
Corrente alternata in un condensatore.



a Il condensatore di capacità  $C$  viene alimentato da un generatore di tensione alternata.

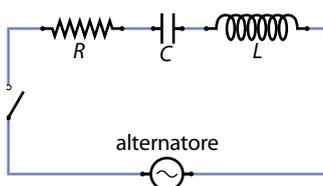


b La corrente è in anticipo di un quarto di periodo rispetto alla tensione.

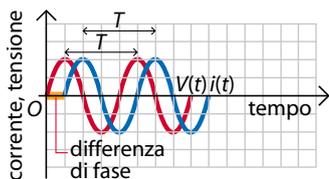
**RICHIAMO**

Una corrente continua  $i$  che attraversa una resistenza  $R$  dissipa per effetto Joule una potenza  $P$  che si calcola con la formula:  $P = R \cdot i^2$ .

**Figura 4**  
Circuito RLC.



a  $R$ ,  $L$  e  $C$  sono in serie e il circuito è alimentato da una tensione alternata.



b Corrente e tensione sono sfasati.

Applica definizioni e leggi a p. 12

**Il circuito serie RLC**

Nella  $\rightarrow$  figura 4a è schematizzato un circuito formato da un resistore di resistenza  $R$ , una bobina di induttanza  $L$  e un condensatore di capacità  $C$  disposti in serie (circuito serie RLC). Il circuito è alimentato da una tensione sinusoidale.

Quando l'interruttore è chiuso, su ogni elemento del circuito si stabilisce una tensione:  $V_R$  sul resistore,  $V_C$  sul condensatore,  $V_T$  sulla bobina. Queste tensioni sono variabili nel tempo, però in ogni istante la loro somma è uguale alla tensione fornita dal generatore.

Vale l'equazione:

$$V(t) = V_R(t) + V_C(t) + V_T(t)$$

In genere, in un circuito RLC corrente e tensione sono sfasate e lo sfasamento dipende, oltre che dai valori di  $R$ ,  $L$  e  $C$ , anche dalla frequenza della tensione [ $\rightarrow$  figura 4b].

Il rapporto fra la tensione massima e la massima intensità di corrente che percorre il circuito si chiama **impedenza** e si indica con la lettera  $Z$ :

$$Z = \frac{V_m}{i_m}$$

Si può dimostrare che l'impedenza si calcola con la formula:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

e ha le dimensioni di una resistenza; si misura in ohm.

**Valori efficaci di corrente e tensione**

Una corrente sinusoidale in una resistenza  $R$  sviluppa una potenza variabile:

$$P(t) = V(t) \cdot i(t)$$

Si può dimostrare che la potenza media dissipata per effetto Joule in un periodo vale:

$$P_{media} = \frac{1}{2} i_m^2 \cdot R$$

**ESEMPIO 2** Se in una resistenza di  $10 \Omega$  passa una corrente alternata di intensità massima  $1,5 \text{ A}$ , la potenza media dissipata in un periodo è:

$$P_{media} = \frac{1}{2} (1,5 \text{ A})^2 \times (10 \Omega) = 11,25 \text{ W}$$

Poiché la corrente alternata produce calore in una resistenza, come la corrente continua, possiamo definire un valore convenzionale, l'**intensità efficace**:

L'**intensità efficace** di una corrente alternata è quel valore di corrente continua che, passando in un conduttore, produce la stessa quantità di calore in uguale tempo.

Se la corrente è sinusoidale, il suo valore efficace, che indichiamo con  $i_{eff}$ , è legato al valore massimo  $i_m$  dalla relazione:

$$i_{eff} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

Anche la tensione efficace  $V_{eff}$  è legata al valore massimo  $V_m$  dalla relazione:

$$V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

I valori efficaci rendono possibile l'estensione delle leggi di Ohm al caso dei circuiti percorsi da corrente alternata. Per una resistenza  $R$  valgono le due relazioni:

$$V_{eff} = R \cdot i_{eff} \quad P = V_{eff} \cdot i_{eff} = R \cdot (i_{eff})^2$$

### ■ La causa delle correnti indotte

- 1 In un circuito chiuso circola una corrente indotta.
- ▶ Qual è la causa di questo tipo di corrente?
  - ▶ Descrivi, anche con un disegno, una situazione in cui è presente una corrente indotta.

### ■ La legge di Faraday-Neumann

- 2 **Vero o falso?** Le seguenti affermazioni si riferiscono alla d.d.p. indotta in un circuito.

a) Aumenta all'aumentare del tempo in cui viene prodotta.  V  F

b) È proporzionale al flusso del campo magnetico.  V  F

c) Aumentando l'intensità di  $\vec{B}$ , la d.d.p. aumenta.  V  F

d) La d.d.p. indotta è nulla solo se  $\vec{B}$  è nullo.  V  F

e) Si può misurare in Wb/s.  V  F

- 3 Una spira circolare, di diametro 20 cm e resistenza  $0,50 \Omega$ , si trova in un campo magnetico che varia di  $8,0 \times 10^{-2} \text{ T}$  al secondo. Il piano della spira è perpendicolare al campo magnetico.

▶ Calcola la d.d.p. indotta e la corrente indotta nella spira.

- 4 Una bobina è formata da 500 spire, ognuna del diametro di 20 cm; si trova dentro un campo magnetico uniforme  $B = 5,1 \times 10^{-5} \text{ T}$  e le linee del campo sono dirette lungo l'asse della bobina. La bobina viene estratta dalla zona del campo in  $1/100$  di secondo.

- ▶ Rappresenta la situazione con un disegno.
- ▶ Calcola la d.d.p. indotta nella bobina.
- ▶ Quanta corrente circola nella bobina se ha una resistenza di  $4 \Omega$ ?

### ■ La legge di Lenz

- 5 Una spira si muove verso un magnete rettilineo fermo. Nella spira si crea una corrente indotta che si oppone alla causa che la genera, cioè all'aumento di flusso magnetico.

▶ Rappresenta la situazione con un disegno nei due casi seguenti:

- a) il magnete presenta il polo sud verso la spira;
- b) il magnete presenta il polo nord verso la spira.

▶ In quale verso circola la corrente nei due casi?

▶ Se al posto della spira ci fosse una bobina, che cosa cambierebbe?

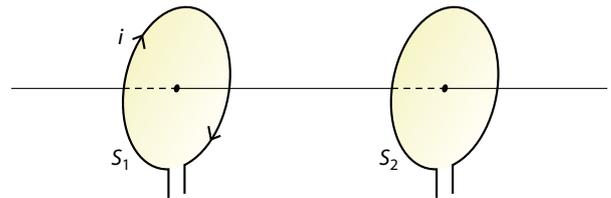
- 6 Per spingere un magnete dentro una bobina bisogna compiere un lavoro.

- ▶ Per quale motivo?
- ▶ Perché il lavoro è tanto maggiore quanto più grande è il numero di spire della bobina?

- 7 Lenz ha introdotto un segno meno nella legge di Faraday-Neumann.

- ▶ La presenza del segno meno significa che la tensione indotta è sempre negativa?
- ▶ Se nella legge non venisse introdotto il segno meno, quale principio fondamentale della fisica sarebbe violato?

- 8 Le due spire circolari della figura giacciono su piani paralleli e i loro centri sono sulla stessa retta. La spira  $S_1$  è percorsa da una corrente  $i$  in verso orario rispetto a un osservatore che guarda l'asse comune delle due spire da sinistra.



- ▶ Spiega che cosa succede nella spira  $S_2$  quando:

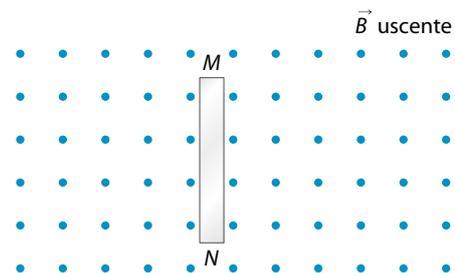
- a) la corrente  $i$  rimane costante;
- b) la corrente  $i$  aumenta;
- c) la corrente  $i$  diminuisce.

- 9 Al centro di una bobina di 500 spire, lunga 10 cm, perpendicolarmente al suo asse è posta una spira di superficie  $20 \text{ cm}^2$  e di resistenza  $0,50 \Omega$ . La corrente nella bobina passa da  $0,0 \text{ A}$  a  $2,0 \text{ A}$  in  $0,010 \text{ s}$ .

- ▶ Calcola la d.d.p. indotta nella spira.
- ▶ Calcola la corrente indotta nella spira.

### ■ La forza elettromotrice indotta

- 10 Una sbarra metallica di estremi  $M$  e  $N$  si muove dentro un campo magnetico uniforme uscente dal piano del foglio. La velocità della sbarra è perpendicolare alle linee del campo.



- ▶ Spiega che cosa succede nella sbarra nei due casi seguenti:

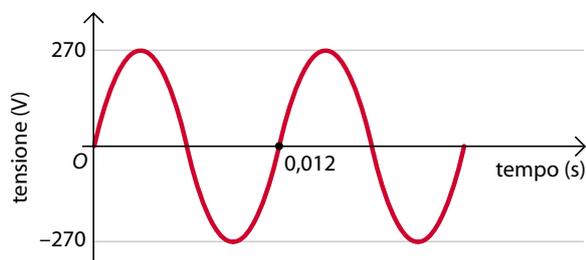
- a) si muove verso destra;
- b) si muove verso sinistra.



Altri problemi sulla **legge di Faraday-Neumann-Lenz** a fine unità, p. H 28

### ■ Corrente alternata in un resistore

- Un circuito è alimentato da un generatore di tensione alternata il cui massimo valore è 150 V e che ha frequenza  $1,0 \times 10^4$  Hz.
  - ▶ Calcola la pulsazione  $\omega$  della tensione.
  - ▶ Qual è l'espressione della tensione istantanea?
  - ▶ Il generatore è collegato a un resistore di 30  $\Omega$ . Quanto vale la corrente massima nel resistore?
- La corrente che circola in un circuito alimentato da una tensione alternata ha frequenza 200 Hz e valore massimo 1,5 A.
  - ▶ Con quale periodo oscilla la corrente? E la tensione?
  - ▶ Scrivi l'espressione della corrente istantanea.
- Nel grafico è riportata una tensione alternata.



- ▶ Quanto vale la tensione massima e quella minima?
- ▶ Qual è la frequenza della tensione?

### ■ Corrente alternata in una bobina

- Una bobina di induttanza 0,50 H è inserita in un circuito alimentato da una tensione alternata il cui valore massimo è 220 V e la cui frequenza è 50 Hz.
  - ▶ Calcola la corrente massima che circola nella bobina.
  - ▶ Rappresenta nello stesso grafico, in funzione del tempo, sia la tensione sia la corrente istantanea.
  - ▶ Cambiando la bobina, la corrente massima diventa 2,5 A. Calcola l'induttanza della nuova bobina.

### ■ Corrente alternata in un condensatore

- La corrente che circola in un condensatore di capacità 5,0  $\mu\text{F}$  ha il valore massimo di 2,0 A. La frequenza del generatore è 50 Hz.
  - ▶ Calcola la tensione massima che fornisce il generatore.
  - ▶ Disegna, nello stesso grafico, la corrente e la tensione in funzione del tempo.

### ■ Il circuito serie RLC

- Gli elementi di un circuito serie RLC sono i seguenti:  $R = 40 \Omega$ ,  $L = 16 \text{ mH}$ ,  $C = 0,1 \mu\text{F}$ . Il circuito è alimentato da un generatore di frequenza 50 Hz.
  - ▶ Calcola l'impedenza.
- Vero o falso?** Un circuito serie RLC è formato da una resistenza di 20  $\Omega$ , una bobina di induttanza 2,5 H, un

condensatore di capacità 3,0  $\mu\text{F}$ . Il circuito è alimentato da una tensione alternata che ha il valore massimo di 150 V e frequenza 50 Hz.

- La tensione ai capi della resistenza ha periodo 0,02 s.  V  F
- La somma delle tensioni ai capi del resistore, del condensatore e della bobina è 150 V.  V  F
- Le tensioni ai capi di ogni elemento sono sfasate.  V  F
- La corrente massima nel circuito è 8,7 mA.  V  F
- La frequenza della corrente nel circuito è 50 Hz.  V  F

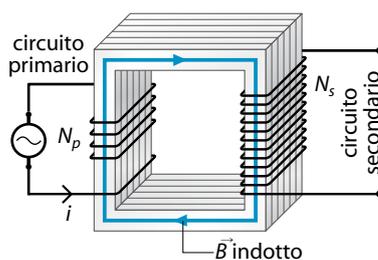
### ■ Valori efficaci di corrente e tensione

- A un conduttore di resistenza 100  $\Omega$  è applicata una tensione massima di 150 V.
  - ▶ Se la tensione massima viene dimezzata, come varia la corrente efficace?
- Una corrente alternata, di intensità efficace 10 A, circola in un conduttore di 50  $\Omega$ .
  - ▶ Calcola il valore massimo della corrente.
  - ▶ Qual è la tensione efficace ai capi del conduttore?
- Una tensione alternata di valore massimo 120 V, è applicata a un conduttore di resistenza 10  $\Omega$ .
  - ▶ Trova i valori efficaci di tensione e corrente.
- In Gran Bretagna il valore efficace della tensione è 230 V, negli Stati Uniti di 110 V.
  - ▶ Qual è il valore massimo della tensione in quei paesi?
- In una resistenza di 10  $\Omega$  passa una corrente continua di 2,0 A. Poi nella stessa resistenza si fa passare una corrente alternata di valore massimo 2,0 A.
  - ▶ Il calore che si produce per effetto Joule ha lo stesso valore nei due casi? Spiega.
- Una stufa elettrica viene alimentata da una tensione efficace di 220 V e fornisce una potenza di 1,0 kW.
  - ▶ Qual è la corrente massima che l'attraversa?
- Un generatore di tensione alternata è collegato a una resistenza di 50  $\Omega$ . La tensione massima presente ai morsetti del generatore è 300 V.
  - ▶ Calcola i valori efficaci della corrente e della tensione.
  - ▶ Qual è la potenza dissipata sulla resistenza?
- Su una lampadina c'è scritto: 60 W, 220 V.
  - ▶ Qual è la corrente efficace che attraversa la lampadina se viene collegata alla rete elettrica?
  - ▶ Qual è la resistenza della lampadina?



Altri problemi sui **circuiti in corrente alternata** a fine unità, p. H 30

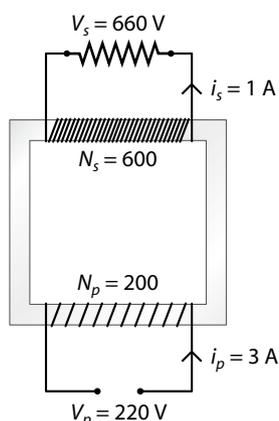
**Figura 1**  
Applicando una tensione variabile a una delle due bobine, per induzione si ottiene una tensione variabile anche ai capi dell'altra bobina.



### MATEMATICA

Date due uguaglianze, il rapporto fra i primi membri è uguale al rapporto fra i secondi membri.

**Figura 2**  
Il secondario è chiuso su una resistenza  $R$ ; il trasformatore eleva la tensione ma riduce la corrente.



## ■ Circuito primario e circuito secondario

Nella → figura 1 è disegnato un nucleo di ferro lamellare su cui sono avvolte due bobine con un numero differente di spire; il dispositivo si chiama **trasformatore** e permette di modificare la tensione alternata applicata a una delle due bobine.

Se esse hanno resistenza trascurabile, i due circuiti sono puramente induttivi.

La bobina di sinistra formata da  $N_p$  spire (il pedice  $p$  indica il *circuito primario*), è percorsa da una corrente alternata che crea un campo magnetico variabile. Le linee di flusso del campo, canalizzate dal ferro, attraversano le spire dell'altra bobina formata da  $N_s$  spire ( $s$  indica il *circuito secondario*). Per la legge di Faraday-Neumann, nel circuito secondario nasce una f.e.m. indotta con la stessa frequenza del primario.

## ■ Il rapporto di trasformazione

Sia  $V_p$  la tensione efficace agli estremi del circuito primario e  $V_s$  quella agli estremi del circuito secondario. Se il circuito secondario è aperto, cioè non circola corrente:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Il rapporto fra il numero di spire del secondario e quello del primario ( $N_s/N_p$ ) si chiama **rapporto di trasformazione** ed è un numero caratteristico di ogni trasformatore.

La tensione efficace ai capi del circuito secondario è:

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \cdot V_p$$

Pertanto, se  $N_s > N_p$  allora anche  $V_s > V_p$ ; in tal caso il trasformatore si dice **elevatore** di tensione. Il trasformatore della → figura 1 è un elevatore.

Viceversa, se  $N_s < N_p$  anche  $V_s < V_p$ , il trasformatore si dice **riduttore** di tensione.

**ESEMPIO 1** Il circuito primario è di 100 spire, il secondario di 1000 spire. Se applichiamo una d.d.p. di 220 V al primario, il trasformatore la fa aumentare di 10 volte; la d.d.p. indotta al secondario è:

$$V_s = \frac{V_p \cdot N_s}{N_p} = \frac{(220 \text{ V}) \times 1000}{100} = 2200 \text{ V}$$

## ■ Il rendimento e l'utilizzo del trasformatore

Se il circuito secondario è chiuso su un utilizzatore, in assenza di dispersioni di energia (trasformatore ideale), la potenza media fornita al primario ( $P_p$ ) è uguale alla potenza media disponibile sul circuito secondario ( $P_s$ ):

$$P_p = P_s \quad V_p \cdot i_p = V_s \cdot i_s$$

dove  $i_p$  e  $i_s$  sono i valori efficaci delle correnti.

Il prodotto fra la tensione efficace e la corrente efficace è identico per i due circuiti. Che cosa significa? Supponiamo che  $V_s$  sia maggiore di  $V_p$ , come nella → figura 2. Affinché i due prodotti siano uguali,  $i_s$  deve essere minore di  $i_p$ ; questo significa che se il trasformatore è un elevatore allora riduce il valore dell'intensità di corrente.

Se il trasformatore aumenta la tensione di un certo fattore, allora diminuisce la corrente dello stesso fattore.

**Figura 3**

Il lettore DVD utilizza una tensione di 12 V; collegato a una presa domestica necessita di un riduttore di tensione.



ILVA M&M/SHUTTERSTOCK

**METODO**

In altri dispositivi, come il fulmina-insetti, invece, sono necessarie migliaia di volt e quindi bisogna utilizzare un trasformatore elevatore.

**Figura 4**

Nel trasporto dell'energia elettrica a distanza si fa largo uso dei trasformatori sia per elevare la tensione sia per abbassarla.

In un trasformatore reale, però, la potenza  $P_s$  disponibile al secondario è sempre minore della potenza  $P_p$  fornita al primario. Il rapporto fra la potenza disponibile e quella fornita è il **rendimento** del trasformatore:

$$r = \frac{P_s}{P_p}$$

Il trasformatore è un dispositivo con un alto rendimento, in genere superiore al 90%.

**ESEMPIO 2** Un trasformatore con un rendimento del 92%, a cui viene fornita una potenza media di 10 W, fornisce al secondario una potenza media:

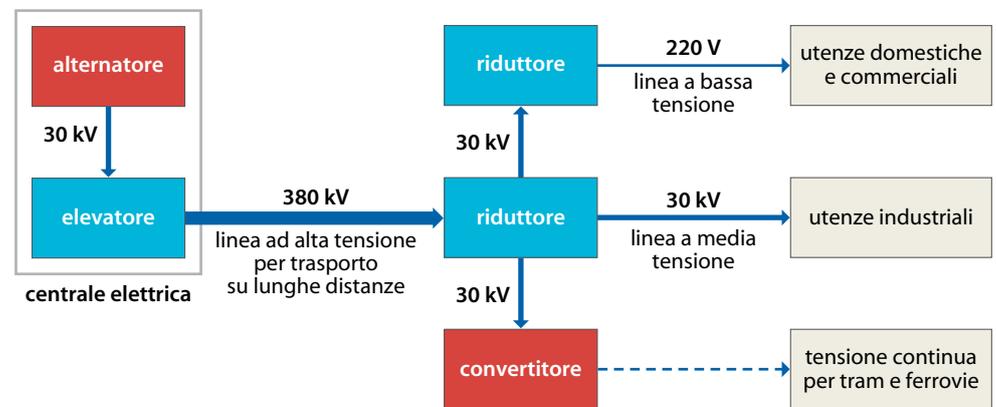
$$P_s = 0,92 \times (10 \text{ W}) = 9,2 \text{ W}$$

I trasformatori trovano largo impiego in molti dispositivi che per funzionare necessitano di tensioni diverse da 220 V. Nei dispositivi elettronici, come radio, registratori, computer, lettori DVD ecc. [→ figura 3] sono necessari alcuni volt per il funzionamento; essi vengono collegati alla rete mediante dei trasformatori riduttori.

### Il trasporto della corrente a distanza

I trasformatori sono indispensabili nel trasporto dell'energia elettrica a grandi distanze.

Per esempio, se in una centrale elettrica viene prodotta corrente con tensione di circa 30 000 V, mediante un trasformatore viene elevata a 380 000 V e trasportata a distanza con una linea ad alta tensione. In prossimità del luogo di utilizzo, la tensione viene abbassata a 30 000 V con un riduttore di tensione. Infine un terzo trasformatore riduce di nuovo la tensione alternata a 220 V [→ figura 4].



Perché si usano linee ad alta tensione? Per capirlo, calcoliamo le perdite di potenza lungo una linea. Supponiamo che un alternatore trasmetta a un utente 3 kW di potenza su una linea di trasmissione che ha una resistenza complessiva di 5 Ω.

Nella → tabella 1 confrontiamo la trasmissione con tensione di 220 V e 2200 V.

Tabella 1		
	I caso ( $\Delta V = 220 \text{ V}$ )	II caso ( $\Delta V = 2200 \text{ V}$ )
Corrente nella linea	$i = \frac{P}{\Delta V} = \frac{3000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 13,6 \text{ A}$	$i = \frac{3000 \text{ W}}{2200 \text{ V}} = 1,36 \text{ A}$
Perdita di potenza per effetto Joule	$P = R \cdot i^2 = 925 \text{ W}$	$P = R \cdot i^2 = 9,25 \text{ W}$
Perdita percentuale di potenza	$\frac{925 \text{ W}}{3000 \text{ W}} = 0,31$ ovvero 31%	$\frac{9,25 \text{ W}}{3000 \text{ W}} = 0,0031$ ovvero 0,31%

### ■ Circuito primario e circuito secondario

- 1** Nel circuito primario di un trasformatore passa una corrente alternata che crea un campo magnetico variabile.
- Come sono dirette le linee di questo campo magnetico?
  - Qual è la funzione del nucleo di ferro chiuso ad anello?
- 2** **Vero o falso?** Le frasi seguenti si riferiscono a un trasformatore.
- a) Il numero di spire delle due bobine che costituiscono un trasformatore è uguale.  V  F
- b) Se la corrente che circola nel primario è continua, anche nel secondario circola una corrente continua.  V  F
- c) Nel secondario viene indotta una f.e.m. che ha la stessa frequenza di quella del primario.  V  F

### ■ Il rapporto di trasformazione

- 3** Il circuito primario di un trasformatore ha 100 spire, quello secondario 200.
- Calcola il rapporto di trasformazione.
  - Di quale tipo di trasformatore si tratta?
  - Cosa succede se i due avvolgimenti hanno lo stesso numero di spire?
- 4** Considera un trasformatore così composto: una spira al primario e due al secondario. Al primario è applicata una d.d.p. alternata di 1,0 V.
- Qual è la tensione al secondario?
  - Per ottenere una tensione di 50 V, quante spire dovrebbe avere il circuito secondario?
- 5** Un trenino funziona con una d.d.p. alternata di 11 V. Mediante un trasformatore viene collegato alla tensione di rete (220 V).
- Qual è il rapporto di trasformazione del trasformatore?
  - Se il secondario è composto da 400 spire, quante sono le spire del primario?
- 6** Un tubo al neon funziona con una tensione di 10 kV. È collegato alla rete elettrica (220 V) mediante un trasformatore.
- È un trasformatore riduttore o un elevatore?
  - Qual è il rapporto di trasformazione?
- 7** Un trasformatore elevatore ha un rapporto di trasformazione uguale a 19. Al primario c'è una tensione efficace di 20 kV.
- Qual è la tensione efficace al secondario?
  - Se il primario è composto da 500 spire, quante spire ci sono al secondario?

- 8** La tensione agli estremi del circuito secondario di un trasformatore è 10 volte più grande di quella agli estremi del primario.
- Calcola il rapporto di trasformazione.

### ■ Il rendimento e l'utilizzo del trasformatore

- 9** Un trasformatore ha un rendimento del 97%. Al circuito primario è applicata una tensione di 50 V che fa circolare una corrente di 2 A. Il rapporto di trasformazione vale 2.
- Qual è la potenza disponibile al secondario?
  - Quale corrente arriva al secondario?
- 10** Un trasformatore ha 200 spire al primario e 400 al secondario. Al primario è applicata una tensione di 50 V. Il secondario è collegato a un utilizzatore che ha una resistenza di 40  $\Omega$ .
- Qual è la tensione in uscita al secondario?
  - Quale corrente passa nell'utilizzatore?
  - Quale intensità di corrente è assorbita dal circuito primario?

### ■ Il trasporto della corrente a distanza

- 11** Un trasformatore aumenta la tensione in uscita da un alternatore di un fattore 10, per inviarla lungo una linea di trasmissione.
- Di quanto riduce la corrente efficace che invia sulla linea?
  - Di quanto riduce la perdita di potenza?
- 12** Una potenza di 500 kW deve essere trasmessa su una linea di resistenza 20  $\Omega$ .
- Conviene trasmettere la corrente con una tensione di 10 kV o 100 kV? Spiega.
  - Confronta le perdite di potenza per effetto Joule nei due casi.
- 13** Da una cabina di trasformazione di una centrale elettrica arrivano a un'abitazione 4,5 kW, su una linea di trasmissione che ha una resistenza di 3,0  $\Omega$ . La trasmissione avviene con una tensione efficace di 220 V.
- Calcola la corrente efficace che passa sulla linea di trasmissione.
  - Verifica che, in queste condizioni, quasi un terzo della potenza trasmessa si perde per effetto Joule.
  - Cosa si può fare per ridurre le perdite di potenza?
- 14** Una linea di trasmissione ha una resistenza di  $3,0 \times 10^{-2} \Omega$  per ogni kilometro. Una centrale elettrica trasmette 100 kW con una tensione efficace di 4000 V, a un'industria posta a 10 km di distanza dalla centrale.
- Qual è la corrente sulla linea?
  - Qual è la perdita di potenza per effetto Joule?
  - Qual è la perdita percentuale di potenza?



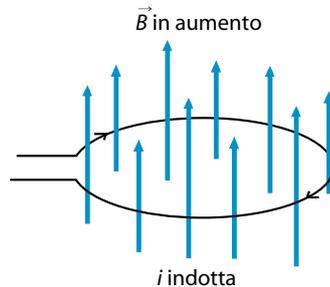
Altri problemi sul **trasformatore** a fine unità, p. 29

## Campi variabili

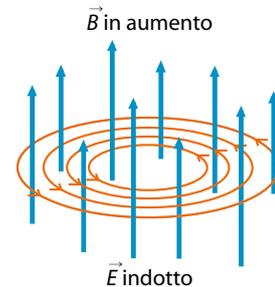
Consideriamo un campo magnetico variabile (in aumento) diretto come nella  $\rightarrow$  figura 1a. Per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, la spira dentro al campo viene percorsa da una corrente indotta in senso orario; perciò è presente anche un campo elettrico indotto che fa muovere le cariche elettriche nella spira. Le linee di forza di questo campo sono perpendicolari a quelle del campo  $\vec{B}$  ( $\rightarrow$  figura 1b). Il risultato è che:

Un campo magnetico variabile crea un campo elettrico indotto le cui linee di forza sono chiuse attorno alle linee del campo magnetico che l'ha prodotto.

**Figura 1**  
Campo elettrico indotto.



**a** Il campo magnetico in aumento produce una corrente indotta nella spira.



**b** Nella spira si crea una corrente indotta e quindi un campo elettrico indotto.

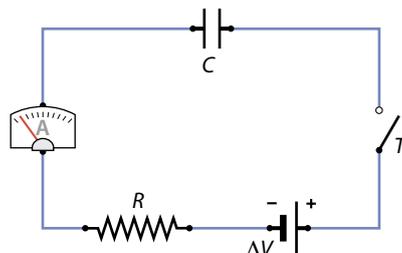
Nella  $\rightarrow$  figura 2a un condensatore è collegato a un generatore. Quando si chiude l'interruttore, l'amperometro segna un passaggio di corrente finché dura la carica del condensatore. Come può circolare la corrente dal momento che fra le armature del condensatore c'è un isolante?

Mentre il condensatore si carica, la quantità di carica sulle armature cambia nel tempo, quindi anche il campo elettrico fra le armature cambia. Questo cambiamento produce una corrente variabile che si chiama **corrente di spostamento**, che a sua volta produce un campo magnetico indotto ( $\rightarrow$  figura 2b). Ne deriva che:

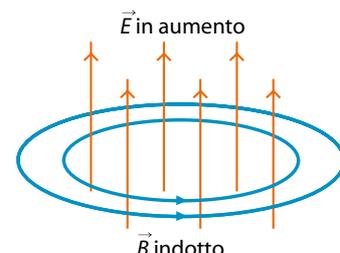
Una variazione del campo elettrico produce nello spazio circostante un campo magnetico indotto, le cui linee sono chiuse attorno al campo elettrico che l'ha generato.

Se al posto del generatore di d.d.p. continua inseriamo nel circuito un alternatore, la corrente di spostamento dura nel tempo.

**Figura 2**  
Corrente di spostamento.



**a** Un condensatore è in serie a una resistenza  $R$ . Se si chiude  $T$ , nel condensatore circola per breve tempo una corrente.



**b** Chiudendo l'interruttore, il campo elettrico aumenta e provoca la corrente di spostamento dentro al condensatore. Il campo magnetico generato da questa corrente ha le linee chiuse attorno al campo elettrico.

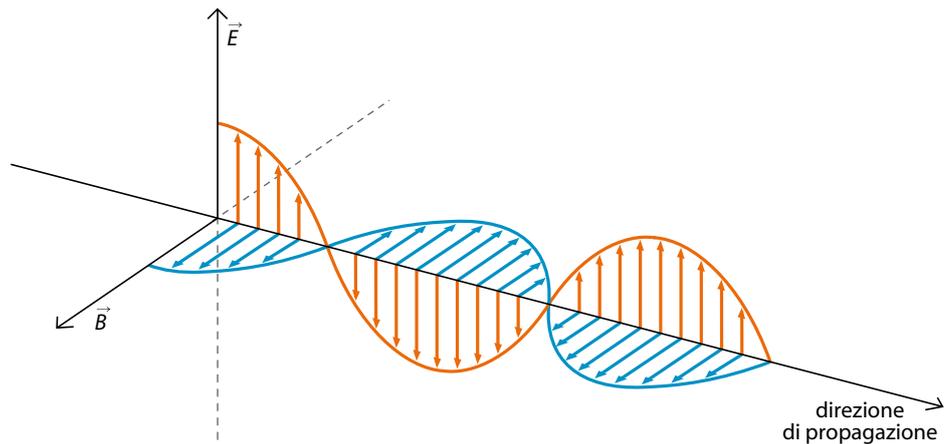
## ■ Il campo elettromagnetico

Riepiloghiamo i due fatti importanti descritti. La variazione del campo magnetico genera un campo elettrico, anch'esso variabile; la variazione del campo elettrico genera un campo magnetico variabile. In entrambi i casi, nella stessa regione dello spazio, sono presenti due campi variabili, uno magnetico e l'altro elettrico, cioè un **campo elettromagnetico**, che si propaga nello spazio [→ figura 3].

Il campo elettromagnetico si propaga come un'onda trasversale (**onda elettromagnetica**); la direzione di propagazione è perpendicolare sia al vettore  $\vec{E}$ , sia al vettore  $\vec{B}$ .

### Figura 3

Il campo elettrico  $\vec{E}$  e il campo magnetico  $\vec{B}$  sono perpendicolari fra loro e oscillano entrambi mentre si propagano.



### RICHIAMO

Velocità della luce nel vuoto:  
 $c = 3,0 \times 10^8$  m/s.

James Clerk Maxwell (1831-1879) dimostrò per via teorica che il campo elettromagnetico si propaga nel vuoto con una velocità di  $3 \times 10^8$  m/s. La velocità prevista teoricamente da Maxwell era uguale a quella, allora già nota, della luce nel vuoto. Da questo fatto nacque l'ipotesi della natura elettromagnetica della luce.

La verifica sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche si ebbe nel 1888, nove anni dopo la morte di Maxwell, ad opera di Heinrich Hertz che riuscì a produrre e rivelare le onde elettromagnetiche.

## ■ Le proprietà delle onde elettromagnetiche

Le grandezze che caratterizzano un'onda elettromagnetica (o campo elettromagnetico) sono quelle tipiche dei fenomeni ondulatori: lunghezza d'onda  $\lambda$ , frequenza  $f$  e velocità di propagazione  $v$ , legate dalla relazione:

$$\lambda \cdot f = v$$

Riassumiamo le proprietà delle onde elettromagnetiche:

- ogni onda è costituita da un campo elettrico e un campo magnetico, entrambi variabili con la stessa frequenza;
- le onde elettromagnetiche sono trasversali: i vettori  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono sempre perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda;
- al contrario delle onde meccaniche, le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto;
- in un mezzo omogeneo, le onde si propagano in linea retta e con velocità costante;
- la velocità di un'onda elettromagnetica nel vuoto è uguale a quella della luce, mentre in un mezzo è minore;
- come tutte le onde, anche quelle elettromagnetiche mentre si propagano trasportano energia;
- le onde elettromagnetiche subiscono gli stessi fenomeni delle onde luminose: riflessione, rifrazione, diffrazione e interferenza.

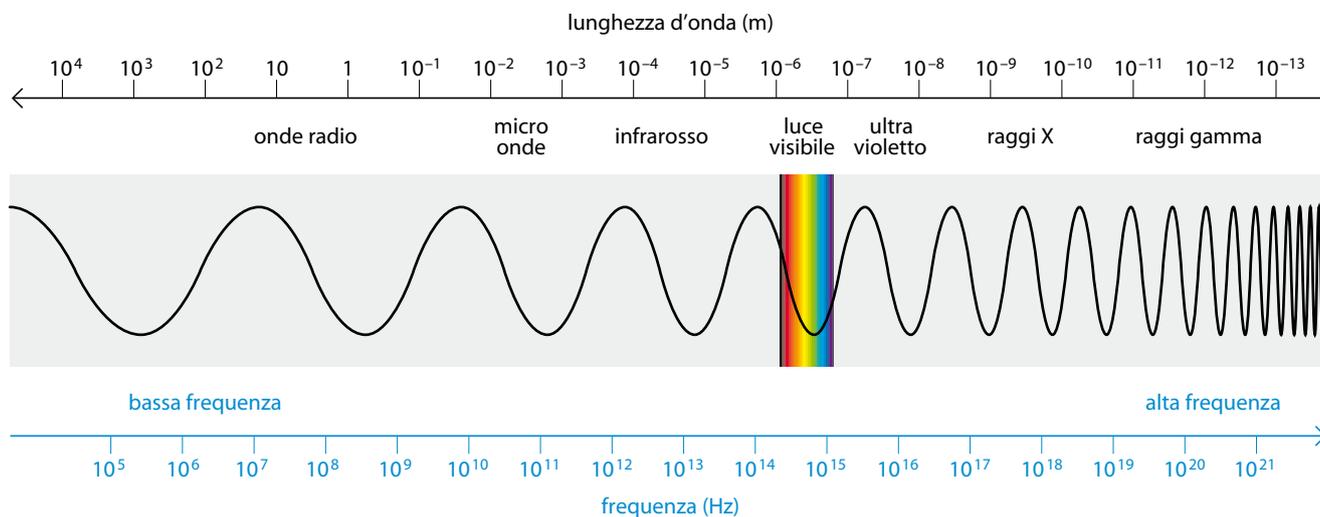


online.zanichelli.it/ruffo\_fisica

**1 FILM E 3 TEST**  
**Onde elettromagnetiche**  
Spettro elettromagnetico

## Lo spettro elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche coprono una vasta gamma di frequenze, che formano lo **spettro elettromagnetico**. Lo spettro è suddiviso in regioni (→ figura 4): onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X, raggi gamma.



**Figura 4**  
Spettro delle onde elettromagnetiche.

La classificazione non è ben definita perché zone adiacenti nello spettro si sovrappongono parzialmente.

- **Onde radio** ( $10^6 \text{ Hz} < f < 10^9 \text{ Hz}$ ). Sono prodotte in vario modo; in particolare mediante elettroni accelerati o correnti alternate che circolano in antenne metalliche. Radio e televisori utilizzano per le trasmissioni le onde elettromagnetiche che hanno le frequenze più basse, quindi le lunghezze d'onda più alte.
- **Microonde** ( $10^9 \text{ Hz} < f < 10^{12} \text{ Hz}$ ). Sono prodotte mediante circuiti elettronici. Due applicazioni molto comuni delle microonde sono le comunicazioni a distanza e il forno a microonde.
- **Infrarosso** ( $10^{12} \text{ Hz} < f < 4,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ). Le onde infrarosse sono prodotte dalla rotazione e vibrazione delle molecole. Quando sono assorbite dai corpi, producono calore e quindi aumento di temperatura. In ambiente domestico, utilizziamo le onde infrarosse quando usiamo un telecomando.
- **Luce visibile** ( $4,0 \times 10^{14} \text{ Hz} < f < 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ). I nostri occhi sono sensibili solo a una piccola parte dell'intero spettro elettromagnetico, detta regione del visibile.
- **Ultravioletto** ( $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz} < f < 10^{17} \text{ Hz}$ ). Le onde ultraviolette provengono dal Sole e la maggior parte è assorbita dall'ozono presente nell'atmosfera terrestre. Non sono visibili, ma possiamo notare i loro effetti sulla pelle, perché favoriscono la produzione di melatonina, un pigmento che colora la pelle e provoca abbronzatura.
- **Raggi X** ( $10^{17} \text{ Hz} < f < 10^{20} \text{ Hz}$ ). Possono essere prodotti facendo urtare elettroni molto veloci contro una lastra metallica, per esempio di tungsteno. Questi raggi attraversano facilmente il corpo umano perché sono assorbiti poco dai tessuti molli e dalla pelle. Non sono assorbiti dai materiali densi, come le ossa e i denti perciò sono usati per fare radiografie del corpo umano.
- **Raggi gamma** ( $f > 10^{20} \text{ Hz}$ ). Sono prodotti nelle reazioni nucleari, nei grandi acceleratori di particelle o spontaneamente dai nuclei radioattivi. Sono raggi che trasportano molta energia e quindi hanno un forte potere penetrante. Distruggono le cellule viventi e per questo motivo sono utilizzati per bruciare le cellule tumorali. Sono anche usati per sterilizzare strumenti chirurgici.



online.zanichelli.it/ruffo\_fisica

**TECNOLOGIA**  
**I raggi X in medicina,**  
1 pagina

**TECNOLOGIA**  
**Il forno a microonde,**  
1 pagina

### ■ Campi variabili

- Un campo magnetico variabile crea un campo elettrico indotto in una spira chiusa.
  - Come sono dirette le linee di questo campo indotto?
- In un circuito è presente un condensatore, un generatore di corrente continua, una resistenza in serie al condensatore e un interruttore. Chiudendo l'interruttore, nel circuito circola per brevissimo tempo una corrente elettrica.
  - Come si chiama questa corrente?
  - Che cosa bisognerebbe fare per far circolare la corrente anche per tempi lunghi?

### ■ Il campo elettromagnetico

- La variazione del campo magnetico genera un campo elettrico variabile.
  - Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico?
  - Che cos'è un campo elettromagnetico?
- Una corrente continua genera nello spazio circostante un campo magnetico. Anche una corrente alternata genera nello spazio circostante un campo magnetico.
  - Qual è la differenza tra i due campi?
- Vero o falso?**
  - Il campo elettromagnetico è la somma di un campo elettrico e di un campo magnetico.  V  F
  - Il campo elettromagnetico è la somma vettoriale di un campo elettrico e di un campo magnetico.  V  F
  - Il campo elettromagnetico si propaga come un'onda la cui direzione di propagazione è perpendicolare al vettore  $\vec{B}$  e al vettore  $\vec{E}$ .  V  F

### ■ Le proprietà delle onde elettromagnetiche

- Vero o falso?**
  - La frequenza e la lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica sono direttamente proporzionali.  V  F
  - La frequenza di un'onda elettromagnetica che si propaga in mezzi diversi varia.  V  F
  - La velocità di un'onda elettromagnetica è sempre uguale a quella della luce.  V  F
  - La frequenza del campo elettrico e magnetico variabili che costituiscono l'onda elettromagnetica è la stessa.  V  F
  - Le onde elettromagnetiche trasportano energia.  V  F
- Un'onda elettromagnetica ha una frequenza di  $8,0 \times 10^{14}$  Hz.
  - Qual è la sua lunghezza d'onda nel vuoto?
  - In un mezzo in cui l'onda si propaga con velocità di

$2,4 \times 10^8$  m/s, la lunghezza d'onda è maggiore, minore o uguale a quella calcolata nella domanda precedente?

- E la frequenza nel mezzo è la stessa o cambia?

### ■ Lo spettro elettromagnetico

- La frequenza delle onde radio corte va da 3,0 MHz a 30 MHz.
  - Qual è la loro velocità di propagazione?
  - A quale frequenza corrisponde la maggiore lunghezza d'onda?
  - Calcola le lunghezze d'onda corrispondenti.
- Due canali radio trasmettono con frequenze leggermente diverse: 800 kHz e 810 kHz.
  - Calcola la differenza fra le lunghezze d'onda.
- Considera una luce blu di lunghezza d'onda 450 nm ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ) e una luce gialla di 580 nm.
  - Calcola le rispettive frequenze.
- Le comunicazioni tra astronauti e Terra avvengono mediante onde elettromagnetiche.
  - Quanto tempo impiega ad arrivare un segnale lanciato da uno Shuttle in orbita a 250 km dalla Terra?
- Un'onda elettromagnetica ha una lunghezza d'onda di  $5,0 \times 10^{-5} \text{ m}$  nel vuoto e di  $4,0 \times 10^{-5}$  in un altro mezzo.
  - Qual è la frequenza dell'onda elettromagnetica?
  - Calcola la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo.
- I telefoni cellulari ricevono ed emettono onde radio in una certa banda di frequenze. Supponi che la banda del tuo cellulare sia compresa tra 908,350 MHz e 908,375 MHz.



PANASONIC

- In quale intervallo sono comprese le lunghezze d'onda del cellulare?
- Tutte le emittenti televisive, tranne Raiuno, trasmettono nella banda compresa fra 470 MHz e 850 MHz.
    - In quale intervallo sono comprese le lunghezze d'onda utilizzate?
    - Con quale velocità si propagano le onde elettromagnetiche comprese in quella banda?



Altri problemi sulle **onde elettromagnetiche** a fine unità, p. 31



### La corrente indotta

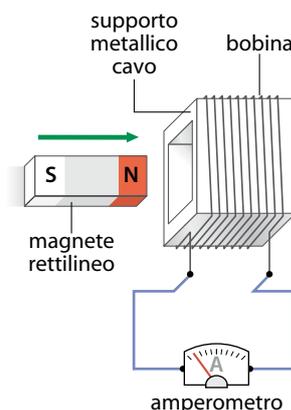
► È possibile studiare sperimentalmente il fenomeno dell'induzione elettromagnetica?

#### Il problema

La legge di Faraday-Neumann prevede che la variazione del flusso del campo magnetico attraverso un circuito chiuso faccia circolare nel circuito una corrente indotta, la cui intensità è direttamente proporzionale alla velocità con la quale varia il flusso. Come possiamo mettere in evidenza sperimentalmente questa corrente indotta e collegarla alla variazione di un flusso magnetico?

#### Una strategia

Poiché il flusso magnetico è proporzionale al numero delle spire, in questa esperienza usiamo una bobina con un numero elevato di spire, per rendere più evidente l'effetto dell'induzione elettromagnetica. La bobina è avvolta su una struttura metallica, che ha anch'essa l'effetto di aumentare il flusso. Usiamo poi un magnete rettilineo abbastanza sottile da poter scorrere all'interno del supporto metallico sul quale è avvolta la bobina. Gli estremi dell'avvolgimento elettrico che forma la bobina sono collegati a un amperometro che ci permette di misurare la corrente che passa nella bobina [→ figura].



Il nostro apparato non ci permette di fare delle misure quantitative, ma è sufficiente a farci apprezzare gli aspetti principali previsti dalla legge di Faraday-Neumann e dalla legge di Lenz. Se introduciamo il magnete nel supporto, osserviamo che l'amperometro indica il passaggio di una corrente. Si tratta appunto della corrente indotta. Cosa ci aspettiamo che succeda ora se estraiamo il magnete dal supporto?

Se la variazione del flusso provocata dal magnete quando lo inseriamo nella bobina ha un determinato segno e produce di conseguenza una corrente indotta orientata in un certo modo, quando estraiamo il magnete la variazione del flusso e quindi la corrente avranno il verso opposto. In effetti, estraendo il magnete osserviamo che l'indicazione dell'amperometro cambia segno.

Che cosa succede se muoviamo il magnete più o meno velocemente?

Se il magnete si muove velocemente, anche la variazione del flusso avviene più velocemente. Di conseguenza osserviamo una corrente più intensa. Osserviamo invece una corrente più debole se muoviamo il magnete lentamente.

Un'altra possibilità interessante è quella di muovere il magnete dopo averlo ruotato, invertendo così la posizione dei poli rispetto alla bobina. Sei in grado di prevedere che cosa accade in questo caso?

## Riassumendo

### Osservazioni

- La corrente cambia verso quando il magnete inverte il moto.
- La corrente è più intensa se il magnete si muove velocemente, e meno intensa se si muove lentamente.
- La corrente cambia verso se invertiamo i poli del magnete.

### Interpretazioni

- Introducendo o estraendo il magnete cambia il segno della variazione di flusso che induce la tensione e quindi cambia anche la corrente nella bobina.
- Invertendo il magnete cambiamo il segno del campo magnetico attraverso la bobina e quindi il segno del flusso magnetico.

## Le misure

Possiamo eseguire una serie di osservazioni, muovendo il magnete in un senso o nell'altro, orientandolo in un verso o nell'altro, e muovendolo più o meno velocemente.

- Riassumiamo le nostre osservazioni in una tabella:

	... cambia il verso della corrente?	... cambia l'intensità della corrente?
Se muoviamo il magnete in un verso oppure nell'altro...	sì	no
Se orientiamo il magnete in un modo oppure nell'altro...	sì	no
Se muoviamo il magnete più o meno velocemente...	no	sì

Prova a ripetere l'esperienza usando un voltmetro invece di un amperometro, e quindi misurando la tensione indotta.

- Riassumi le tue osservazioni in una tabella:

	... cambia il verso della tensione?	... cambia l'intensità della tensione?
Se muoviamo il magnete in un verso oppure nell'altro...		
Se orientiamo il magnete in un modo oppure nell'altro...		
Se muoviamo il magnete più o meno velocemente...		

## Domande

- ▶ Che cosa succede se usiamo una bobina con un numero diverso di spire?
- ▶ Cosa ti aspetti di osservare se disponi il supporto verticalmente e fai in modo che il magnete cada attraverso la bobina?



## Per collegare le idee

### ► Come si calcola il flusso del campo magnetico?

- Il flusso di  $\vec{B}$  attraverso una bobina di  $N$  spire, ognuna di area  $A$ , si calcola con la formula:

$$\Phi(B) = N \cdot A \cdot B_{\perp}$$

dove  $B_{\perp}$  dipende dall'angolo che il campo forma con l'asse della bobina.

- Il flusso si misura in weber (Wb).

### ► Perché sono importanti le variazioni di flusso attraverso un circuito?

- Le variazioni di flusso, attraverso una spira o una bobina, sono importanti perché danno origine a tensioni indotte.
- Poiché  $B_{\perp} = B \cdot \cos\alpha$ , il flusso attraverso la superficie di area  $A$  cambia se si modifica il valore di  $B$  oppure l'angolo  $\alpha$  oppure l'area  $A$ .

### ► A che cosa serve la legge di Faraday-Neumann?

- La legge permette di calcolare la tensione indotta in un circuito nell'intervallo di tempo  $t$ , quando il flusso varia di  $\Delta\Phi$ :

$$\Delta V_{indotta} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

- Se il circuito è chiuso, la tensione indotta fa circolare una corrente indotta di intensità:

$$i_{indotta} = \frac{\Delta V_{indotta}}{R}$$

### ► Che cosa dice la legge di Lenz?

- La legge di Lenz stabilisce che il verso della corrente indotta è tale da opporsi alla variazione di flusso magnetico che l'ha generata.

### ► Che cos'è il valore efficace della corrente?

- È un valore convenzionale inferiore a quello massimo. Viene definito facendo riferimento all'effetto

Joule, presente sia nei circuiti in corrente continua che in quelli a corrente alternata.

- Il valore efficace della corrente elettrica è legato alla corrente massima dalla relazione:

$$i_{eff} = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$$

### ► Qual è la funzione di un trasformatore?

- Il trasformatore permette di cambiare la tensione alternata applicata al circuito primario; può aumentare o diminuire la tensione a seconda del rapporto di trasformazione.

### ► Perché le linee di trasmissione dell'energia elettrica sono ad alta tensione?

- La corrente viene inviata su cavi metallici, che si scaldano per effetto joule. La quantità di calore prodotta fa diminuire la potenza trasmessa verso l'utenza. La potenza persa ( $P = R \cdot i_{eff}^2$ ) dipende sia dalla resistenza della linea sia dalla corrente. Quindi, per diminuire le perdite bisogna diminuire la corrente; si può fare mediante un trasformatore che, diminuendo l'intensità di corrente, aumenta la tensione di trasporto.

### ► Che cos'è un'onda elettromagnetica?

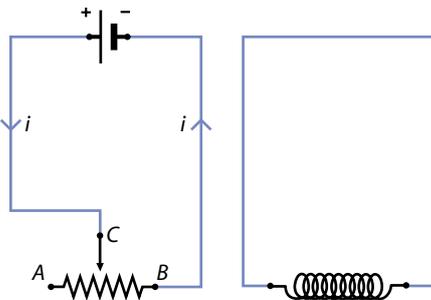
- Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali formate da un campo elettrico e un campo magnetico oscillanti perpendicolari fra loro. I due campi oscillano con la stessa frequenza e sono entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.
- Nel vuoto, le onde elettromagnetiche si propagano con la velocità della luce; nei mezzi, la velocità di propagazione è minore e dipende dalle caratteristiche del mezzo.
- Come tutte le onde, anche quelle elettromagnetiche mentre si propagano trasportano energia.



Test e quesiti

■ Test

- 1 Il weber è l'unità di misura del flusso del campo magnetico nel SI. A quale unità di misura corrisponde il weber?  
 A  $N \cdot A/m^2$                        C  $N/A \cdot m$   
 B  $N \cdot m/A$                          D  $N/A$
- 2 Le linee del campo prodotto da un magnete rettilineo attraversano una bobina. In quali dei seguenti casi non varia il flusso del campo attraverso la bobina?  
 A Il magnete si allontana o si avvicina alla bobina.  
 B La bobina ruota in verso orario rispetto al magnete che sta fermo.  
 C La bobina ruota in verso antiorario.  
 D Magnete e bobina si muovono nello stesso verso con la stessa velocità.
- 3 Da che cosa sono prodotte le correnti indotte?  
 A Dal flusso di  $\vec{B}$  attraverso un circuito indotto.  
 B Dalla variazione di flusso magnetico attraverso un circuito chiuso.  
 C Dalla forza di Lorentz su un conduttore mobile.  
 D Da campi molto intensi che si creano nelle bobine.
- 4 Nel circuito di sinistra circola una corrente che dipende dalla posizione del cursore C. In quello di destra non circola corrente. Il cursore C del reostato viene spostato verso destra. Quale delle affermazioni è falsa?



- A La corrente nel reostato aumenta e quindi aumenta il campo magnetico prodotto dalla corrente.
  - B Il flusso attraverso le spire del solenoide aumenta.
  - C Nel solenoide circola una corrente indotta.
  - D I due circuiti si attraggono.
- 5 A quale delle seguenti grandezze è direttamente proporzionale l'induttanza di una bobina?  
 A Al raggio delle spire.     B Al numero di spire.  
 C All'area di ogni spira.  
 D Alla lunghezza della bobina.
  - 6 Quando la corrente che attraversa una bobina subisce un cambiamento, la tensione autoindotta nella bobina:

- A è sempre positiva;     B è sempre negativa;
- C può essere nulla;
- D può essere positiva o negativa.

- 7 Che cosa succede se, in un circuito in cui circola una corrente alternata, viene modificata la frequenza del generatore?  
 A La corrente diminuisce.  
 B La corrente non varia.  
 C La corrente aumenta.  
 D Non ci sono elementi sufficienti per rispondere.
- 8 Una corrente alternata ha un valore massimo di 2,82 A. Qual è il suo valore efficace?  
 A 0 A     B 2,82 A     C 1,41 A     D 2 A
- 9 Che cosa «trasforma» il trasformatore?  
 A La potenza elettrica.     B L'energia elettrica.  
 C La tensione elettrica.     D Il campo magnetico.
- 10 Le frasi seguenti sono riferite a un trasformatore riduttore. Una sola è corretta. Quale?  
 A Aumenta la corrente e diminuisce la tensione.  
 B Aumenta sia la corrente sia la tensione.  
 C La potenza disponibile al secondario è maggiore di quella assorbita al primario.  
 D Ha più spire al secondario che al primario.
- 11 Perché nelle abitazioni conviene inviare una bassa tensione?  
 A Perché costa di meno.  
 B Perché è più facile da trasportare.  
 C Per questioni di sicurezza.  
 D Perché fa consumare di meno.

■ Quesiti

- 12 In che modo può essere variato il flusso del campo magnetico che attraversa una spira?
- 13 Una tensione indotta si può ottenere semplicemente aprendo o chiudendo un circuito?
- 14 In base a quale principio si può giustificare il segno meno che compare nella legge di Lenz?
- 15 In un circuito a corrente alternata, da che cosa dipendono tensione efficace e corrente efficace?
- 16 Perché è più conveniente, nella trasmissione a distanza, utilizzare delle tensioni elevate?



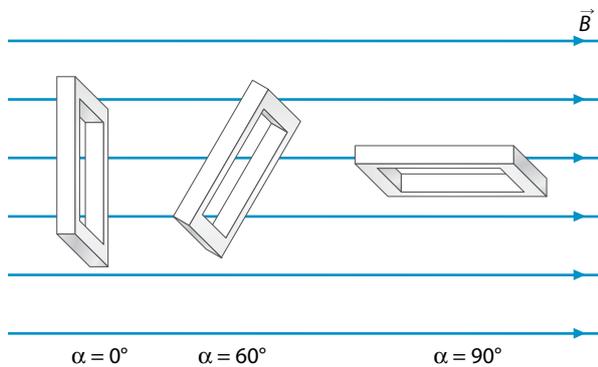
online.zanichelli.it/ruffo\_fisica  
**TEST INTERATTIVI**, 30 minuti (20 test)  
**TEST E QUESITI**, 1 pagina

## Saper applicare la legge di Faraday-Neumann-Lenz

### ► Come calcolare il flusso del campo magnetico attraverso una spira o una bobina

- Il flusso attraverso una spira è il prodotto tra la componente del campo perpendicolare al piano della spira e l'area della spira stessa:  $\Phi(B) = B_{\perp} \cdot A$ ;
- Il valore di  $B_{\perp}$  dipende dall'angolo  $\alpha$  che il campo forma con la normale al piano della spira:  $B_{\perp} = B \cdot \cos\alpha$ .
- Per una bobina di  $N$  spire:  $\Phi(B) = N \cdot B_{\perp} \cdot A$ .

1 Nella figura si vedono dall'alto tre spire quadrate uguali, poste nello stesso campo magnetico  $B = 0,5 \text{ T}$ .



- Senza fare calcoli puoi dire in quale spira il flusso del campo è massimo e in quale è minimo?
- Supponi che l'area di ogni spira sia  $20 \text{ cm}^2$ ; verifica le tue risposte calcolando il flusso del campo nelle tre spire.

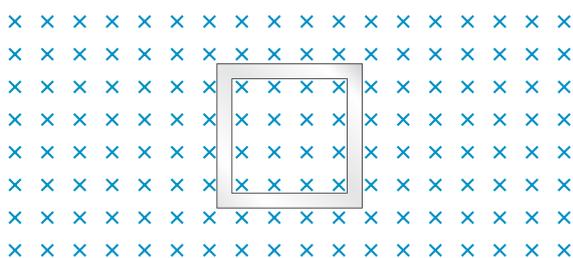
[ $1,0 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ ;  $0,5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ ;  $0 \text{ Wb}$ ]

2 Una spira circolare di raggio  $4,0 \text{ cm}$  è perpendicolare a un campo magnetico uniforme di  $0,20 \text{ T}$ .

- Quanto vale il flusso magnetico?
- Di quanto cambia il flusso se al posto della spira si sostituisce una bobina formata da 100 spire circolari dello stesso raggio?

[ $1,0 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ ;  $1,0 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ]

3 Una bobina quadrata di lato  $10 \text{ cm}$ , formata da 40 spire, è posta dentro un campo magnetico uniforme di  $0,40 \text{ T}$ , come nella figura. Il campo è entrante nel piano della pagina.



- Quanto vale il flusso del campo magnetico attraverso la bobina?
- Se la bobina ruota in senso antiorario di  $45^\circ$ , quanto vale il flusso nella nuova posizione?
- E se la bobina ruotasse dello stesso angolo in senso orario?

[ $0,16 \text{ Wb}$ ;  $0,11 \text{ Wb}$ ;  $0,11 \text{ Wb}$ ]

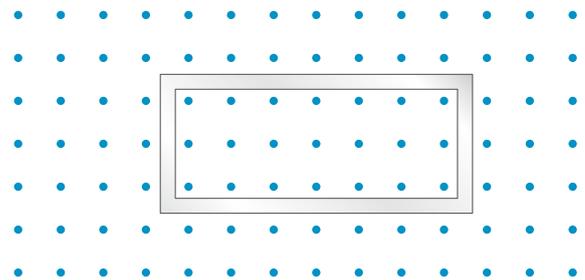
### ► Come calcolare le variazioni di flusso magnetico

- Individuare un istante iniziale  $t_1$  e un istante finale  $t_2$  e calcolare il flusso iniziale  $\Phi_1(B)$  e quello finale  $\Phi_2(B)$ .
- Calcolare la variazione del flusso fra i due istanti:  $\Delta\Phi = \Phi_2(B) - \Phi_1(B)$ .

4 Il flusso del campo magnetico attraverso una semplice spira, oppure una bobina o un circuito può variare nel tempo.

- Può solo aumentare o anche diminuire?
- Descrivi qualche metodo per far variare il flusso magnetico.

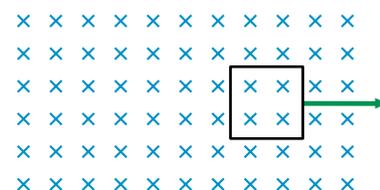
5 Una bobina rettangolare di lati  $4,0 \text{ cm}$  e  $9,0 \text{ cm}$ , è formata da 20 spire ed è posta dentro un campo magnetico uniforme di  $0,50 \text{ T}$ , come nella figura. Il campo è uscente dal piano della pagina.



- Qual è il flusso magnetico attraverso la bobina?
- Calcola la variazione del flusso quando la bobina ruota in senso antiorario di  $60^\circ$ .

[ $0,036 \text{ Wb}$ ;  $-0,018 \text{ Wb}$ ]

6 Una spira quadrata di area  $10 \text{ cm}^2$  è perpendicolare a un campo magnetico uniforme  $B = 0,1 \text{ T}$ . Supponi che essa venga estratta velocemente dal campo e portata in una zona in cui il campo è assente.



- Di quanto varia il flusso del campo magnetico attraverso la spira?
- Se la spira fosse rettangolare o circolare ma sempre di area  $10 \text{ cm}^2$ , la variazione del flusso sarebbe diversa da quella calcolata?

[ $-1,0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ]

► **Come calcolare una d.d.p. e una corrente indotta**

- La d.d.p. (o tensione) indotta in un circuito è uguale al rapporto tra la variazione di flusso magnetico e l'intervallo di tempo in cui avviene:

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

- La presenza del segno meno significa che la d.d.p. indotta si oppone sempre alla causa che l'ha generata, cioè alla variazione di flusso.
- Se  $R$  è la resistenza del circuito, in esso circola una corrente indotta data dalla prima legge di Ohm:

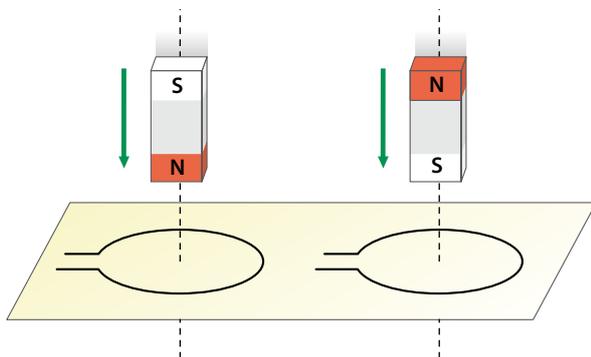
$$i = \frac{\Delta V_i}{R}$$

- 7** Una spira di area  $8,0 \text{ cm}^2$  viene estratta, in un centesimo di secondo, da un campo magnetico  $B = 0,5 \text{ T}$ , come nella figura precedente.
- Quanto vale la d.d.p. indotta nella spira?
  - Quanta corrente indotta circola nella spira se la sua resistenza è  $10 \Omega$ ?

[ $-0,04 \text{ V}$ ;  $4,0 \text{ mA}$ ]

- 8** Con riferimento all'esercizio precedente, supponi di sostituire alla spira una bobina di 30 spire delle stesse dimensioni.
- La d.d.p. indotta nella bobina e la corrente indotta sono diverse da quelle calcolate? Spiega.
  - E se metti una bobina di 60 spire?

- 9** Una spira è posata su un tavolo orizzontale e un magnete cade lungo la verticale (figura). A sinistra il magnete si avvicina con il polo sud, a destra con il polo nord. In entrambi i casi varia il flusso attraverso la spira e quindi si crea una tensione indotta che fa circolare una corrente indotta.



- Come circola la corrente indotta nelle due spire?
- Che cosa bisognerebbe conoscere per sapere quanta corrente circola nelle spire?

► **Come calcolare la tensione indotta quando è prodotta dalla variazione di una corrente.**

- Il flusso concatenato con una bobina in cui passa una corrente di intensità  $i$  vale

$$\Phi(B) = L \cdot i$$

- $L$  è l'induttanza della bobina e si misura in henry (H); per una bobina di lunghezza  $l$ , formata da  $N$  spire, tutte di area  $A$ ,

$$L = \frac{2 \pi \cdot k \cdot N^2 A}{l}$$

- Una variazione di corrente nella bobina provoca una variazione di flusso:  $\Delta \Phi = L \cdot \Delta i$  e, per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, la tensione indotta nella bobina è:

$$\Delta V_i = - \frac{L \cdot \Delta i}{\Delta t}$$

- 10** In una bobina, lunga  $10 \text{ cm}$  e composta da  $50$  spire, ognuna di area uguale a  $50 \text{ cm}^2$ , passa una corrente di intensità  $0,30 \text{ A}$ .
- Qual è l'induttanza della bobina?
  - Calcola il flusso del campo magnetico concatenato con la bobina.
  - Che cosa bisognerebbe fare per avere un flusso di valore doppio nella stessa bobina?

[ $1,6 \times 10^{-4} \text{ H}$ ;  $4,7 \times 10^{-5} \text{ Wb}$ ]

- 11** In una bobina di induttanza  $L = 0,25 \text{ H}$ , in un certo istante passa una corrente di intensità  $0,50 \text{ A}$ . Si fa variare la corrente in modo da raddoppiarla.
- Di quanto varia il flusso concatenato con la bobina?
  - Qual è la tensione indotta nella bobina se la variazione della corrente avviene in un centesimo di secondo?
  - Come circola la corrente indotta nella bobina?
  - Quale grandezza fisica manca per poter calcolare l'intensità di corrente indotta nella bobina?

[ $0,13 \text{ Wb}$ ;  $-13 \text{ V}$ ]

- 12** Con riferimento all'esercizio precedente, supponi che nello stesso intervallo di tempo la corrente passi da  $0,50 \text{ A}$  a  $0,25 \text{ A}$ .
- Come variano le risposte precedenti?

[ $-6,3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ;  $6,3 \text{ V}$ ]

## 19.1 Il flusso del vettore $\vec{B}$

### 1 PROBLEMA SVOLTO

■ ■ ■ Flusso attraverso un solenoide percorso da corrente

Un solenoide è formato da 50 spire circolari di raggio 10 cm. Il piano di ogni spira è perpendicolare a un campo magnetico uniforme di intensità 0,1 T.

- Calcoliamo il flusso del campo magnetico che attraversa il solenoide.
- Di quanto varia il flusso se il solenoide viene ruotato di 90°?

#### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Numero di spire: $N = 50$	Flusso del campo: $\Phi(B) = ?$
Raggio di una spira: $r = 10$ cm	Variazione del flusso: $\Delta\Phi(B) = ?$
Campo magnetico: $B = 0,1$ T	

Il flusso del campo magnetico che attraversa il solenoide dipende dal numero di spire, dall'area di ogni spira e dal valore del campo magnetico:

$$\Phi(B) = N \cdot A \cdot B$$

dove  $A$  rappresenta l'area di ogni spira.

- Calcoliamo l'area di una spira in unità SI:

$$A = \pi r^2 = 3,14 \times (0,1 \text{ m})^2 = 3,14 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

- Poiché nella posizione iniziale ogni spira è perpendicolare al campo, il flusso iniziale è:

$$\Phi_1(B) = N \cdot A \cdot B = 50 \times (3,14 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \times (0,1 \text{ T}) = 0,157 \text{ Wb}$$

Dopo la rotazione di 90°, ogni spira è parallela alle linee del campo, quindi il flusso finale  $\Phi_2(B)$  è nullo.

- La variazione di flusso è:

$$\Delta\Phi(B) = \Phi_2(B) - \Phi_1(B) = -0,157 \text{ Wb}$$

#### Osservazione

La variazione di flusso magnetico è negativa, d'accordo col fatto che, durante la rotazione, le linee del campo attraverso la superficie della spira diminuiscono.

- 2 ■ ■ ■ Supponi che il solenoide del problema precedente ruoti ancora di 90°.

- Calcola il valore del flusso dopo la rotazione.
- Verifica che la variazione di flusso rispetto alla posizione iniziale è  $-0,314$  Wb.

[ $-0,157$  Wb]

- 3 ■ ■ ■ Una spira quadrata di lato 10 cm è perpendicolare a un campo magnetico  $B = 0,6$  T. La spira viene fatta ruotare di 360° attorno a un asse perpendicolare al campo.

- Calcola il valore del flusso attraverso la spira per angoli di 0°, 45°, 90°, ..., 315°, 360°.
- Costruisci la tabella flusso-angolo di rotazione.
- Rappresenta la tabella graficamente (flusso in ordinata e angolo in ascissa).

- 4 ■ ■ ■ Una spira circolare di raggio 6,0 cm giace su un piano parallelo a un campo magnetico uniforme di intensità 0,8 T. La spira ruota di 180°.

- Calcola la variazione di flusso attraverso la spira.

[0 Wb]

- 5 ■ ■ ■ Una bobina è formata da 100 spire di raggio 10 cm. Ogni spira è parallela alle linee di forza di un campo magnetico uniforme di intensità 0,50 T.

- Qual è il flusso del campo magnetico attraverso il solenoide?

- Calcola la variazione di flusso se la bobina viene ruotata di 90°.

[0 Wb; 1,6 Wb]

- 6 ■ ■ ■ Un solenoide lungo 10 cm, formato da 100 spire, è percorso da una corrente di 1,0 A. Si fa variare la corrente da 1,0 A a 2,0 A.

- Calcola la variazione di flusso attraverso una spira di raggio 4,0 cm posta perpendicolarmente all'asse del solenoide.

[ $6,3 \times 10^{-6}$  Wb]

- 7 ■ ■ ■ Una spira circolare si trova in un campo magnetico uniforme di intensità  $B = 0,20$  T. Il flusso attraverso la spira è 0,18 Wb.

- Calcola il raggio della spira sapendo che la perpendicolare al piano della spira forma un angolo di 45° con la direzione del campo.

[0,64 m]

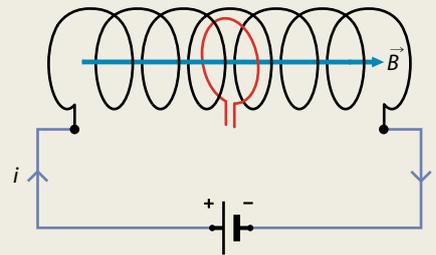
## 19.2 La legge di Faraday-Neumann-Lenz

### 8 PROBLEMA SVOLTO

#### ■ ■ ■ Tensione indotta in una spira

Lungo l'asse di un solenoide c'è un campo magnetico di valore  $3,0 \times 10^{-2} \text{ T}$ . Nel centro del solenoide, perpendicolare al suo asse, è posta una spira circolare di area  $A = 10 \text{ cm}^2$  (figura). La corrente nel solenoide viene cambiata in un millesimo di secondo e, in tale intervallo di tempo, il campo magnetico raddoppia.

► Calcoliamo la tensione indotta nella spira.



#### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Campo magnetico iniziale: $B_i = 3,0 \times 10^{-2} \text{ T}$ Campo magnetico finale: $B_f = 2B_i$ Area della spira: $A = 10 \text{ cm}^2$ Intervallo di tempo: $\Delta t = 0,001 \text{ s}$	Tensione indotta: $\Delta V_i = ?$

Le linee del campo magnetico, creato dalla corrente nel solenoide, passano attraverso la spira. Modificando la corrente si modifica anche il valore del campo e quindi varia il flusso magnetico che attraversa la spira. La tensione indotta  $\Delta V_i$  è prodotta proprio dalla variazione di questo flusso magnetico e si calcola mediante la legge di Faraday-Neumann-Lenz:

$$\Delta V_i = - \frac{\Delta \Phi(B)}{\Delta t}$$

- Le linee del campo sono perpendicolari al piano della spira, quindi il flusso iniziale attraverso la spira è  $\Phi_i(B) = B \cdot A$ :

$$\Phi_i(B) = (3,0 \times 10^{-2} \text{ T}) \times (10 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 3,0 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

- Il flusso finale è il doppio perché il valore del campo è doppio:

$$\Phi_f(B) = 6,0 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

- Variazione di flusso attraverso la spira:

$$\Delta \Phi(B) = \Phi_f(B) - \Phi_i(B) = 3,0 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

- La tensione indotta nella spira è uguale alla variazione di flusso nel tempo:

$$\Delta V_i = - \frac{\Delta \Phi(B)}{\Delta t}$$

$$\Delta V_i = - \frac{3,0 \times 10^{-5} \text{ Wb}}{0,001 \text{ s}} = -0,03 \text{ V}$$

#### Osservazione

Il valore della tensione indotta che abbiamo calcolato è un valore medio nell'intervallo  $\Delta t$ .

- 9 ■ ■ ■ Supponi che la spira del problema precedente abbia una resistenza di  $2,0 \Omega$ .

- Quanto vale la corrente indotta nella spira?
- Determina, con la legge di Lenz, il verso in cui circola la corrente.
- Se il raddoppio del campo magnetico avvenisse in un microsecondo, cambierebbe la tensione indotta, la corrente indotta o entrambe?

[0,015 A]

- 10 ■ ■ ■ Una bobina è posta sul tavolo in modo che il suo asse sia verticale. Un magnete rettilineo, tenuto in posizione verticale sopra la bobina, viene lasciato cadere.

- Descrivi che cosa succede nei due casi seguenti:

- a) il magnete si avvicina alla bobina con il polo sud;
- b) il magnete si avvicina alla bobina con il polo nord.

- 11 ■ ■ ■ Una bobina ha 100 spire di area  $10 \text{ cm}^2$  ed è collegata a un galvanometro con zero centrale. Un magnete viene estratto dalla bobina in un millesimo di secondo. Il campo magnetico dentro la bobina passa dal valore  $3 \times 10^{-4} \text{ T}$  al valore zero.

- Calcola la d.d.p. indotta nella bobina se:
  - a) dalla bobina esce il nord del magnete e poi il sud;
  - b) dalla bobina esce il sud del magnete e poi il nord.
- Con i dati disponibili è possibile sapere quale corrente segna il galvanometro nei due casi?
- In che verso circola la corrente? [a)  $0,03 \text{ V}$ , b)  $-0,03 \text{ V}$ ]

## 19.3 Induttanza e autoinduzione

### 12 PROBLEMA SVOLTO

#### ■ ■ ■ Tensione indotta in una bobina

Una bobina lunga 8,0 cm è costituita da 500 spire; l'area di una spira è  $2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . La bobina è attraversata da una corrente di 5,0 A che si annulla in un intervallo di tempo  $\Delta t = 0,02 \text{ s}$ .

► Calcoliamo l'induttanza della bobina e la tensione autoindotta.

#### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Lunghezza bobina: $l = 8,0 \text{ cm}$	Induttanza bobina: $L = ?$
Area di una spira: $A = 2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	Tensione autoindotta: $\Delta V_i = ?$
Numero di spire: $N = 500$	
Intervallo di tempo: $\Delta t = 0,02 \text{ s}$	
Intensità di corrente: $i = 5,0 \text{ A}$	

L'induttanza di una bobina dipende dalle caratteristiche geometriche e dal numero delle spire; si calcola con la formula:  $L = \frac{2\pi k \cdot N^2 \cdot A}{l}$ .

La tensione autoindotta dipende dall'induttanza e dalla variazione di corrente nel tempo:

$$\Delta V_i = - \frac{L \cdot \Delta i}{\Delta t}$$

- Calcoliamo l'induttanza in unità SI:

$$L = \frac{6,28 \times (2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2) \times 500^2 \times (2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{0,08 \text{ m}} = 0,011 \text{ N}\cdot\text{m/A}^2$$

$$L = 0,011 \text{ H}$$

- La corrente iniziale è 5,0 A, quella finale è zero, quindi la variazione di corrente è  $\Delta i = -5,0 \text{ A}$  e la tensione autoindotta nella bobina è:

$$\Delta V_i = - \frac{(0,011 \text{ H}) \times (-5,0 \text{ A})}{0,02 \text{ s}} = +2,75 \text{ V}$$

positiva perché dovuta a una diminuzione di corrente.

#### Osservazione

Per definizione, la definizione di henry è  $H = \frac{\text{Wb}}{\text{A}}$ . Utilizzando la definizione di tesla  $T = \frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}}$  e di  $\text{Wb} = T \cdot \text{m}^2$ , si ottiene  $H = \text{N}\cdot\text{m/A}^2$ .

13 ■ ■ ■ Il valore della tensione autoindotta che si crea in un circuito si calcola con la formula:  $\Delta V_{\text{autoindotta}} = \frac{-L \cdot \Delta i}{\Delta t}$ .

- Qual è il significato del segno meno?
- Se la corrente diminuisce, la tensione autoindotta è positiva o negativa?
- E se la corrente aumenta?

14 ■ ■ ■ Una bobina lunga 10 cm è formata da 200 spire di raggio 4,0 cm ed è percorsa da una corrente di intensità  $i$ . Il campo sull'asse della bobina vale  $1,0 \times 10^{-2} \text{ T}$ .

- Qual è il valore della corrente?
- Calcola il flusso concatenato con la bobina.
- Calcola il coefficiente di autoinduzione.

[4,0 A; 0,01 Wb;  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ ]

15 ■ ■ ■ La corrente che percorre una bobina di induttanza 0,40 H al tempo  $t_1$  vale 2,5.

- Qual è il flusso che attraversa la bobina?
- Se al tempo  $t_2$  la corrente è raddoppiata, il flusso è diventato doppio?

- Di quanto è variato il flusso attraverso la bobina?
- Che cosa succede dentro la bobina nell'intervallo di tempo  $t_2 - t_1$ ? [1,0 Wb; si; 1,0 Wb]

16 ■ ■ ■ Una bobina lunga 15 cm è costituita da 800 spire di diametro 10 cm. Si fa variare la corrente che percorre la bobina e si produce per autoinduzione una tensione di 0,5 V in un centesimo di secondo.

- Di quanto è variata la corrente? [-0,12 A]

17 ■ ■ ■ Un circuito è formato da una resistenza di  $50 \Omega$  in serie a una bobina di induttanza  $L$  e resistenza trascurabile. Il circuito è alimentato da una pila da 6,0 V. Se il circuito viene chiuso la corrente passa da un valore zero a un valore massimo.

- Qual è la variazione della corrente durante la chiusura del circuito?
- Il flusso del campo magnetico attraverso la bobina, aumenta o diminuisce durante la chiusura del circuito?
- In quale modo la bobina si oppone all'aumento di corrente? [0,12 A]

## 19.4 I circuiti in corrente alternata

### 18 PROBLEMA SVOLTO

#### Corrente alternata

Un alternatore con una tensione massima di 240 V è collegato a una resistenza di 200 Ω.  
► Calcoliamo il calore prodotto sulla resistenza in mezz'ora per effetto Joule.

#### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Tensione massima: $\Delta V = 240 \text{ V}$ Resistenza: $R = 200 \text{ }\Omega$ Intervallo di tempo: $\Delta t = 1/2 \text{ h} = 1800 \text{ s}$	Calore prodotto: $Q = ?$

Applichiamo la legge di Joule:  $Q = R \cdot i^2 \cdot \Delta t$ , dove  $i$  è la corrente efficace. Per calcolare  $i_{\text{eff}}$ , calcoliamo la tensione efficace  $V_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$ , poi applichiamo la legge di Ohm:  $i_{\text{eff}} = V_{\text{eff}}/R$ .

- Valore efficace della tensione ai capi di  $R$ :  $V_{\text{eff}} = \frac{240 \text{ V}}{1,41} = 170 \text{ V}$ .
- Applichiamo la prima legge di Ohm:  $i_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{eff}}}{R} = \frac{170 \text{ V}}{200 \text{ }\Omega} = 0,85 \text{ A}$ .
- Calore prodotto:  $Q = R \cdot i^2 \cdot \Delta t = (200 \text{ }\Omega) \times (0,85 \text{ A})^2 \times (1800 \text{ s}) = 2,6 \times 10^5 \text{ J}$ .

#### Osservazione

La legge di Joule vale anche nei circuiti in corrente alternata, se si utilizza la corrente efficace.

**19** Con la stessa resistenza di 200 Ω si vuol produrre, sempre in mezz'ora una quantità di calore uguale a  $5,2 \times 10^5 \text{ J}$ .

- Quale potenza deve essere prodotta sulla resistenza?
- Quale corrente efficace deve passare nel circuito?
- Quale tensione massima deve fornire l'alternatore? [ $2,9 \times 10^2 \text{ W}$ ; 1,2 A;  $3,4 \times 10^2 \text{ V}$ ]

**20** Una lampadina collegata a una tensione alternata si illumina con la stessa intensità che avrebbe se connessa a una batteria d'auto (12 V).

- Qual è il valore efficace della tensione alternata?
- Qual è il valore massimo? [12 V; 17 V]

**21** Un generatore di tensione alternata è collegato a un ferro da stiro di resistenza 50 Ω. La tensione efficace è 220 V.

- Calcola i valori massimi di corrente e tensione.
- Qual è la potenza assorbita dal ferro da stiro?
- Quanto calore si produce per effetto Joule in un'ora? [6,2 A, 310 V; 970 W;  $3,5 \cdot 10^6 \text{ J}$ ]

## 19.5 Il trasformatore

### 22 PROBLEMA SVOLTO

#### Il trasformatore

Un trasformatore ha 4000 spire nel circuito primario. La tensione in ingresso è 240 V, quella in uscita 12 V. L'uscita è collegata a una lampadina che ha una resistenza di 10 Ω.

- Quante sono le spire del secondario e qual è la potenza sviluppata dalla lampadina?

#### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Spire del primario: $N_p = 4000$ Tensione al primario: $V_p = 240 \text{ V}$ Tensione al secondario: $V_s = 12 \text{ V}$ Resistenza della lampadina: $R = 10 \text{ }\Omega$	Spire del secondario: $N_s = ?$ Potenza sviluppata: $P = ?$

Il numero di spire al secondario si può calcolare utilizzando il rapporto di trasformazione del trasformatore:  $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$ . La potenza, invece, si calcola con la relazione  $P = V_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}}$ .

- Ricaviamo  $N_s$  dal rapporto di trasformazione:

$$N_s = \frac{N_p \cdot V_s}{V_p} = \frac{4000 \times (12 \text{ V})}{240 \text{ V}} = 200$$

- Per calcolare la potenza calcoliamo la corrente efficace con la legge di Ohm:

$$i_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{eff}}}{R} = \frac{12 \text{ V}}{10 \Omega} = 1,2 \text{ A}$$

- La potenza della lampadina è:

$$P = V_{\text{eff}} i_{\text{eff}} = (12 \text{ V}) \times (1,2 \text{ A}) = 14,4 \text{ W}$$

**Osservazione**

Nei circuiti in corrente alternata vale sia la prima legge di Ohm, sia la legge della potenza.

**23** Il motore elettrico di un giocattolo funziona con una d.d.p. alternata di 11 V. Mediante un trasformatore viene collegato alla tensione di rete (220 V).

- ▶ Calcola il rapporto di trasformazione.
- ▶ Se il primario del trasformatore è composto da 800 spire, quante sono le spire del secondario?

[0,05; 40]

**24** Un campanello elettrico collegato con un trasformatore a una presa sul muro (220 V) funziona con una tensione di 6,0 V e in esso passa una corrente di 0,5 A.

- ▶ Da quante spire è formato il secondario del trasformatore se nel primario ci sono 2500 spire?
- ▶ Qual è la corrente che circola nel primario se il rendimento del trasformatore è del 98%?

[68; 0,014 A]

**25** Il rapporto di trasformazione di un trasformatore vale 400. Il primario è collegato alla rete (tensione efficace 220 V) ed è attraversato da una corrente di 0,1 A.

- ▶ Il trasformatore riduce o eleva la tensione applicata?
- ▶ Quale tensione è disponibile al secondario?
- ▶ Quale intensità percorre il circuito secondario se il rendimento è del 95%?

[8,8·10<sup>4</sup> V; 2,4·10<sup>-4</sup> A]

**26** Un trasformatore ha il circuito primario di 200 spire ed è alimentato da una tensione alternata di 220 V alla frequenza di 50 Hz. La tensione del secondario è 2200 V.

- ▶ Quante spire deve avere il secondario?
- ▶ Qual è la frequenza della tensione del circuito secondario?

[2000; 50 Hz]

**27 PROBLEMA SVOLTO**
**Perdite lungo una linea elettrica**

Un alternatore trasmette con 3,0 kW di potenza, su una linea con resistenza complessiva 5,0 Ω.

- ▶ Calcoliamo la perdita percentuale di potenza lungo la linea, supponendo che la trasmissione avvenga con una tensione di 220 V.

**Analisi e soluzione**

Dati	Incognite
Potenza trasmessa: $P = 3,0 \text{ kW}$ Resistenza della linea: $R = 5,0 \Omega$ Tensione: $\Delta V = 220 \text{ V}$	Perdita di potenza, in percentuale

Il passaggio di corrente sulla linea produce un riscaldamento dei conduttori e quindi una perdita di potenza per effetto termico. La potenza dissipata per effetto Joule è:  $P = R \cdot i^2$ .

- Corrente che passa sulla linea:

$$i = \frac{P}{\Delta V} = \frac{3000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 13,6 \text{ A}$$

- Potenza dissipata per effetto Joule:

$$P = (5,0 \Omega) \times (13,6 \text{ A})^2 = 925 \text{ W}$$

- Dividiamo questo valore per la potenza trasmessa:

$$\frac{925 \text{ W}}{3000 \text{ W}} = 0,31 \text{ che corrisponde a una perdita del 31\%.$$

**Osservazione**

Per diminuire la perdita di potenza si può elevare la tensione di trasmissione, in modo da diminuire la corrente.

- 28** La potenza precedente viene trasmessa lungo la stessa linea con 2200 V.  
► Calcola la perdita percentuale. [0,3%]
- 29** Su una linea elettrica che ha una resistenza di  $1,5 \Omega$  viene trasmessa una potenza di 6 kW con una tensione alternata di 220 V.  
► Calcola la corrente efficace che passa sulla linea.

► Quanti watt si perdono sulla linea per effetto Joule? Qual è la perdita percentuale? [27 A; 1,1 kW; 19%]

- 30** Una centrale fornisce, a 10 km di distanza, una potenza media di 200 kW alla tensione efficace di 220 V.  
► Qual è la potenza dissipata lungo la linea se la sua resistenza, per unità di lunghezza, è  $0,01 \text{ W/km}$ ?  
► Calcola la perdita percentuale di potenza. [ $8,3 \times 10^4 \text{ W}$ ; 41%]

## 19.6 Le onde elettromagnetiche

**31** **PROBLEMA SVOLTO**  
**Onde elettromagnetiche nel visibile**

Le onde visibili sono comprese fra  $4,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$  (rosso) e  $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$  (violetto).

- Fra quali lunghezze d'onda è compresa la luce visibile?  
► Se le onde si propagano in un mezzo, le lunghezze d'onda sono come quelle nel vuoto?

### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
$f_{\text{rosso}} = 4,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$\lambda_{\text{rosso}} = ?$
$f_{\text{violetto}} = 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$\lambda_{\text{violetto}} = ?$

Per calcolare la lunghezza d'onda basta utilizzare la relazione fondamentale delle onde:  $c = \lambda \cdot f$ , dove  $c$  è la velocità della luce.

- Calcoliamo le due lunghezze d'onda con la formula  $\lambda = \frac{c}{f}$ :

$$\lambda_{\text{rosso}} = \frac{(3,0 \times 10^8 \text{ m/s})}{4,0 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 7,5 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \lambda_{\text{violetto}} = \frac{(3,0 \times 10^8 \text{ m/s})}{7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 4,0 \times 10^{-7} \text{ m}$$

- In un mezzo la velocità della luce è minore di  $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ , quindi anche le lunghezze d'onda saranno più piccole.

- 32** Le frequenze delle trasmissioni televisive sono comprese tra 54,0 MHz e 806 MHz.  
► Calcola le lunghezze d'onda corrispondenti. [5,56 m; 0,372 m]

- 33** Le microonde variano tra 1,0 GHz e 300 GHz.  
► Esprimi le due frequenze in hertz.  
► Quelle frequenze corrispondono a piccole o grandi lunghezze d'onda? [ $1,0 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ ;  $3,0 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ ]

- 34** La torre di controllo di un aeroporto invia, mediante il radar, delle onde elettromagnetiche di frequenza 110 MHz a un aereo che dista 12,5 km. Le onde sono riflesse dall'aereo e vengono captate dal radar.  
► Esprimi i dati in SI, con notazione esponenziale.  
► Dopo quanto tempo il radar riceve le onde elettromagnetiche? [ $1,1 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ ;  $1,25 \cdot 10^4 \text{ m}$ ;  $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ ]



online.zanichelli.it/ruffo\_fisica  
**PROBLEMI RIASSUNTIVI**, 1 pagina

### SOLUZIONI DEGLI ESERCIZI

#### UNITÀ 19

- 19.1 Il flusso del vettore  $\vec{B}$**  [p. H 51]
- 2 a) F; b) V; c) V; d) F; e) F  
3  $1,6 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ; 4,1 cm  
4  $9,6 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ ;  $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ ;  
 $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ ; 0 Wb;  $-4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$   
6  $180^\circ$   
8  $-1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$   
9 0,34 m  
10  $2,0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ;  $-5,9 \times 10^{-5} \text{ Wb}$   
11  $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ ;  $9,5 \times 10^{-7} \text{ Wb}$

12  $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ ;  $0,12 \text{ cm}^2$ ;  
 $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

**19.2 La legge di Faraday-Neumann-Lenz** [p. H 12]

- 2 a) F; b) V; c) F; d) F; e) V  
3 2,5 mV; 5,0 mA  
4  $8,0 \times 10^{-2} \text{ V}$ ;  $2,0 \times 10^{-2} \text{ A}$   
9  $-2,5 \times 10^{-3} \text{ V}$ ;  $5,0 \times 10^{-3} \text{ A}$

**19.4 I circuiti in corrente alternata** [p. H 13]

- 1  $6,3 \times 10^4 \text{ rad/s}$ ;  $V(t) = 150 \cdot \text{sen}(6,3 \times 10^4 t)$ ; 5,0 A  
2  $5,0 \times 10^{-3} \text{ s}$ ;  $5,0 \times 10^{-3} \text{ s}$ ;  
 $i(t) = 1,5 \cdot \text{sen}(1,3 \times 10^3 t)$

- 3 270 V; -270 V; 83,3 Hz  
4 1,4 A; 0,28 H 5  $1,3 \cdot 10^3 \text{ V}$   
6 32 k $\Omega$   
7 a) V; b) F; c) F; d) F; e) V  
9 14 A; 500 V  
10 85 V; 8,5 A 11 325 V, 156 A  
13 6,4 A 14 212 V, 4,24 A; 900 W  
15 0,27 A; 823  $\Omega$

**19.5 Il trasformatore** [p. H 16]

- 2 a) F; b) F; c) V 3 2  
4 2,0 V; 50 5 0,05; 8000  
6 Elevatore; 45 7 380 kV; 9500  
8 10 9 97 W; 0,97 A  
10 100 V; 2,5 A; 5,0 A 11 0,1; 0,01

- 13 20 A  
14 25 A; 0,19%

**19.6 Le onde elettromagnetiche** [p. H 20]

- 5 a) F; b) V; c) V  
6 a) F; b) F; c) F; d) V; e) V  
7  $3,75 \cdot 10^{-7} \text{ m}$   
8  $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; 100 m; 10 m  
9 5,0 m  
10  $6,67 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$   
11  $8,3 \times 10^{-4} \text{ s}$   
12  $6,0 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ;  $2,4 \times 10^8 \text{ m/s}$   
13 Tra 330,26 mm e 330,27 mm  
14 Tra 353 mm e 638 mm;  $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$