



FABRIZIO CERRI  
VITO BONANNO

# TECNOLOGIE E PROGETTAZIONE DI SISTEMI INFORMATICI E DI TELECOMUNICAZIONI

1

Per l'articolazione TELECOMUNICAZIONI  
degli Istituti Tecnici settore Tecnologico



Edizione **OPENSCHOOL**

1	<b>LIBRODITESTO</b>
2	<b>E-BOOK+</b>
3	<b>RISORSEONLINE</b>
4	<b>PIATTAFORMA</b>

# HOEPLI



# **Tecnologie e progettazione di sistemi informatici e di telecomunicazioni**



FABRIZIO CERRI VITO BONANNO

# **Tecnologie e progettazione di sistemi informatici e di telecomunicazioni**

**Per l'articolazione Telecomunicazioni  
degli Istituti Tecnici settore Tecnologico**

**VOLUME 1**



**EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO**

**Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2019**

Via Hoepli 5, 20121 Milano (Italy)

tel. +39 02 864871 – fax +39 02 8052886

e-mail [hoepli@hoepli.it](mailto:hoepli@hoepli.it)

**[www.hoepli.it](http://www.hoepli.it)**



Tutti i diritti sono riservati a norma di legge  
e a norma delle convenzioni internazionali

# INDICE

PRESENTAZIONE .....	IX
---------------------	----

## **modulo A COMPONENTI PASSIVI E RETI ELETTRICHE** .....

1

### **unità A1 Resistori, condensatori e induttori** .....

2

<b>A1.1 Resistori</b> .....	2
Caratteristiche generali, 2 ♦ Caratteristiche elettriche, 2 ♦ Collegamento in serie e parallelo dei resistori, 3 ♦ Tecnologie di fabbricazione, 4 ♦ Codice dei colori, 7 ♦ Potenzimetri, 8 ♦ Altri tipi di resistori variabili, 10	

### **A1.2 Condensatori** .....

11

Capacità, 11 ♦ Costante dielettrica, 11 ♦ Relazione tensione-corrente, 12 ♦ Parametri caratteristici, 12 ♦ Collegamento in parallelo e in serie, 12 ♦ Tecnologie di fabbricazione, 13 ♦ Codici di identificazione, 14 ♦ Carica e scarica del condensatore, 14

### **A1.3 Induttori** .....

16

Caratteristiche generali, 16 ♦ Caratteristiche elettriche, 17 ♦ Tecnologie di fabbricazione, 18 ♦ Carica e scarica dell'induttore, 19

<b>ESERCITAZIONI GUIDATE A1.1 - A1.7</b> .....	21
--	----

### **unità A2 Interruttori e relè** .....

29

#### **A2.1 Interruttori e comandi** .....

29

Pulsanti, interruttori, contatti, 29 ♦ Funzionalità dell'interruttore e del pulsante, 30 ♦ Commutatore, 30 ♦ Deviatore, 30 ♦ Invertitore, 31 ♦ Parametri caratteristici, 31 ♦ Tipologie di interruttori, 31

#### **A2.2 Relè** .....

31

Funzionalità del relè, 31 ♦ Schema di comando e schema di potenza, 33 ♦ Schemi con contatti, 34

<b>ESERCITAZIONI GUIDATE A2.1 - A2.6</b> .....	35
--	----

### **unità A3 Reti elettriche** .....

41

#### **A3.1 Reti a resistori** .....

41

Grandezze fondamentali, 41 ♦ Legge di Ohm, 42 ♦ Generatori di tensione e di corrente, 42 ♦ Caduta di tensione, 43

<b>A3.2 Leggi circuitali e teoremi delle reti</b> .....	44
Nodi e maglie, 44 ♦ Regola del partitore di tensione e di corrente, 44	

<b>ESERCITAZIONI GUIDATE A3.1 - A3.6</b> .....	45
--	----

### **unità A4 Diodi LED e display** .....

51

#### **A4.1 Diodi LED** .....

51

Parametri caratteristici, 51 ♦ Esempio: dispositivo TIL220, 52 ♦ Tipologie di LED, 52 ♦ Polarizzazione del diodo LED, 54

#### **A4.2 Display a LED** .....

54

Display a sette segmenti, 54

<b>ESERCITAZIONI GUIDATE A4.1 - A4.4</b> .....	56
--	----

<b>VERIFICHE DEI CONTENUTI</b> .....	60
--------------------------------------	----

## **modulo B STRUMENTI DI LABORATORIO** .....

65

### **unità B1 Metrologia** .....

66

<b>B1.1 Sistema Internazionale di unità di misura (SI)</b> .....	66
--	----

#### **B1.2 Errori nelle misurazioni** .....

66

Incertezza di misura, 68 ♦ Esempio: errori accidentali e sistematici, 68 ♦ Modalità di espressione dell'errore, 69 ♦ Valutazione statistica degli errori, 69

<b>ESERCITAZIONI GUIDATE B1.1 - B1.6</b> .....	71
--	----

### **unità B2 Strumenti di misura per grandezze elettriche** .....

77

#### **B2.1 Classificazione degli strumenti** .....

77

Strumenti analogici, 77 ♦ Strumenti digitali, 77

#### **B2.2 Modalità di misura** .....

78

Misura comparativa, 78 ♦ Misura diretta, 78 ♦ Misura indiretta, 78

#### **B2.3 Formato di uscita** .....

79

Indicatori analogici a indice, 79 ♦ Indicatori digitali, 79

#### **B2.4 Specifiche** .....

80

Fondo scala e portata, 80 ♦ Risoluzione, 80

<b>B2.5</b> Voltmetri analogici .....	81
Voltmetro a bobina mobile, 81 ♦ Voltmetro elettronico, 82	
<b>B2.6</b> Voltmetri digitali .....	82
Struttura circuitale dei DVM, 82	
<b>B2.7</b> Multimetri digitali .....	83
Caratteristiche generali, 83 ♦ Display, 83 ♦ Misure, 83	
<b>B2.8</b> Alimentatori stabilizzati .....	85
Collegamento in serie, 85 ♦ Collegamento duale, 85 ♦ Collegamento in parallelo, 85 ♦ Esempio: alimentatore duale, 86	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE B2.1 - B2.8</b> .....	88

### unità B3 Strumenti di misura per grandezze elettroniche

<b>B3.1</b> Generatori di funzione .....	96
Parametri regolabili, 96 ♦ Modulazione, 97 ♦ Esempio: generatore di funzioni, 97	
<b>B3.2</b> Generatori di impulsi .....	98
Caratteristiche degli impulsi, 98	
<b>B3.3</b> Oscilloscopio: principio di funzionamento .....	100
Oscilloscopio analogico, 100 ♦ Oscilloscopio digitale, 101	
<b>B3.4</b> Oscilloscopio: comandi .....	102
Controllo verticale, 102 ♦ Controllo orizzontale, 103 ♦ Controllo trigger, 104 ♦ Pulsanti del menu e di controllo, 104 ♦ Connettori, 104 ♦ Modalità di accoppiamento, 105	
<b>B3.5</b> Oscilloscopio: metodi di misura .....	105
Misura di tensioni, 105 ♦ Misura di periodo, 106	
<b>B3.6</b> Oscilloscopio: funzioni speciali .....	107
Base dei tempi ritardata, 107 ♦ Scansione mista, 107 ♦ Campionamento dei segnali, 108 ♦ Vantaggi della memoria digitale, 108 ♦ Connettività, 109	
<b>B3.7</b> Frequenzimetro .....	109
Misura della frequenza, 109 ♦ Base dei tempi, 109 ♦ Misura del periodo, 110 ♦ Aggiornamento delle misure, 110	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE B3.1 - B3.6</b> .....	112

### unità B4 Strumenti virtuali e di misura automatica

<b>B4.1</b> Strumentazione convenzionale e virtuale .....	124
Strumentazione convenzionale, 124 ♦ Strumentazione virtuale, 124	

<b>B4.2</b> Controllo a distanza degli strumenti .....	125
GPIB, 125 ♦ RS-232, 126	
<b>B4.3</b> Test automatici .....	126
Test funzionali, 126 ♦ Test <i>in circuit</i> , 127	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE B4.1 - B4.3</b> .....	128
<b>VERIFICHE DEI CONTENUTI</b> .....	133

## modulo C SOFTWARE

### DI SIMULAZIONE CIRCUITALE

#### unità C1 Simulazione di schemi elettronici mediante Multisim

<b>C1.1</b> Ambiente di lavoro di Multisim .....	138
Schermata iniziale, 138 ♦ <i>Components Toolbar</i> , 139 ♦ <i>Instruments Toolbar</i> , 139 ♦ Personalizzazione dell'aspetto dello schema, 140	
<b>C1.2</b> Disposizione e collegamento dei componenti .....	140
Disposizione dei componenti, 140 ♦ Collegamento dei componenti, 140	
<b>C1.3</b> Creazione dello schema e simulazione .....	141
Disposizione dei componenti, 141 ♦ Modifica e personalizzazione, 141 ♦ Creazione dei collegamenti, 142 ♦ Prova del circuito, 142 ♦ Modifica dell'aspetto dello schema, 142	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE C1.1 - C1.10</b> .....	143

#### unità C2 LabVIEW

<b>C2.1</b> Ambiente di LabVIEW .....	158
Linguaggio grafico, 158 ♦ <i>Front Panel &amp; Block Diagram</i> , 159 ♦ Elementi del pannello e del diagramma, 159 ♦ <i>Tools palette</i> : tavolozza degli strumenti, 160	
<b>C2.2</b> Blocchi funzionali di LabVIEW .....	160
<i>Numeric</i> (numerici), 160 ♦ <i>Boolean</i> (booleani), 161 ♦ <i>Comparison</i> (comparazione), 161	
<b>C2.3</b> Strutture di programmazione di LabVIEW .....	162
Struttura <i>Case</i> , 162 ♦ Ciclo <i>For</i> , 162 ♦ Ciclo <i>While</i> , 162 ♦ Strutture <i>Sequence</i> , 163	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE C2.1 - C2.12</b> .....	164
<b>VERIFICHE DEI CONTENUTI</b> .....	177

## **modulo D PROTOTIPAZIONE MEDIANTE BREADBOARD E CIRCUITO STAMPATO** ..... 179

### **unità D1 Breadboard e circuito stampato** ..... 180

#### **D1.1 Breadboard** ..... 180

Esempio: collocazione e collegamento dei componenti, 181

#### **D1.2 Tinkercad Circuits** ..... 182

Esempio: ambiente Tinkercad Circuits, 182

#### **D1.3 Generalità sui circuiti stampati** ..... 184

PCB, 184 ♦ Percorsi, 185 ♦ Fori, 185 ♦ Componenti, 185 ♦ Flusso di progettazione, 185

#### **D1.4 Tipologie di package** ..... 186

Tipologie di package SMT [fig. D1.14], 186 ♦ Tipologie di package THT [fig. D1.16], 187

**ESERCITAZIONI GUIDATE D1.1 - D1.4** ..... 188

### **unità D2 Circuiti stampati con Ultiboard** ..... 193

#### **D2.1 National Instruments Ultiboard** ..... 193

La schermata di Ultiboard, 193 ♦ Scheda *Layers* del *Design Toolbox*, 194 ♦ Interfaccia utente e comandi di selezione, 195

#### **D2.2 Realizzazione netlist a partire da Multisim** ..... 196

Esempio: schematizzazione del circuito con Multisim, 196 ♦ Esempio: realizzazione della netlist con Ultiboard, 197

#### **D2.3 Realizzazione PCB a partire dalla netlist** ..... 198

Esempio: posizionamento dei componenti, 198 ♦ Esempio: realizzazione delle tracce, 198

**ESERCITAZIONI GUIDATE D2.1 - D2.9** ..... 200

**VERIFICHE DEI CONTENUTI** ..... 216

## **modulo E RETI LOGICHE COMBINATORIE E SEQUENZIALI** ..... 219

### **unità E1 Progetto di circuiti digitali combinatori** ..... 220

#### **E1.1 Generalità e classificazione dei sistemi digitali** ..... 220

Sistemi combinatori, 220 ♦ Sistemi sequenziali, 221

#### **E1.2 Descrizione funzionale dei sistemi combinatori** ..... 221

Esempio: calcolatrice semplice, 221

#### **E1.3 Dispositivi elementari** ..... 222

Porte fondamentali: AND, OR, NOT, 222 ♦ Porte derivate (NAND, NOR, EX-OR, EX-NOR), 222 ♦ Implementazione NAND e NOR, 223

#### **E1.4 Progetto in prima e seconda forma canonica** ..... 224

Prima forma canonica, 224 ♦ Sintesi circuitale, 224 ♦ Seconda forma canonica, 225

#### **E1.5 Minimizzazione tramite mappa di Karnaugh** ..... 225

Compilazione della mappa, 225 ♦ Formazione dei gruppi, 226 ♦ Sintesi della funzione booleana, 228 ♦ Funzioni non completamente specificate, 229

#### **E1.6 Circuiti integrati** ..... 230

Livelli di integrazione, 230 ♦ Le famiglie logiche, 231 ♦ Guida pratica ai circuiti integrati, 232

**ESERCITAZIONI GUIDATE E1.1 - E1.12** ..... 236

### **unità E2 Circuiti combinatori macrofunzionali e circuiti sequenziali** ..... 250

#### **E2.1 Circuiti decodificatori** ..... 250

Esempio: il decodificatore 2/4 come generatore di mintermini, 251 ♦ Esempio: il decodificatore 3/8 per l'implementazione delle funzioni logiche, 251 ♦ Implementazione interna, 251

#### **E2.2 Circuiti selettori** ..... 252

Esempio: moltiplicazione dei dati, 252

#### **E2.3 Circuiti distributori** ..... 252

Esempio: mini centralina telefonica, 253

#### **E2.4 Decodificatore per display a sette segmenti** ..... 253

Esempio: configurazione 3, 254 ♦ Pilotaggio del display mediante decodificatore per display, 254 ♦ Esempio: sistema di digitazione e visualizzazione numerica, 255 ♦ Implementazione interna del decodificatore per display, 255

#### **E2.5 Codificatore decimale** ..... 256

#### **E2.6 Circuiti sequenziali** ..... 256

Flip-flop, 256 ♦ Contatori, 257

**ESERCITAZIONI GUIDATE E2.1 - E2.10** ..... 258

**VERIFICHE DEI CONTENUTI** ..... 269

## **modulo F AUTOMI** ..... 271

### **unità F1 Teoria degli automi** ..... 272

#### **F1.1 Stato, memoria, ingressi, uscite** ..... 272

Esempio: distributore automatico, 272

<b>F1.2</b> Struttura di un automa .....	273
Schema a blocchi di principio, 273 ♦ Macchina di Moore e macchina di Mealy, 273 ♦ Schema espanso, 274 ♦ Esempio: automa contatore modulo 4, 275	
<b>F1.3</b> Diagramma degli stati e tabelle degli stati .....	275
Diagramma degli stati, 275 ♦ Tabelle degli stati, 276 ♦ Esempio: contatore modulo 4 avanti-indietro, 276	
<b>F1.4</b> Simulazione degli automi .....	277
Costruzione del diagramma degli stati di un contatore modulo 4, 277 ♦ Tracciamento delle transizioni, 277 ♦ Simulazione del diagramma, 278	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE F1.1 - F1.4</b> .....	280

## **unità F2 Implementazione di automi** .....

<b>F2.1</b> Implementazione hardware di automi mediante flip-flop .....	284
Associazione tra stati e variabili di stato, 285 ♦ Mappe di Karnaugh, 285 ♦ Circuito per la funzione transizione di stato, 286 ♦ Realizzazione pratica, 286	
<b>F2.2</b> Implementazione software di automi .....	287
Implementazione in linguaggio C, 287 ♦ Implementazione in Visual Basic, 288	
<b>F2.3</b> Cosimulazione LabVIEW-Multisim per il progetto di automi .....	288
Realizzazione schema Multisim, 288 ♦ Realizzazione schema LabVIEW, 289	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE F2.1 - F2.4</b> .....	291
<b>VERIFICHE DEI CONTENUTI</b> .....	298

## **modulo G SCHEDA DI PROGRAMMAZIONE ARDUINO** .....

<b>unità G1 Introduzione alla scheda Arduino</b> .....	302
<b>G1.1</b> Storia e caratteristiche generali .....	302
<b>G1.2</b> Panoramica delle applicazioni .....	304
<b>G1.3</b> Hardware .....	305
<b>G1.4</b> Architettura dei processori AVR .....	307

<b>G1.5</b> Come alimentare correttamente Arduino .....	309
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE G1.1 - G1.3</b> .....	311

## **unità G2 L'ambiente di programmazione IDE** .....

<b>G2.1</b> Il software .....	314
Primo approccio con Arduino, 314 ♦ L'interfaccia grafica di Arduino, 315 ♦ Il menu dell'IDE, 316	
<b>G2.2</b> Struttura del linguaggio di programmazione .....	317
Le variabili, 317 ♦ Le costanti, 317 ♦ Funzioni di input e output, 317 ♦ Strutture di controllo, 319	
<b>G2.3</b> Il monitor seriale .....	320
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE G2.1 - G2.4</b> .....	322

## **unità G3 I/O digitali e analogici** .....

<b>G3.1</b> Output digitali .....	330
Far lampeggiare un diodo LED, 330	
<b>G3.2</b> Input digitali .....	332
Resistenza di pull-up e di pull-down, 332 ♦ Accendere un LED alla pressione di un pulsante, 332 ♦ Resistenza di pull-up interna, 334	
<b>G3.3</b> Output analogici .....	335
LED in dissolvenza, 336 ♦ Uscita analogica a frequenza variabile (produzione di suoni), 337	
<b>G3.4</b> Input analogici .....	337
Riferimenti di tensione, 338 ♦ Lettura analogica di valori resistivi, 338	
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE G3.1 - G3.7</b> .....	345

## **unità G4 Sistemi di visualizzazione** .....

<b>G4.1</b> Display a sette segmenti .....	358
<b>G4.2</b> Display LCD 16×2 .....	361
<b>G4.3</b> Display 20×4 .....	365
<b>ESERCITAZIONI GUIDATE G4.1 - G4.4</b> .....	369
<b>VERIFICHE DEI CONTENUTI</b> .....	379

## **APPENDICE**

<b>Progetti sommativi</b> .....	383
---------------------------------	-----

# PRESENTAZIONE

Il testo è rivolto alla materia **Tecnologie e Progettazione di Sistemi Informatici e di Telecomunicazioni** per l'indirizzo **Informatica e Telecomunicazioni** articolazione **Telecomunicazioni**.

L'opera fornisce conoscenze e competenze tecnologiche per i settori dell'Elettronica e dell'Informatica, ampiamente richieste in una pluralità di contesti, sia nell'ambito della produzione industriale di beni e servizi, sia per l'esercizio di sistemi e infrastrutture hardware o software.

La moderna struttura didattica è basata innanzitutto sulla **esperienza laboratoriale e progettuale**.

Attraverso esperienze pratiche il testo dà senso e sostanza al percorso formativo complessivo dell'indirizzo Informatica e Telecomunicazioni, contribuendo a coinvolgere lo studente in attività progettuali **interdisciplinari** e facendosi collettore e catalizzatore degli apprendimenti delle **materie di indirizzo**, ovvero: Telecomunicazioni, Informatica, Sistemi e Reti.

Nel **primo volume**, destinato al terzo anno, vengono proposti insegnamenti riguardanti la progettazione e lo sviluppo di applicazioni nell'ambito dell'elettronica digitale, sia con l'ausilio di **programmi di simulazione**, sia mediante il **cablaggio** dei componenti elettronici su un supporto di piste conduttive. Il percorso si completa con i fondamenti della programmazione applicata all'elettronica, grazie all'impiego della **scheda di programmazione Arduino**.

Tutti i temi vengono gestiti con un approccio chiaro, pratico e guidato passo dopo passo, che favorisce un apprendimento graduale e commisurato ai livelli di partenza degli studenti.

## STRUTTURA

Ogni volume del testo è ripartito in **moduli**, a loro volta suddivisi in **unità didattiche**.

Ogni unità didattica contempla la presenza dei seguenti apparati.

1. Una prima **sezione teorica** utile per acquisire le conoscenze di base, attraverso una esposizione con linguaggio diretto, chiaro e sintetico, integrata da esempi chiarificatori e portatori di elementi di interesse e attualità.
2. Una seconda sezione di **schede laboratoriali** (*Esercitazioni guidate*) su singola o doppia pagina, contenenti comandi rivolti allo studente per la realizzazione di esperimenti e applicazioni, in modalità sia virtuale sia materiale.

A fine modulo sono presenti **schede di verifica dei contenuti** con domande a risposta chiusa, ciascuna scheda relativa a un'unità.

Nelle schede laboratoriali spesso sono presenti, oltre alle richieste pratiche, **domande a risposta chiusa** che stimolano all'osservazione e alla riflessione. Anziché spiegare con **criterio frontale** un argomento si preferisce condurre gli studenti all'**esplorazione autonoma dei concetti**, proponendo un percorso di riflessioni, declinato appunto mediante domande del tipo a selezione multipla o completamento di frasi.

Al termine di ogni volume è presente un'appendice di schede di **progetti sommativi**, che guidano gli studenti alla realizzazione di progetti. Il particolare format utilizzato, comprendente indicazioni di guida per lo studente e **proposte di affinamento ed espansione** del progetto stesso, riesce a conciliare una duplice necessità:

- seguire lo studente nel suo percorso di sviluppo del progetto;
- concedere allo studente ampi margini di **autonomia** nella realizzazione del progetto.

## CONTENUTI

### Modulo A – Componenti passivi e reti elettriche

Nel modulo vengono descritti, dal punto di vista tecnologico e funzionale, i componenti elettronici alla base degli apprendimenti dei moduli successivi e delle diverse esperienze laboratoriali. Vengono presentati i componenti di base, resistori, condensatori, induttori, ma anche diodi LED, che sono essenziali per la realizzazione di circuiti elettronici. Inoltre vengono sinteticamente trattate le principali metodologie di progetto per mettere lo studente in grado di cimentarsi autonomamente nelle strutture circuitali fondamentali.

### Modulo B – Strumenti di laboratorio

L'effettuazione di misure di laboratorio è alla base delle attività sperimentali mirate alla analisi e alla progettazione dei circuiti. Nel modulo vengono analizzati sia il funzionamento dei principali strumenti di misura in ambito elettronico, sia il loro impiego per le attività progettuali. Oltre agli strumenti tradizionali per il laboratorio di misure elettriche (multimetro, alimentatore) ed elettroniche (generatore di funzioni, oscilloscopio, frequenzimetro), sono presentati i fondamenti della misura automatizzata.

### Modulo C – Software di simulazione circuitale

Questo modulo segue in linea ideale quello sulle misure di laboratorio, proponendo l'impiego dei programmi di simulazione, in alternativa alla misura mediante componenti e strumenti di laboratorio.

I due programmi di simulazione Multisim e LabVIEW della National Instruments consentiranno, nei successivi moduli e volumi dell'opera, di effettuare esperienze pratiche, ovunque e in qualsiasi momento, grazie alla loro potenzialità e duttilità.

### Modulo D – Prototipazione mediante breadboard e circuito stampato

Il percorso di progettazione e verifica di un sistema si conclude con la sua realizzazione pratica.

In questo modulo lo studente apprende come progettare il circuito stampato per la saldatura dei componenti e la realizzazione del prototipo circuitale.

### Modulo E – Reti logiche combinatorie e sequenziali

In questo modulo viene approfondita l'elettronica digitale, nelle sue molteplici sfaccettature e nei suoi diversi ambiti applicativi.

### Modulo F – Automi

Gli automi rappresentano la linea di confine tra i sistemi cablati, realizzati con componenti discreti e integrati, e i sistemi ibridi, che prevedono una parte software sovrapposta al substrato hardware, come nella scheda Arduino del successivo modulo. Vengono sondati i principali campi applicativi e le modalità di progettazione, a partire dalla descrizione dei passi compiuti dall'automa mediante diagrammi di stato, per approdare alla sua realizzazione materiale.

### Modulo G – Scheda di programmazione Arduino

Nell'ambito dell'utilizzo dei microcontrolli, Arduino rappresenta una delle migliori interfacce didattiche per rendere agevole la realizzazione di progetti elettronici e di telecomunicazioni. Si presenta come una piccola scheda delle dimensioni di una carta di credito in grado di inviare e ricevere segnali da parte di sensori e attuatori. La trattazione sviluppa sia l'hardware sia il software per poi cimentarsi con i primi semplici ma interessanti progetti.

**RISORSE ONLINE**  [hoepliscuola.it](http://hoepliscuola.it)

Sul sito [www.hoepliscuola.it](http://www.hoepliscuola.it) sono forniti a uso del docente:

- i file risolutivi delle Esercitazioni guidate e dei Progetti sommativi;
- le soluzioni delle verifiche dei contenuti.

## EBOOK+

Apposite icone segnalano nell'eBook+ le risorse digitali integrative:



indica le verifiche che possono essere svolte nell'eBook+ in modo interattivo.

## SOFTWARE

Parte delle applicazioni presenti nel testo può essere implementata mediante il seguente software National Instruments\*:

- NI Circuit Design Suite\*;
- NI LabVIEW\*.

Al momento di questa pubblicazione il software può essere scaricato dal repository <http://www.ni.com/academic/i/download> che comprende tutti i nuovi bundle e suite di software accademico National Instruments e può essere utilizzato da studenti e docenti, previo inserimento del codice di attivazione.

Il codice di attivazione può essere ottenuto collegandosi al sito <http://italy.ni.com/editoria/attivazione>.\*

FABRIZIO CERRI      VITO BONANNO

\* I software citati sono tutti copyright National Instruments Corporation. Tutti i diritti sono riservati. I software possono essere utilizzati unicamente secondo modalità e limiti previsti dalle licenze di National Instruments Corporation, titolare di ogni diritto, cui si rimanda. Né Hoepli, né qualsiasi libro o altri beni o servizi offerti da Hoepli sono pubblicazioni o servizi ufficiali di National Instruments o attribuibili in qualsiasi modo a National Instruments.

# L'OFFERTA DIDATTICA HOEPLI

L'edizione **Openschool** Hoepli offre a docenti e studenti tutte le potenzialità di Openschool Network (ON), il nuovo sistema integrato di contenuti e servizi per l'apprendimento.

## Edizione **OPENSCHOOL**



### LIBRO DI TESTO



Il libro di testo è l'**elemento cardine** dell'offerta formativa, uno strumento didattico **agile** e **completo**, utilizzabile **autonomamente** o in combinazione con il ricco **corredo digitale** offline e online. Secondo le più recenti indicazioni ministeriali, volume cartaceo e apparati digitali **sono integrati in un unico percorso didattico**. Le espansioni accessibili attraverso l'eBook+ e i materiali integrativi disponibili nel sito dell'editore sono puntualmente richiamati nel testo tramite apposite icone.

### eBOOK+



L'**eBook+** è la versione digitale e interattiva del libro di testo, utilizzabile su **tablet, LIM e computer**. Aiuta a comprendere e ad approfondire i contenuti, rendendo l'apprendimento più attivo e coinvolgente. Consente di leggere, annotare, sottolineare, effettuare ricerche e accedere direttamente alle numerose **risorse digitali integrative**.  
→ Scaricare l'eBook+ è molto **semplice**. È sufficiente seguire le istruzioni riportate nell'ultima pagina di questo volume.

### RISORSE ONLINE



Il sito della casa editrice offre una ricca dotazione di **risorse digitali** per l'approfondimento e l'aggiornamento. Nella pagina web dedicata al testo è disponibile **my BookBox**, il contenitore virtuale che raccoglie i materiali integrativi che accompagnano l'opera.  
→ Per accedere ai materiali è sufficiente registrarsi al sito **www.hoepliscuola.it** e inserire il codice coupon che si trova nell'ultima pagina di questo volume. **Per il docente** nel sito sono previste ulteriori risorse didattiche dedicate.

### PIATTAFORMA DIDATTICA



La **piattaforma didattica** è un ambiente digitale che può essere utilizzato in modo duttile, a misura delle esigenze della classe e degli studenti. Permette in particolare di **condividere contenuti** ed **esercizi** e di partecipare a **classi virtuali**. Ogni attività svolta viene salvata sul **cloud** e rimane sempre disponibile e aggiornata. La piattaforma consente inoltre di consultare la versione online degli eBook+ presenti nella propria libreria.  
→ È possibile accedere alla piattaforma attraverso il sito **www.hoepliscuola.it**.

# modulo A

# Componenti passivi e reti elettriche



## Prerequisiti

- Grafici cartesiani
- Potenze dei dieci
- Espressioni e relazioni matematiche

## Conoscenze

- Caratteristiche dei componenti dei circuiti elettronici
- Struttura delle reti elettriche

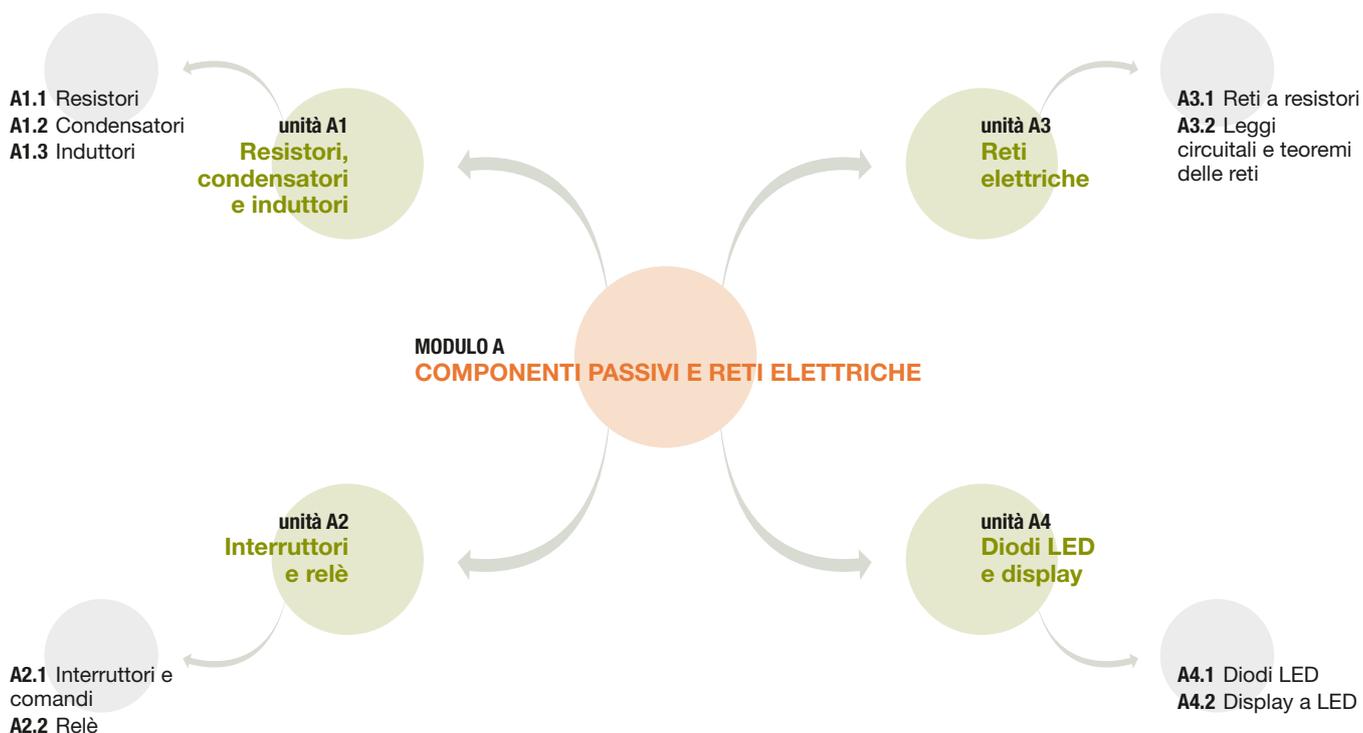
## Abilità

- Selezionare e comparare componenti per circuiti elettronici sulla base delle loro specifiche
- Dimensionare i componenti di una rete elettrica

## Competenze

- Saper dimensionare i componenti elettrici di un progetto
- Saper elaborare uno schema elettrico

In questo modulo si familiarizza con i componenti elettrici di base e si apprende come progettare lo schema di una rete elettrica e calcolare il valore dei suoi componenti.



## CONTENUTI

- A1.1 Resistori
- A1.2 Condensatori
- A1.3 Induttori

# RESISTORI, CONDENSATORI E INDUTTORI

## A1.1 RESISTORI

### Caratteristiche generali

I **resistori** sono dei componenti lineari e passivi, a due o tre terminali (reofori), costruiti per distribuire in modo controllato la **corrente** e la **tensione** nei punti desiderati di un circuito elettrico.

Il loro funzionamento si basa sul fatto che tutti i corpi conduttori oppongono delle difficoltà (resistenza  $R$ ) al passaggio della corrente.

Il parametro caratteristico dei resistori è la **resistenza**, altri parametri caratteristici sono di seguito elencati.

- **Massima potenza**, espressa in watt (W), che il resistore è in grado di dissipare senza che si manifestino alterazioni permanenti nella struttura.
- **Tolleranza**, che rappresenta la deviazione massima del valore della resistenza dal **valore nominale**, e viene espressa dallo scarto percentuale ammesso per il valore reale della resistenza rispetto a quello nominale.
- **Coefficiente di temperatura**, espresso in parti per milione per ogni grado di variazione della temperatura di funzionamento (ppm/°C), che dà informazioni sulla stabilità termica dei resistori stessi.

I resistori sono disponibili sia come componenti singoli, sia come componenti integrati multipli con contenitori **SIP** (*Single In-Line Package*) o **DIP** (*Dual In-Line Package*). Si stanno particolarmente diffondendo i resistori adatti alle realizzazioni **SMT** (*Surface Mount Technology* = tecnologia a montaggio superficiale).

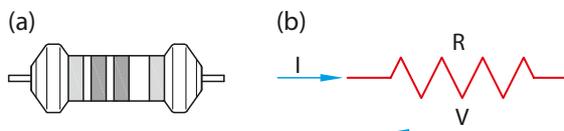
### Caratteristiche elettriche

#### Resistenza

I resistori [fig. A1.1 a-b] vengono caratterizzati dalla **resistenza**, misurata in ohm ( $\Omega$ ). A parità di tensione, quanto maggiore è la resistenza, tanto minore è la corrente. Pertanto, tra resistenza e tensione esiste una proporzionalità inversa, sintetizzata nella **legge di Ohm**, che può essere espressa in tre modi:

- imposta la tensione  $V$  ai terminali del resistore, la sua corrente vale:  $I = V/R$ ;
- nota la corrente  $I$ , la resistenza è sede di una caduta di tensione:  $V = R \cdot I$ ;
- la resistenza  $R$  è il rapporto tra tensione e corrente, ovvero:  $R = V/I$ .

**A1.1** Resistore:  
a) involucro;  
b) simbolo.



## Resistività

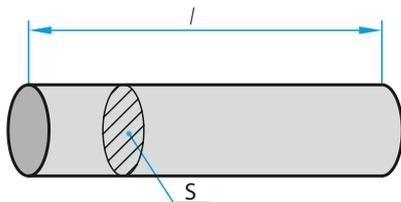
Si può dimostrare che la resistenza di un conduttore è legata alle caratteristiche geometriche [fig. A1.2] e fisiche dello stesso; tale relazione viene espressa con la formula:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

dove:

- $\rho$  = resistività o resistenza specifica del materiale, misurata in ohm · metro ( $\Omega \cdot m$ ) e, praticamente, in ohm · millimetro quadrato/metro ( $\Omega \cdot mm^2/m$ );
- $l$  = lunghezza del conduttore misurata in metri (m);
- $S$  = sezione del conduttore misurata in metri quadrati ( $m^2$ ).

La formula esprime il concetto intuitivo che la resistenza di un conduttore dipende direttamente dalla resistività  $\rho$  e dalla sua lunghezza, mentre è inversamente proporzionale alla sezione, in quanto una maggiore sezione comporta un più libero passaggio delle cariche elettriche.



A1.2 Caratteristiche geometriche del resistore.

## Dipendenza dalla temperatura

A volte nella determinazione del valore della resistenza gioca un ruolo importante la temperatura; infatti la resistenza di un materiale a una certa temperatura  $T$  può essere espressa nel seguente modo:

$$R_T = R_{T_0} [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

dove:

- $T_0$  è la temperatura di riferimento (generalmente  $20\text{ }^\circ\text{C}$ );
- $\alpha$  è il coefficiente di temperatura del materiale, valutato sempre alla temperatura di riferimento  $T_0$ .

## Potenza dissipata

La potenza dissipata, conoscendo la tensione ai capi della resistenza e la corrente che la attraversa, può essere espressa con le formule:

$$P = V \cdot I \quad P = R \cdot I^2 \quad P = V^2/R$$

La potenza massima che può essere dissipata dai resistori diminuisce con l'aumentare della temperatura ambiente. Alla temperatura ambiente  $20 \div 25\text{ }^\circ\text{C}$  la potenza dissipabile è il 100% della potenza nominale  $P_N$  mentre a una temperatura ambiente superiore la potenza dissipabile può annullarsi, per cui il resistore non è più utilizzabile.

La temperatura superficiale di un resistore aumenta in modo non lineare in funzione della potenza dissipata. Pertanto, se il resistore viene impiegato nelle vicinanze di materiali o componenti il cui funzionamento risente fortemente della temperatura (per es., componenti a semiconduttore), esso non può lavorare alla potenza nominale, a causa della temperatura superficiale troppo elevata. L'inconveniente può essere superato se durante il funzionamento i resistori vengono opportunamente raffreddati (ventilazione, immersione in olio).

## Collegamento in serie e parallelo dei resistori

### Collegamento in serie

$N$  resistenze si dicono disposte in serie quando sono interessate dalla medesima corrente [fig. A1.3a].

La resistenza equivalente è data dalla somma delle singole resistenze, ovvero:

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$$

Risolviendo la maglia si ricava infatti che la tensione totale  $V$  è uguale alla somma delle cadute di tensione sulle singole resistenze, che sono attribuibili alla medesima corrente; pertanto:

$$\begin{aligned} V &= V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} + \dots + V_{RN} = \\ &= R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I + \dots + R_N \cdot I = R_{EQ} \cdot I \end{aligned}$$

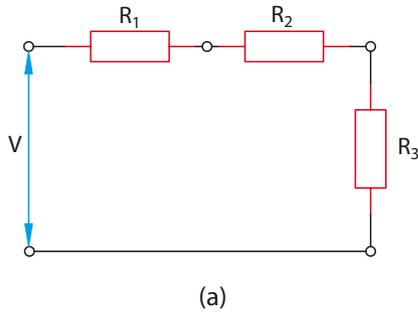
Raccogliendo  $I$  si ricava:

$$(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N) \cdot I = R_{EQ} \cdot I$$

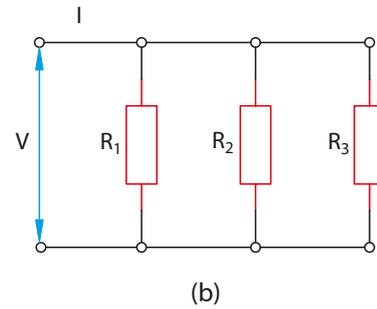
da cui è immediata la formula finale.

### Collegamento in parallelo

$N$  resistenze si dicono disposte in parallelo quando sono interessate dalla medesima tensione [fig. A1.3b].



(a)



(b)

**A1.3** Collegamento di resistori: a) in serie; b) in parallelo.

La resistenza equivalente è data dal reciproco della somma dei reciproci delle singole resistenze:

$$R_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}}$$

Per dimostrare la formula il punto di partenza è l'equazione al nodo nel quale la  $I$  si dirama nelle singole resistenze:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N$$

La corrente  $I$  per la legge di Ohm è uguale al rapporto tra la  $V$  e la resistenza equivalente, mentre la corrente su ciascuna resistenza è uguale al rapporto tra  $V$  e la resistenza stessa:

$$\frac{V}{R_{EQ}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} + \dots + \frac{V}{R_N}$$

Raccogliendo  $V$  ed eliminandola al primo e secondo membro si ricava:

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Calcolando il reciproco di entrambi i membri si dimostra la formula enunciata.

Nel caso di due soli resistori, si ha:

$$R_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}}$$

Pertanto  $R_{EQ}$  è uguale al **rapporto tra il prodotto delle due resistenze e la loro somma**:

$$R_{EQ} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## Tecnologie di fabbricazione

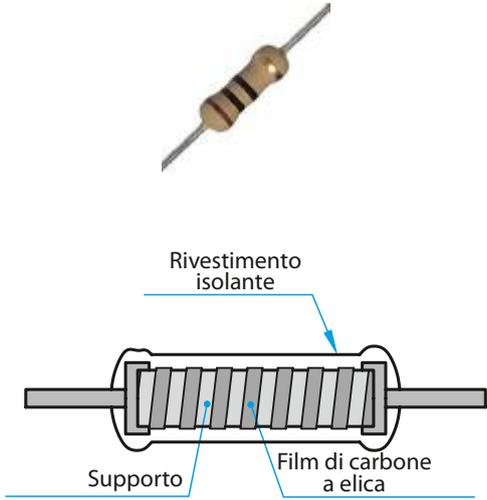
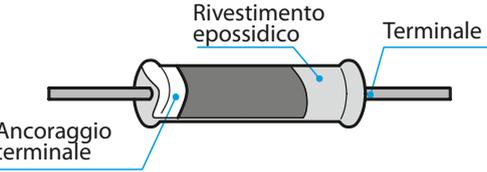
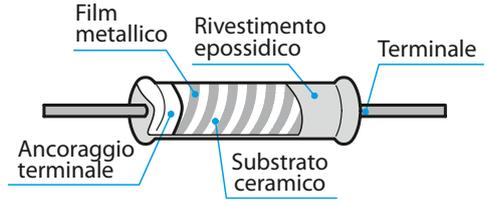
I resistori sono costituiti principalmente dai seguenti quattro elementi distintivi.

1. **L'elemento resistivo**: è la zona che viene attraversata dalla corrente.
2. **Il supporto dell'elemento resistivo**: è costituito da materiali isolanti e serve per sostenere o avvolgere l'elemento resistivo.
3. **Il rivestimento di protezione**: è la parte esterna del resistore che va isolata dall'ambiente circostante.
4. **I terminali** o anche detti **reofori**: rappresentano le estremità del resistore e garantiscono il collegamento elettrico. In particolare, i terminali possono determinare la tecnologia di costruzione del resistore:
  - **THT (Through-Hole Technology)**: il resistore avrà dei terminali simili a dei fili elettrici rigidi in grado di essere posti all'interno dei fori (*hole*) del circuito stampato;
  - **SMT (Surface-Mount Technology)**: i terminali sono rappresentati da stagnature sullo stesso resistore in maniera tale da poter essere montati sul circuito stampato senza fori.

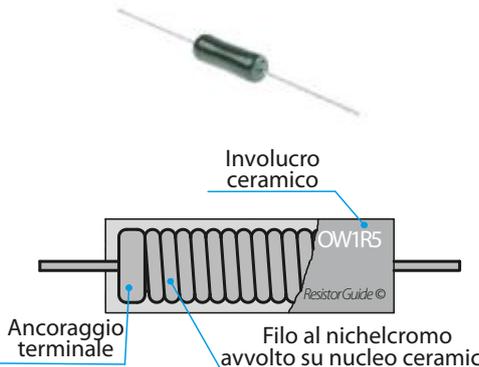
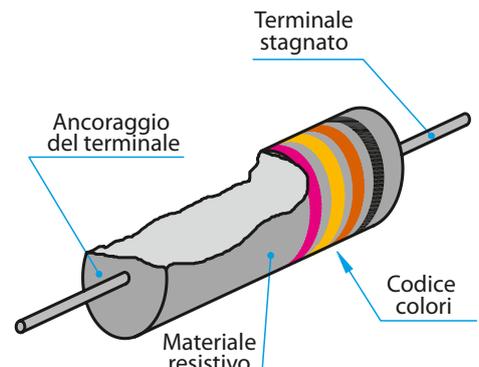
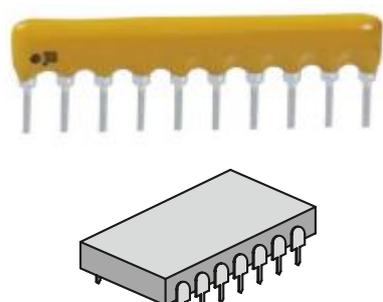
Al variare del materiale usato, i resistori a valore fisso possono essere classificati in relazione all'elemento resistivo che li compone, al rivestimento esterno e al supporto all'elemento resistivo [\[tab. A1.1\]](#).

I resistori commercialmente si possono trovare soltanto in determinati valori discreti (valori standard). Quindi, se dal calcolo di una resistenza si ottiene il valore di 2,6 kΩ, si dovrà cercare il valore corrispondente commerciale più vicino approssimando per eccesso. Di seguito la [tabella A1.2](#) mostra la maggior parte dei valori che si possono trovare in commercio.

**TABELLA A1.1 Tecnologie di fabbricazione dei resistori**

Tipologia	Modalità di costruzione	Caratteristiche elettriche	Immagine
Resistori a strato sottile	<p>Carbone</p> <p>Miscela di polvere di carbonio e di polvere isolante, in proporzioni diverse secondo il valore resistivo desiderato. Lo strato viene prima depositato su un supporto ceramico a forma cilindrica, poi viene parzialmente asportato fino a lasciare un percorso avvolto a elica per ottenere il valore desiderato</p>	<p>Resistenza: 1-10 MΩ                      Potenza: 1/8, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2 W                      Tolleranza: 1-20%</p>	
	<p>Metallico</p> <p>Miscela di metallo e di ossido, in proporzioni diverse secondo il valore resistivo desiderato. La tecnica costruttiva è simile a quella impiegata per i resistori a strato di carbonio</p>	<p>Resistenza: 10-1 MΩ                      Potenza: 1/4-0,6 W                      Tolleranza: 1%</p>	
	<p>Ossido metallico</p> <p>La miscela utilizzata è di metallo (di solito stagno) e di ossido, che viene depositato su un supporto isolante</p>	<p>Resistenza: 1-470 kΩ                      Potenza: 1-2 W                      Tolleranza: 0,5-2%</p>	
Resistori a strato spesso	<p>Metal Glaze</p> <p>Rispetto ai resistori a film sottile hanno uno spessore di circa 100 volte superiore. Sono costruiti a partire da una miscela di particelle di metallo e di polvere di vetro. Hanno una migliore risposta in frequenza. Sono meno stabili rispetto a quelli a strato. Il loro aspetto è simile ai resistori a strato sottile</p>	<p>Resistenza: 0,4-3 MΩ                      Potenza: 1/2-3 W                      Tolleranza: 0,5-2%</p>	
	<p>Cermet</p> <p>La miscela è composta da una serie di metalli nobili, leganti ceramici e diverse resine. Anche questa tipologia ha un'ottima risposta in frequenza</p>	<p>Resistenza: 0,1-100 kΩ                      Tolleranza: 0,001-20%                      Potenza: 5-20 W</p>	

**TABELLA A1.1** Tecnologie di fabbricazione dei resistori

Tipologia	Modalità di costruzione	Caratteristiche elettriche	Immagine
Resistori a filo avvolto	Smaltati Sono costruiti con un filo o con un nastro metallico, di solito nichelcromo, avvolto su supporto isolante smaltato. Consentono di ottenere solo valori resistivi relativamente bassi ma con potenze molto alte. Sono piuttosto costosi e l'elevato valore di induttanza parassita ne limita l'impiego alle radiofrequenze	Resistenza: 0,1 $\Omega$ -100 k $\Omega$ Tolleranza: 0,001 - 20% Potenza: 10-100 W Frequenze < 50 KHz	
	Cementati Il supporto è protetto da una pasta di cemento resistente alle alte temperature	Resistenza: 0,1-100 k $\Omega$ Potenza: 2-20 W Tolleranza: 10%	
	Blindati L'involucro esterno è costituito da una struttura di alluminio alettata per dissipare il calore ad alte potenze	Resistenza: 0,01 - 1,8 k $\Omega$ Potenza: 5-500 W Tolleranza: 5%	
Resistori SMD (Surface-Mount Device)	Realizzati da un substrato ceramico sul quale viene depositato uno strato sottile di materiale resistivo. Utilizzati su circuiti stampati e montati da macchine Pick and Place	Resistenza: 1-10 M $\Omega$ Potenza: 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 W Tolleranza: 1%	
Resistori a impasto	Miscela di polvere di carbonio e di polvere isolante, in proporzioni diverse secondo il valore resistivo desiderato. Ormai in disuso	Resistenza: fino a M $\Omega$ Potenza: fino a 2 W Tolleranza: 5% - 10-20%	
Reti resistive	Vengono forniti in forma integrata per una maggiore miniaturizzazione, in contenitori SIP o DIP, oppure nella versione per soluzioni SMT	Resistenza: 100-4,7 k $\Omega$ Potenza: 1/8, 1/4, 1/5 W Tolleranza: 5%	

**TABELLA A1.2 Valori comuni dei resistori**

											1 Ω
1,2 Ω	1,5 Ω	1,8 Ω	2,2 Ω	2,7 Ω	3,3 Ω	3,9 Ω	4,7 Ω	5,6 Ω	6,8 Ω	8,2 Ω	10 Ω
12 Ω	15 Ω	18 Ω	22 Ω	27 Ω	33 Ω	39 Ω	47 Ω	56 Ω	68 Ω	82 Ω	100 Ω
120 Ω	150 Ω	180 Ω	220 Ω	270 Ω	330 Ω	390 Ω	470 Ω	560 Ω	680 Ω	820 Ω	1 kΩ
1,2 kΩ	1,5 kΩ	1,8 kΩ	2,2 kΩ	2,7 kΩ	3,3 kΩ	3,9 kΩ	4,7 kΩ	5,6 kΩ	6,8 kΩ	8,2 kΩ	10 kΩ
12 kΩ	15 kΩ	18 kΩ	22 kΩ	27 kΩ	33 kΩ	39 kΩ	47 kΩ	56 kΩ	68 kΩ	82 kΩ	100 kΩ
120 kΩ	150 kΩ	180 kΩ	220 kΩ	270 kΩ	330 kΩ	390 kΩ	470 kΩ	560 kΩ	680 kΩ	820 kΩ	1 MΩ
1,2 MΩ	1,5 MΩ	1,8 MΩ	2,2 MΩ	2,7 MΩ	3,3 MΩ	3,9 MΩ	4,7 MΩ	5,6 MΩ	6,8 MΩ	8,2 MΩ	10 MΩ

### Codice dei colori

Il codice dei colori per i resistori [fig. A1.4] permette di determinare il valore nominale della resistenza, la tolleranza e, in qualche caso, il coefficiente di temperatura.

- Il valore nominale è determinato dai colori delle prime tre (o quattro) bande; le prime due (o tre) esprimono i valori in ohm (Ω), mentre la terza o la quarta esprimono il fattore per cui bisogna moltiplicare il valore precedente per ottenere il valore nominale della resistenza.
- La tolleranza è espressa dalla quarta o quinta banda. Nella sesta banda vi può essere definito il coefficiente di temperatura.

### Codice a quattro bande

Le prime tre bande definiscono il valore nominale della resistenza, mentre la quarta banda individua la tolleranza rispetto al valore nominale stesso.

- Alla prima banda è associata la prima cifra.
- Alla seconda banda la seconda cifra.
- Alla terza banda è associato il fattore (potenza di 10) che moltiplica il numero individuato dalle due cifre associate alle prime due bande.

Per esempio, alla sequenza giallo (4), viola (7), marrone (10) corrisponde il valore resistivo di  $47 \times 10 = 470 \Omega$ .

Codice a 4 bande

Colore	1ª banda	2ª banda	3ª banda	Moltiplicatore	Tolleranza
Nero	0	0	0	1 Ω	
Marrone	1	1	1	10 Ω	± 1% (F)
Rosso	2	2	2	100 Ω	± 2% (G)
Arancione	3	3	3	1 kΩ	
Giallo	4	4	4	10 kΩ	
Verde	5	5	5	100 kΩ	± 0,5% (D)
Blu	6	6	6	1 MΩ	± 0,25% (C)
Viola	7	7	7	10 MΩ	± 0,10% (B)
Grigio	8	8	8		± 0,05%
Bianco	9	9	9		
Oro				0,1	± 5% (J)
Argento				0,01	± 10% (K)

Codice a 5 bande

470 Ω ± 10%

3320 kΩ ± 5%

**A1.4** Codice dei colori per i resistori.

Se la quarta banda è di color argento (10%), il costruttore garantisce che il valore effettivo di resistenza è compreso tra  $(470 + 47)$  e  $(470 - 47)$   $\Omega$ , cioè tra 423 e 517  $\Omega$ .

### Codice a cinque bande

Le prime quattro bande definiscono il valore nominale delle resistenze, mentre la quinta banda individua la tolleranza rispetto al valore nominale stesso.

Alla prima banda è associata la prima cifra; alla seconda banda la seconda cifra; alla terza banda la terza cifra; alla quarta banda è associato il fattore che moltiplica il numero individuato dalle tre cifre associate alle prime tre bande.

Così, per esempio, alla sequenza arancione (3), arancione (3), rosso (2), giallo (10.000) corrisponde il valore resistivo di  $332 \times 10.000 = 3.320.000 \Omega = 3320 \text{ k}\Omega$ . Se la quinta banda è di color oro (5%), il costruttore garantisce che il valore effettivo di resistenza è compreso tra  $(3320 + 166)$  e  $(3320 - 166)$   $\Omega$ , cioè tra 3486 e 3154  $\Omega$ .

### Potenzimetri

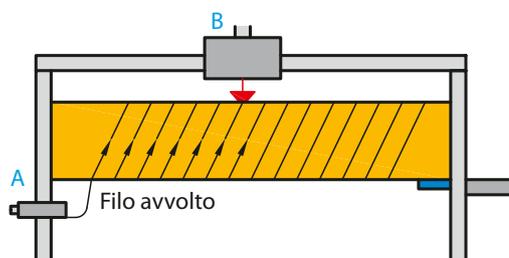
I potenziometri sono resistori variabili a variazione meccanica utilizzati principalmente per variare l'intensità di un segnale analogico. Si pensi per esempio alla regolazione del volume audio di un amplificatore Hi-Fi. Si annoverano i **reostati** (a due terminali), i **potenziometri** (a tre terminali) e i **trimmer**, questi ultimi miniaturizzati e adatti al montaggio su circuito stampato.

La **figura A1.5** mostra, in alto, un potenziometro tipicamente disponibile in versione da 1/2 W di potenza massima e un potenziometro doppio in versione monoalbero con comando unico per i due resistori; in basso, un trimmer per cablaggio verticale e uno per cablaggio orizzontale.

### Schema elettrico

Lo schema elettrico del potenziometro e del reostato è il medesimo, ma è diversa la funzionalità.

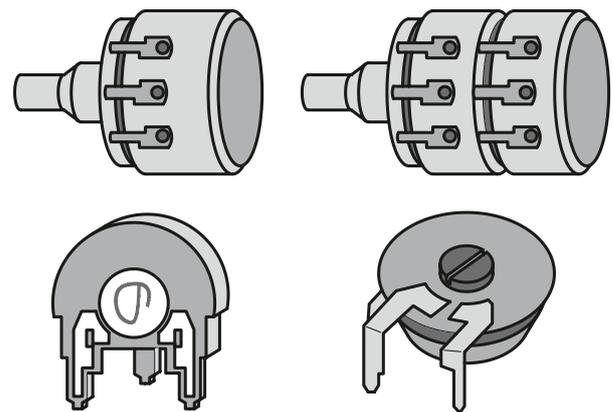
- **Potenziometro [fig. A1.6]:** tra A e C scorre corrente; il cursore C preleva la tensione  $V_{CB}$  oppure  $V_{CA}$  parzializzate.



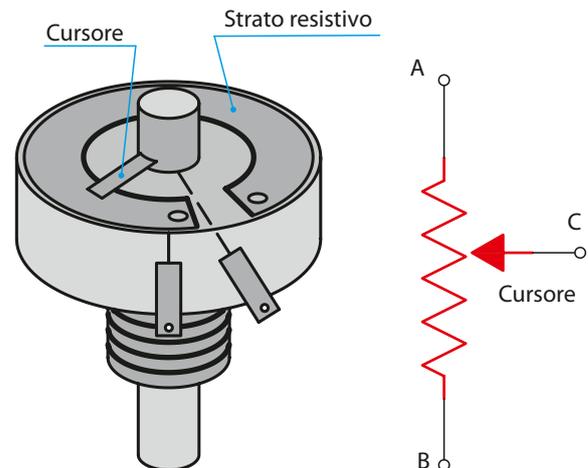
- **Reostato [fig. A1.7]:** la corrente scorre solo tra A e B e la tensione  $V_{BA}$  dipende dalla posizione del cursore B.

### Partitore resistivo

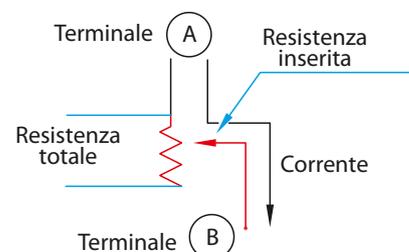
Il partitore resistivo, come suggerisce il termine, serve a parzializzare la tensione ripartendola in due parti. Come evidenziato dalla **figura A1.8**, la tensione totale  $V$  viene applicata ai capi dell'intero resistore di valore  $R$  mentre la tensione parzializzata  $V_U$  viene prelevata dalla porzione più piccola  $r$ .



**A1.5** Tipi di potenziometri.



**A1.6** Schema elettrico del potenziometro.



**A1.7** Schema elettrico del reostato.

Si può dimostrare che risulta:

$$V_U = V \cdot \frac{r}{R + r}$$

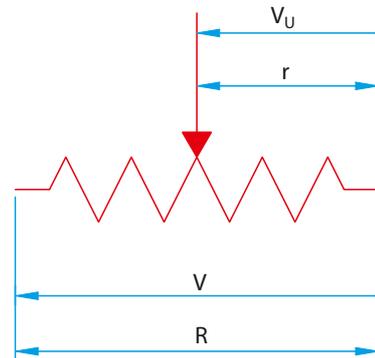
In particolare, variando la posizione del cursore si possono ricavare le seguenti tensioni d'uscita:

- cursore a destra:  $V_U = 0$ ;
- cursore al centro:  $V_U = V/2$ ;
- cursore a sinistra:  $V_U = V$ .

### Tipologie di potenziometri

I potenziometri in commercio si possono trovare in diversa dimensione e geometria in relazione alle necessità fisiche del progetto da realizzare [tab. A1.3]. Le caratteristiche intrinseche sono da rimandare sostan-

zialmente al valore nominale, alla tolleranza e alla resistenza di isolamento.



A1.8 Partitore resistivo.

**TABELLA A1.3** Tipologie di potenziometri

Tipologia	Descrizione	Immagine	
Potenziometri rotativi	Rotazione singola	L'asse può essere ruotato approssimativamente di 270°	
	Rotazione doppia	Due potenziometri sono collegati insieme per consentire una variazione simultanea	
	Multigiro	Può effettuare rotazioni multiple (5, 10, 20) per ottenere una regolazione più precisa	
	Trimmer	Potenziometri miniaturizzati per regolazioni statiche su schede elettroniche. Possono essere a rotazione singola o a rotazione multipla	

**TABELLA A1.3** Tipologie di potenziometri

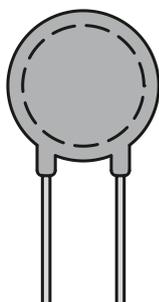
Tipologia	Descrizione	Immagine	
Potenziometri lineari o a slitta	Slitta singola	Un asse lineare viene regolato da un estremo all'altro. Utilizzato principalmente per applicazioni audio	
	Slitta doppia	Due potenziometri lineari sono collegati insieme per una variazione contemporanea	
	Slitta multigiro	Viene aumentata la precisione di regolazione	
Potenziometri motorizzati	Angolari e lineari	Tramite il collegamento di un piccolo motore la regolazione può essere effettuata anche in maniera elettronica	

### Altri tipi di resistori variabili

La variazione di resistenza nei potenziometri sinora trattati è dovuta a movimenti meccanici. Tuttavia, nel mercato sono presenti resistori variabili che variano la propria resistenza al variare di altre grandezze fisiche.

#### Resistori a variazione termica

Sono disponibili resistori per termometria PTC (*Positive Temperature Coefficient*) [fig. A1.9] realizzati con materiali metallici (tipicamente il platino) e caratterizzati da coefficiente di temperatura positivo. I termistori NTC (*Negative Temperature Coefficient*)

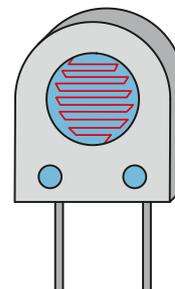


**A1.9** Resistore a variazione termica.

sono realizzati con materiale semiconduttore e hanno coefficiente di temperatura negativa.

#### Resistori a variazione ottica

Sono anche chiamati fotoresistori o LDR (*Light Dependent Resistor*) [fig. A1.10]; impiegano materiale fotoconduttivo, la cui resistività diminuisce rapidamente con la luce.



**A1.10** Fotoresistore.

#### Resistori a variazione magnetica

La loro resistenza varia al variare del campo magnetico applicato [fig. A1.11]. Quando l'intensità del campo

magnetico aumenta, la resistenza aumenta. La relazione di proporzionalità è diretta.

### Resistori a variazione di forza

Il nome stesso suggerisce che questo tipo di resistori variano il loro valore al variare della forza applicata [fig. A1.12]. Sono anche chiamati sensori di forza (*Force Sensitive Resistor*). La resistenza diminuisce all'aumentare della forza applicata. Viene utilizzato solitamente in ambiti automotive e in applicazioni robotiche.

### Resistori a variazione di flessione

Chiamati anche sensori di flessione, variano la loro resistenza al variare della flessione esercitata [fig. A1.13]. La resistenza aumenta all'aumentare dell'angolo di piegatura.

## A1.2 CONDENSATORI

Il condensatore [fig. A1.14 a-b] è un componente in grado di immagazzinare energia elettrica; è costituito da due conduttori separati da un dielettrico. I due conduttori, che praticamente si realizzano mediante lastre, lamine e nastri metallici, prendono il nome di **armature** del condensatore. Il **dielettrico** può essere un materiale isolante di varia natura.

### Capacità

Nella figura A1.15 è rappresentata la struttura di principio di un condensatore piano. Applicando una ten-

sione continua  $V$  ai morsetti di un condensatore, sulle sue armature si accumulano due cariche uguali e opposte  $+Q$  e  $-Q$ . La carica  $Q$  accumulata da un condensatore aumenta in modo proporzionale alla tensione  $V$  applicata. Si definisce capacità  $C$  di un condensatore il rapporto fra la carica  $Q$  e la tensione  $V$ :

$$C = \frac{Q}{V}$$

La capacità del condensatore misura la sua attitudine a immagazzinare cariche elettriche. È paragonabile, con una analogia termica, al riscaldamento di un ambiente, nel quale la temperatura del calorifero è assimilabile alla tensione, la carica è il calore trasferito all'ambiente e la capacità è l'attitudine dell'ambiente ad accumulare calore. Quanto maggiore è la dimensione dell'ambiente, tanto maggiore è la sua capacità.

I condensatori commercialmente disponibili sono caratterizzati da capacità che variano da pochi picofarad (pF) ad alcuni millifarad (mF).

### Costante dielettrica

Nel caso di un condensatore piano il valore della capacità si ottiene dalla seguente formula:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

dove  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m è la **costante dielettrica del vuoto**;  $\epsilon_r$  è un numero puro, detto **costante dielettrica relativa** (rispetto al vuoto) e caratteristico di ogni ma-

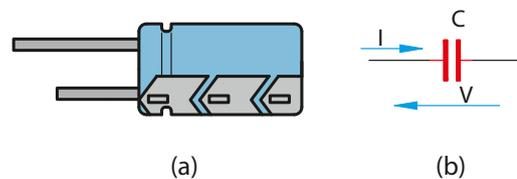
A1.11 Resistore a variazione magnetica.



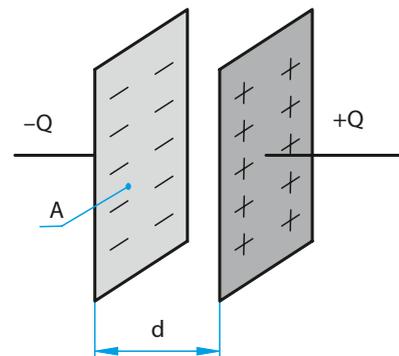
A1.12 Resistore a variazione di forza.



A1.13 Resistore a variazione di flessione.



A1.14 Condensatore: a) involucro; b) simbolo.



A1.15 Struttura di principio di un condensatore.

teriale isolante;  $A$  è l'area di una singola armatura e  $d$  è la distanza tra le armature.

Il dielettrico è un materiale non conduttore che viene inserito tra le armature del condensatore per aumentarne la capacità, a parità di dimensioni.

## Relazione tensione-corrente

La corrente che attraversa un condensatore non è determinata da un passaggio di cariche elettriche tra un'armatura e l'altra, in quanto ciò è reso impossibile dalla presenza del dielettrico.

Nel circuito che ospita il condensatore invece è presente una corrente dovuta al trasferimento delle cariche accumulate dalle armature; questa corrente è la variazione di cariche  $\Delta Q$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ , pertanto:

$$i_C = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Considerato il legame tra carica e tensione  $\Delta Q = C \cdot \Delta V$ , valido anche per le variazioni, si ha:

$$i_C = C \cdot \frac{\Delta v_C}{\Delta t}$$

Non esiste dunque un legame algebrico **diretto** tra tensione e corrente, ma la corrente dipende dalla **velocità** di variazione della tensione.

## Parametri caratteristici

I condensatori possono avere valore capacitivo fisso o variabile. La variazione della capacità può essere provocata da azioni meccaniche, come la rotazione di un albero o quella di una vite.

I condensatori sono caratterizzati da alcuni parametri specifici, di seguito elencati.

- **Capacità nominale:** è la capacità del condensatore al momento della fabbricazione. Il valore è espresso in farad.
- **Massima tensione di esercizio:** è la massima differenza di potenziale che può essere applicata tra le armature.
- **Tolleranza:** espressa dallo scarto percentuale ammesso per il valore reale della capacità rispetto a quello nominale.
- **Coefficiente di temperatura:** espresso in parti per milione per ogni grado di variazione della temperatura di funzionamento (ppm/°C).

I condensatori sono disponibili sia come componenti singoli, sia in forma integrata, in particolare con contenitori **SIP** (*Single In-line Package*).

## Collegamento in parallelo e in serie

Le configurazioni fondamentali sono il collegamento in parallelo e quello in serie.

### ▪ Condensatori in parallelo [fig. A1.16a]

La tensione è in comune ai tre condensatori, pertanto:

$$V = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3}$$

La carica totale è la somma delle cariche, ovvero:

$$Q_T = C_1 \cdot V + C_2 \cdot V + C_3 \cdot V$$

Raccogliendo  $V$  si ricava la capacità equivalente:

$$Q_T = (C_1 + C_2 + C_3) \cdot V = C_{EQ} \cdot V$$

La capacità equivalente  $C_{EQ}$  è pertanto la somma delle singole capacità.

$$C_{EQ} = C_1 + C_2 + C_3$$

### ▪ Condensatori in serie [fig. A1.16b]

La carica è in comune ai tre condensatori, pertanto:

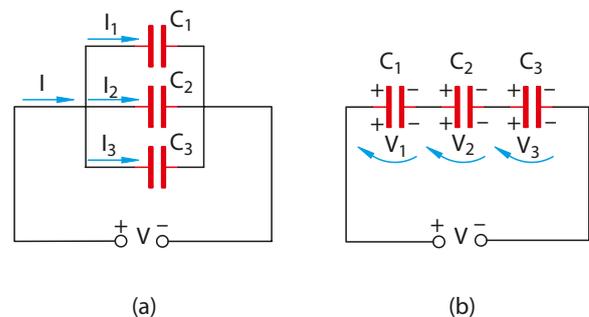
$$V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad V_2 = \frac{Q}{C_2} \quad V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

La tensione totale è la somma delle singole tensioni, ovvero:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = Q \cdot \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

La capacità equivalente, in base alla formula  $Q = C_{EQ} \cdot V$  vale dunque:

$$C_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$



**A1.16** Collegamento di condensatori: a) in parallelo; b) in serie.

## Tecnologie di fabbricazione

I condensatori sono realizzati con dielettrico a mica, ceramico, a carta impregnata, plastico o elettrolitico. I condensatori variabili hanno di solito dielettrico ad aria. Applicazioni particolari, come il back-up temporaneo per le memorie dei computer, hanno richiesto la realizzazione di condensatori con capacità dell'ordine del farad, impensabile nei decenni passati. Sono disponibili versioni adatte alle realizzazioni SMT (*Surface-Mount Technology*).

Secondo il materiale usato per realizzare il dielettrico, i condensatori a **capacità fissa** possono essere classificati come indicato qui di seguito.

### ■ Condensatori a mica [fig. A1.17a]

Una serie di armature opportunamente connesse e una serie di strati isolanti vengono racchiusi in contenitori con forma di parallelepipedo oppure a goccia. Si ottengono valori di capacità tipicamente compresi fra 1 pF e 10 nF, tolleranza compresa tra 1% e 5% e tensione di lavoro piuttosto contenuta.

### ■ Condensatori ceramici [fig. A1.17b]

Vengono realizzati con tecniche analoghe a quelle dei condensatori a mica; il dielettrico è ceramico a bassa costante dielettrica ( $K = 6$ ) per le versioni *molded* (capacità tipicamente compresa tra 1 pF e 10 nF, tolleranza anche molto bassa, 0,5%), mentre è a elevata costante dielettrica ( $K = 8000$ ) per le versioni *dipped* (capacità tra 1 pF e 100 nF, tolleranze molto elevate, anche superiori al 50%). Sono disponibili anche versioni SIP (*Single In-line Package*).

### ■ Condensatori a carta [fig. A1.17c]

Vengono realizzati avvolgendo strati alternati di carta paraffinata e di sottili fogli di alluminio, fino a formare una struttura tubolare con terminali assiali o radiali. Si ottengono valori di capacità tipicamente compresi tra 1 pF e 1  $\mu$ F, tolleranze del 10%, tensioni di lavoro elevate. Sono stati in pratica sostituiti dai condensatori plastici.

### ■ Condensatori plastici [fig. A1.17d]

La carta viene sostituita da strati di mylar, teflon, polipropilene e policarbonato. Si ottengono valori di capacità anche elevati, tipicamente compresi tra 1 pF e 10  $\mu$ F, tolleranze tra il 5% e il 10% e tensioni di lavoro piuttosto alte.

### ■ Condensatori elettrolitici [fig. A1.17e]

Hanno una struttura simile a quella dei condensatori plastici; tra due sottili fogli di alluminio viene inserita una garza imbevuta con un liquido elettrolitico.

Con l'applicazione di un'opportuna tensione continua, lo strato di alluminio collegato al polo positivo (anodo) si ossida, formando così un condensatore con dielettrico sottilissimo e quindi capacità molto elevata, ma polarizzato.

Gli strati di alluminio possono essere sostituiti da strati di tantalio: tale soluzione consente di ottenere risultati migliori per quando riguarda i valori di capacità (più alti), il tempo di stoccaggio, il range di temperatura, la stabilità termica e la robustezza, a fronte però di costi più elevati.

Tutti i condensatori elettrolitici hanno tolleranze elevate, fino al 50%; i valori di capacità sono tipicamente compresi tra 1  $\mu$ F e 1 mF. Soluzioni particolari consentono oggi di raggiungere capacità dell'ordine del farad.

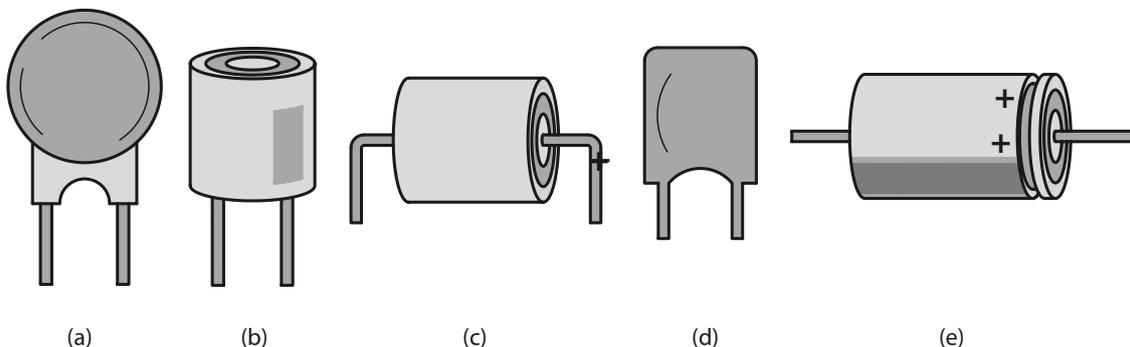
I condensatori a **capacità variabile** possono essere classificati in due categorie.

### ■ Condensatori variabili [fig. A1.18]

Comprendono due strutture metalliche (armature), dette rotore e statore, che possono essere più o meno affacciate secondo la rotazione impressa a un albero, consentendo in tal modo di variare la capacità, tipicamente compresa tra alcuni picofarad e alcune centinaia di picofarad. Il dielettrico tipico è l'aria.

### ■ Condensatori tarabili (*trimmers*) [fig. A1.19]

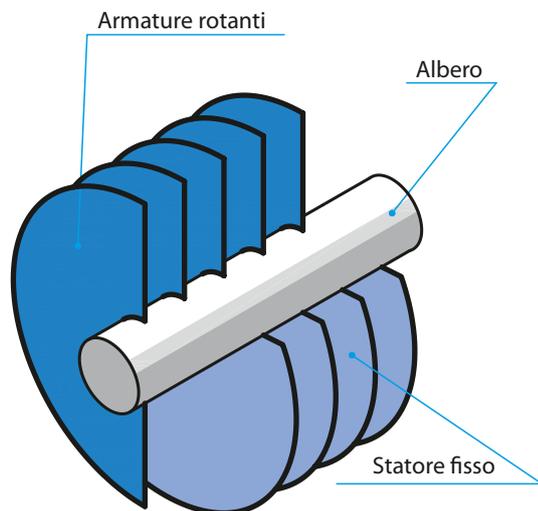
Di solito hanno dielettrico costituito da mica, materiali ceramici o plastici; la capacità viene modificata



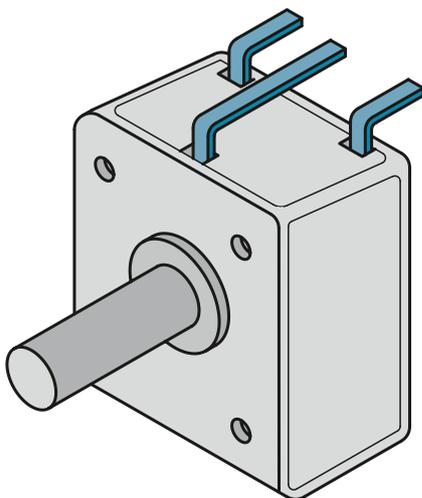
**A1.17** Tipi di condensatori: a) a mica; b) ceramico; c) a carta; d) plastico; e) elettrolitico.

ruotando una vite, che consente di variare la distanza tra le armature oppure di modificarne la superficie affacciata. La capacità varia tipicamente tra qualche picofarad e qualche decina di picofarad.

I condensatori a capacità variabile sono particolarmente usati nelle operazioni di taratura dei sistemi a radiofrequenza.



A1.18 Condensatore variabile.



A1.19 Condensatore tarabile.

## Codici di identificazione

Alcuni dei parametri caratteristici dei condensatori vengono riportati sul package di ogni condensatore. In particolare è necessario conoscere soprattutto il suo valore di capacità e la tensione massima di esercizio.

In alcuni casi riconoscere i parametri è piuttosto semplice, in altri invece, a causa delle ridotte dimensioni,

è necessario adottare dei codici precisi di identificazione.

- **Condensatori elettrolitici:** sul corpo è possibile leggere in chiaro il valore della capacità con relativi unità di misura, la tensione massima di esercizio in volt, il valore della tolleranza indicata da una lettera (per esempio J = 5%, K = 10%, M = 20%) e il polo negativo indicato da una banda nera.
- **Condensatori plastici e ceramici:**
  - codice a tre cifre: la prima e la seconda cifra indicano il valore numerico, la terza il moltiplicatore. L'unità di misura è il pF (esempio: 223 J =  $22 \times 10^3$  pF = 22 nF con tolleranza 5%; 151 K =  $15 \times 10^1$  pF = 150 pF con tolleranza 10%);
  - codice alfanumerico: la lettera *n* indica la posizione della virgola. La lettera indica anche l'unità di misura (nF). Vi è presente anche una seconda lettera che sta a indicare la tolleranza. Infine, gli ultimi numeri identificano la massima tensione d'esercizio in volt (esempio: 3N3J100 = 3,3 nF con tolleranza del 5% e tensione massima di 100 V).

## Carica e scarica del condensatore

Quando un condensatore viene collegato a un generatore di tensione continua  $V$ , la corrente elettrica inizia a circolare nel circuito; le cariche elettriche vanno ad accumularsi sulle armature del condensatore e al tempo stesso la tensione ai suoi capi  $v_c(t)$  aumenta proporzionalmente alla quantità di carica trasportata dalla corrente.

Questo processo continua fino a che la tensione fra le armature del condensatore non raggiunge il valore della forza elettromotrice del generatore; a questo punto l'equilibrio fra le tensioni impedisce l'ulteriore passaggio di cariche elettriche.

L'intervallo di tempo che compete allo sviluppo di questi fenomeni viene definito **transitorio di carica** del condensatore.

## Costante di tempo

Si può dimostrare che il transitorio di carica dipende dalla resistenza ohmica del circuito (sempre presente in un circuito reale) e dal valore della capacità.

Si supponga, a parità di altri parametri, di incrementare la resistenza del circuito elettrico; in tale caso aumenta anche la resistenza che il circuito oppone al passaggio delle cariche elettriche e di conseguenza diminuisce il valore della corrente elettrica che fluisce nel circuito.

Se diminuisce la corrente, diminuisce anche il numero di cariche elettriche in moto nel circuito e quindi sarà necessario un tempo maggiore perché questa

nuova corrente, di valore minore, sia in grado di accumulare la stessa quantità di carica sul condensatore. Se, sempre a parità di altri parametri, si suppone di incrementare il valore della capacità, allora aumenta la quantità di carica che il condensatore può accumulare e quindi, a parità di tensione applicata, sarà necessario un intervallo di tempo maggiore per averne la completa carica.

Si capisce che la resistenza del circuito ( $R$ ) e la sua capacità ( $C$ ) sono due parametri che influenzano il tempo di carica. Si definisce **costante di tempo** il prodotto:

$$\tau = R \cdot C$$

Da quanto affermato si comprende che la costante di tempo, misurata in secondi, rappresenta un indice della velocità di carica/scarica del condensatore e si può dimostrare che dopo un intervallo di tempo pari a 5 volte  $\tau$  la tensione sul condensatore è pari a circa il 99,3% della tensione del generatore; è quindi consuetudine considerare il transitorio esaurito dopo tale intervallo di tempo.

I condensatori possono essere immaginati come delle batterie momentanee. Vengono caricate da una tensione esterna costante, raggiungono la massima capacità di carica consentita dalle loro caratteristiche fisiche, successivamente forniscono corrente al circuito a essi collegato a una velocità molto più alta rispetto a quella fornita dalle pile in commercio. Per questo motivo i condensatori vengono anche utilizzati in dispositivi quali flash o dispositivi elettronici che hanno bisogno di un impulso di corrente immediato. D'altra parte, con le considerazioni del caso, si possono ottenere costanti di tempo molto più basse che permettono di livellare segnali altrimenti incostanti.

### Analisi della carica del condensatore

Per carica del condensatore si intende l'andamento della sua tensione dall'istante iniziale  $t = 0$  per un tempo infinito ( $t \rightarrow \infty$ ). Non ha senso parlare di carica del condensatore senza ipotizzare la presenza di una resistenza in serie, sia perché qualsiasi tratto di conduttore possiede una benché minima resistenza, sia perché con resistenza teoricamente nulla il condensatore si caricherebbe all'istante con corrente infinita, quindi infinitamente distruttiva.

Si ipotizza allora il circuito  $RC$  alimentato dalla batteria  $E$  attraverso la resistenza  $R$  come nella **figura A1.20**.

■ **Andamento della tensione  $v_c(t)$  [fig. A1.21]**

L'incremento della tensione sul condensatore è di tipo esponenziale, come mostrato nella **figura A1.21**.

La relazione che descrive il transitorio è la seguente:

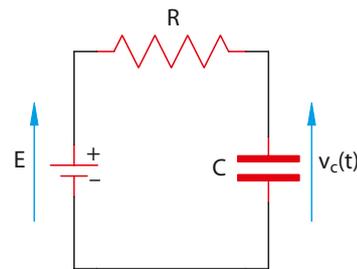
$$v_c(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

■ **Andamento della corrente  $i_c(t)$  [fig. A1.22]**

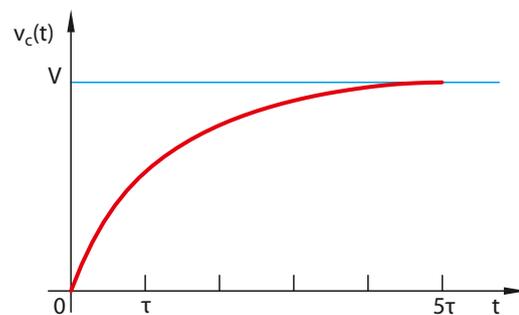
Si suppone che il condensatore sia scarico quando viene collegato al circuito; ciò comporta che la corrente è limitata solamente dalla resistenza ohmica del circuito stesso. La corrente assume quindi inizialmente il valore:

$$I_0 = \frac{V}{R}$$

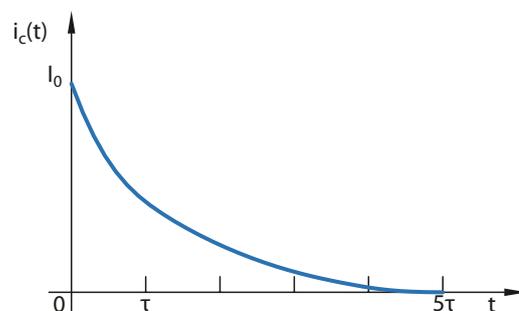
Quando il condensatore si carica, la tensione fra le armature aumenta e fa diminuire la differenza di potenziale fra il generatore e il condensatore; per questo



**A1.20** Carica del condensatore.



**A1.21** Tensione nella carica del condensatore.



**A1.22** Corrente nella carica del condensatore.

motivo la corrente inizia a diminuire e può essere calcolata in ogni istante attraverso la seguente relazione:

$$i_c(t) = \frac{E - v_c(t)}{R}$$

Sostituendo  $v_c(t)$  si ricava l'espressione della corrente:

$$i_c(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

### Analisi della scarica del condensatore

Dopo la fine del transitorio di carica si suppone di scollegare il condensatore dal generatore e di collegarlo poi a un circuito di scarica formato da un semplice resistore [fig. A1.23]. La tensione sul condensatore decresce esponenzialmente a partire dalla tensione  $V_0$  a cui il condensatore è caricato, come visualizzato nella figura A1.24.

Allo stesso modo decresce la corrente [fig. A1.25] che ha come valore iniziale  $I_0$  che si ottiene come rapporto fra la tensione sul condensatore e la resistenza del circuito di scarica. Le equazioni che regolano la scarica del condensatore sono le seguenti:

$$v_c(t) = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

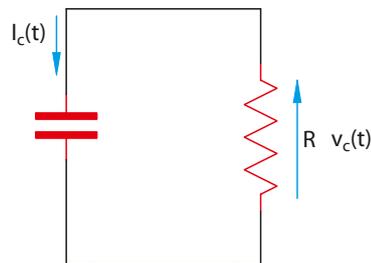
$$i_c(t) = -\frac{V_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Il segno meno (-) nell'equazione della corrente tiene conto del fatto che la corrente che circola nel circuito ha segno contrario rispetto a quella di carica.

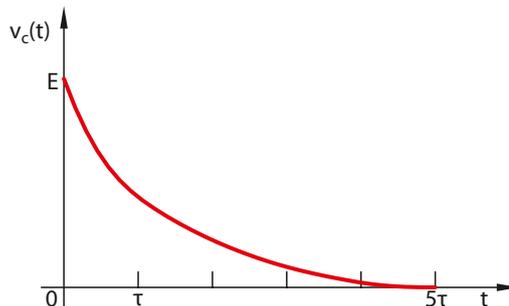
## A1.3 INDUTTORI

### Caratteristiche generali

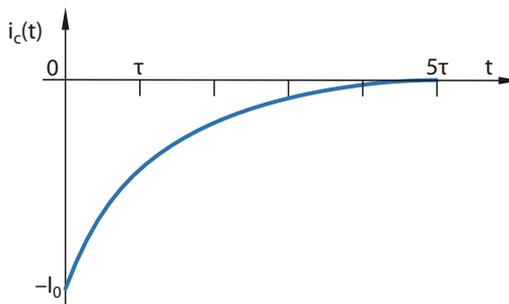
Gli induttori sono dei componenti a due terminali, lineari e passivi, caratterizzati dall'**induttanza**, espressa in **henry (H)**. Un induttore consiste semplicemente in una spirale di filo conduttore. Quando è attraversato da corrente viene generato un campo magnetico autoindotto che aiuta a immagazzinare la corrente elettrica per un breve periodo di tempo e anche se la tensione ai suoi capi è rimossa. Quando il campo magnetico attorno alla bobina collassa, la corrente elettrica termina. Possono avere valore induttivo fisso o variabile. La variazione del valore di induttanza è di solito provocata da azioni meccaniche che regolano,



A1.23 Circuito di scarica del condensatore.



A1.24 Tensione nella scarica del condensatore.



A1.25 Corrente nella scarica del condensatore.

attraverso soluzioni di scorrimento o di avvitamento, l'inserzione di un nucleo all'interno dell'avvolgimento del filo.

Gli effetti elettrici sugli induttori avvengono solo in presenza di variazioni di corrente ai suoi capi. Nel regime di tensione costante (DC) non si ha nessun effetto. Infatti se la corrente all'interno dell'induttore non varia, anche il campo magnetico si interrompe. L'induttore diventa un semplice conduttore.

Gli induttori sono disponibili sia come componenti singoli, sia in forma integrata, in particolare con contenitori SIP (*Single In-line Package*). Sono realizzati nella **versione in aria (air core)**, oppure con **nucleo di materiale ferromagnetico** o di ferrite. Sono anche disponibili versioni adatte alle realizzazioni SMT (*Surface-Mount Technology*).

Vengono utilizzati in molte applicazioni elettriche, informatiche e di telecomunicazioni:

- nei trasmettitori e ricevitori radio all'interno di circuiti risonanti;
- come filtri per selezionare le giuste frequenze per ogni altoparlante;
- come filtri generici di segnale per l'eliminazione di eventuali disturbi.

### Caratteristiche elettriche

Si chiamano **induttori** o **bobine** [fig. A1.26] quei bipoli costruiti con lo scopo di realizzare opportuni valori di induttanza.

### Induttanza

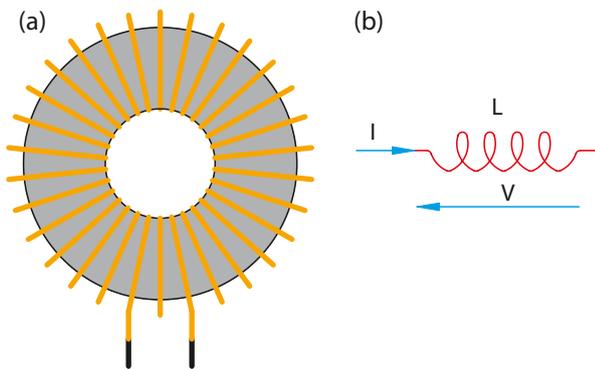
Quando un conduttore è percorso da una corrente elettrica  $I$  genera nello spazio circostante un flusso magnetico concatenato  $\Phi_C$  con il conduttore stesso definito dalla relazione:

$$\Phi_C = L \cdot I$$

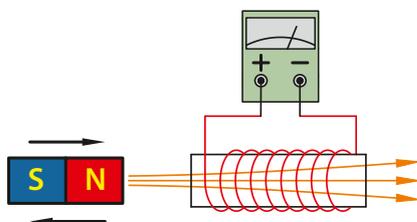
dove  $L$  è un parametro chiamato coefficiente di autoinduzione o, più semplicemente, **induttanza**. L'unità di misura dell'induttanza è l'**henry** (H).

#### ■ Relazione tensione-corrente

Se si avvicina un magnete come nella **figura A1.27** al nucleo di una bobina, provocando una variazione del



A1.26 Induttore: a) involucro; b) simbolo.



A1.27 Interazione magnete-bobina.

magnetismo del suo nucleo, si induce una forza elettromotrice nelle spire.

Il fenomeno esemplifica un principio generale: un conduttore immerso in un campo magnetico variabile sviluppa una forza elettromotrice indotta.

La f.e.m. indotta non è legata direttamente al flusso bensì alla variazione del flusso nel tempo, secondo la formula:

$$V = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Sostituendo al flusso la sua espressione in funzione della corrente si ricava la formula dell'induttore:

$$v_L = L \cdot \frac{\Delta i_L}{\Delta t}$$

Ovvero: la tensione ai capi di un induttore, opposta al verso della corrente, dipende dal rapporto della variazione  $\Delta i_L$  della corrente rispetto al tempo  $\Delta t$  impiegato per la variazione.

Questa osservazione ha risvolti e impieghi pratici molto importanti. Una interpretazione discende dalla considerazione che il rapporto  $\Delta i_L/\Delta t$  ha il significato di velocità di variazione della corrente: infatti esso è tanto maggiore quanto maggiore è la variazione di corrente e minore il tempo impiegato.

Nei circuiti l'induttore viene allora impiegato per stabilizzare la corrente: infatti la f.e.m. si oppone alla causa che l'ha generata e l'opposizione è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità di variazione della corrente.

#### ■ Collegamento in serie e parallelo

Le configurazioni fondamentali sono il collegamento in serie e quello in parallelo.

– **Induttori in serie** [fig. A1.28a] – la corrente è in comune ai tre induttori, pertanto:

$$v_{L1} = L_1 \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad v_{L2} = L_2 \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad v_{L3} = L_3 \cdot \frac{\Delta v_{L3}}{\Delta t}$$

La tensione totale è la somma delle singole tensioni, ovvero:

$$E = v_{L1} + v_{L2} + v_{L3} = L_1 \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_3 \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Raccogliendo la corrente si ricava:

$$E = (L_1 + L_2 + L_3) \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

In conclusione l'induttanza equivalente  $L_{EQ}$  è data dalla somma delle singole induttanze.

$$L_{EQ} = L_1 + L_2 + \dots + L_N$$

- **Induttori in parallelo [fig. A1.28b]** – la tensione  $E$  è in comune ai tre induttori, pertanto:

$$E = L_1 \cdot \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \quad E = L_2 \cdot \frac{\Delta i_2}{\Delta t} \quad E = L_3 \cdot \frac{\Delta i_3}{\Delta t}$$

ovvero anche:

$$\frac{E}{L_1} = \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \quad \frac{E}{L_2} = \frac{\Delta i_2}{\Delta t} \quad \frac{E}{L_3} = \frac{\Delta i_3}{\Delta t}$$

La corrente totale  $i_T$  è data dalla somma delle tre correnti, ovvero:

$$i_T = i_1 + i_2 + i_3$$

Risulta perciò:

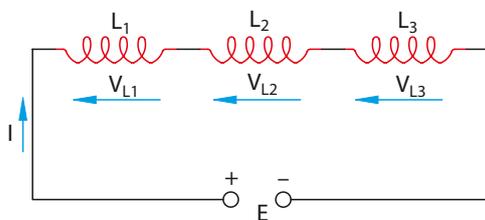
$$\begin{aligned} \frac{\Delta i_T}{\Delta t} &= \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + \frac{\Delta i_3}{\Delta t} = \frac{E}{L_1} + \frac{E}{L_2} + \frac{E}{L_3} = \\ &= E \cdot \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right) \end{aligned}$$

Isolando  $E$  si ricava:

$$E = \frac{1}{\left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right)} \cdot \frac{\Delta i_T}{\Delta t}$$

Pertanto l'induttanza equivalente vale:

$$L_{EQ} = \frac{1}{\left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right)}$$



(a)

## Parametri caratteristici

Anche gli induttori sono differenziati in base alle loro caratteristiche intrinseche di seguito indicate.

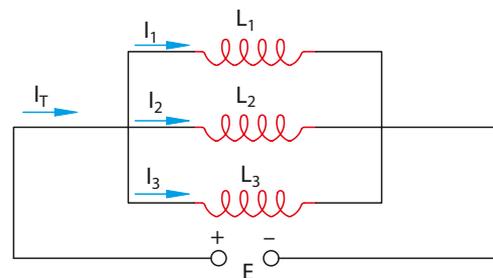
- **Induttanza nominale:** è il valore tipico dell'induttore presente sulla documentazione tecnica. Può presentare delle oscillazioni in base alla qualità dell'induttore stesso.
- **Fattore di qualità o di merito:** poiché l'induttore dissipa potenza, è importante sapere qual è il rapporto tra l'energia che riesce a immagazzinare e quella che disperde. Un buon induttore è caratterizzato da un elevato fattore di merito.
- **Massima corrente:** essendo l'induttore un filo conduttore avvolto, avrà una massima corrente che lo potrà attraversare per evitare eventuali danneggiamenti.
- **Tolleranza:** espressa dallo **scarto percentuale** ammesso per il valore reale dell'induttanza rispetto a quello nominale. Induttori di maggiore precisione hanno tolleranza minore.
- **Coefficiente di temperatura:** espresso in parti per milione per ogni grado di variazione della temperatura di funzionamento (ppm/°C), tiene conto delle variazioni dell'induttanza con la temperatura. Un piccolo valore di questo coefficiente identifica un induttore termicamente stabile.

## Tecnologie di fabbricazione

Secondo il materiale usato per il nucleo, gli induttori a valore fisso possono essere classificati come di seguito indicato.

- **Induttori in aria (air core)**

Sono realizzati avvolgendo a spirale un filo di rame, a volte smaltato. La struttura è autoportante. A causa dell'assenza di nucleo magnetico, l'induttanza non cambia quando varia la corrente.



(b)

Si raggiungono valori modesti di induttanza, tipicamente inferiori a 10 mH; gli impieghi tipici riguardano il campo delle radiofrequenze. Sono disponibili anche induttori realizzati su circuito stampato.

#### ■ Induttori con nucleo di ferro

Sono realizzati avvolgendo uno o più strati di filo di rame smaltato su un nucleo di ferro dolce. Si raggiungono valori anche notevoli di induttanza (decine di henry), a causa della permeabilità molto elevata del nucleo.

Sono anche conosciuti come bobine di arresto (*choke*), a causa della elevata capacità nel sopprimere le componenti ad alta frequenza presenti sulle linee di alimentazione in continua.

#### ■ Induttori con nucleo in ferrite (*ferrite core*)

La ferrite è un impasto di polveri di ossido di ferro e di materiali ceramici; ha una permeabilità inferiore a quella del ferro, ma è in grado di funzionare a frequenze molto più elevate. Il nucleo ha forma cilindrica, spesso filettata per consentire precise operazioni di taratura, oppure forma toroidale, che permette di raggiungere valori di induttanza più elevati. Sono disponibili anche induttori realizzati con film metallico depositato a spirale su nucleo di ferrite, opportunamente incapsulati e con aspetto esterno simile a quello di un resistore.

#### ■ Relè elettromagnetici

Una delle più classiche applicazioni degli induttori in sistemi complessi è costituita dai **relè elettromagnetici**.

In essi è sfruttato l'effetto induttivo delle bobine per creare dei movimenti meccanici che permettono l'apertura e la chiusura di contatti elettrici. Sono costituiti da una bobina con elevato numero di spire in rame smaltato, avvolta su di un supporto isolante.

La bobina, in genere di forma cilindrica, presenta al suo interno un nucleo di materiale ferromagnetico che si magnetizza quando nella bobina circola corrente e attrae un sistema di leveraggi, cui sono collegati i contatti elettrici.

## Carica e scarica dell'induttore

### Analisi della carica dell'induttore

Si consideri il circuito della [figura A1.29](#): per comprenderne il funzionamento si consideri che, all'opposto del condensatore, che si oppone alle variazioni di tensione, l'induttore si oppone alle variazioni della corrente.

Nell'istante in cui si chiude il tasto la corrente è pertanto ancora nulla e tutta la tensione  $E$  si manifesta

sull'induttore, essendo nulla la caduta di tensione sulla resistenza.

L'induttanza si carica progressivamente, finché a regime il circuito raggiunge la corrente massima  $E/R$ .

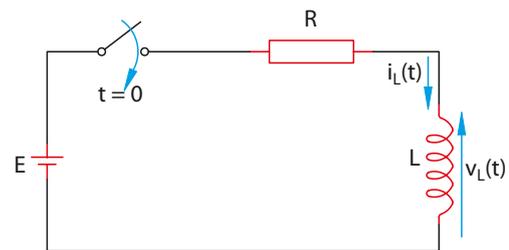
Si può dimostrare che tensione e corrente variano esponenzialmente nel tempo secondo le formule:

$$v_L(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad i_L(t) = \frac{E}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

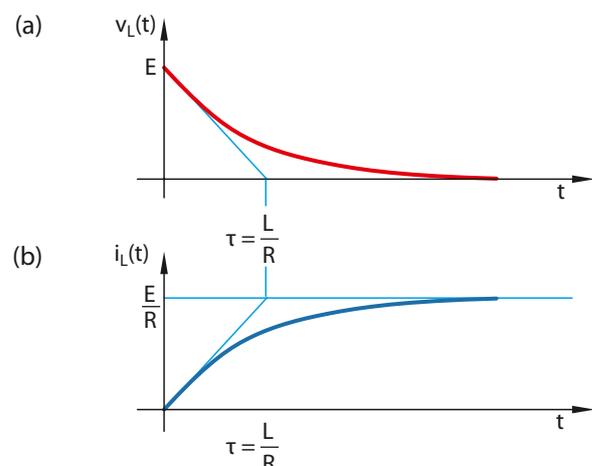
La rappresentazione grafica di tensione e corrente in funzione del tempo è presente nella [figura A1.30](#).

Se si traccia la tangente alla curva  $v(t)$  nel punto corrispondente a  $v(t) = 0$ , tale retta interseca l'asse dei tempi in un punto di ascissa  $\tau = L/R$ . L'intervallo di tempo  $\tau$  è chiamato **costante di tempo** del circuito.

Un discorso analogo si può fare per la corrente. Benché il transitorio termini teoricamente dopo un tempo infinito, praticamente la tensione raggiunge i valori di regime dopo un tempo pari a 4 ÷ 5 volte la costante di tempo  $\tau$ .



**A1.29** Circuito di carica dell'induttore.



**A1.30** Carica dell'induttore: a) tensione; b) corrente.

### Analisi della scarica dell'induttore

Considerazioni analoghe si possono ripetere per la fase di estinzione della corrente.

Allo scopo si consideri il circuito della **figura A1.31** con il commutatore in posizione 1: dopo un tempo maggiore di  $5\tau$  la corrente raggiunge praticamente il valore di regime  $E/R$ .

A questo punto si sposta bruscamente il commutatore in posizione 2.

Accade che, poiché l'induttanza si oppone alle variazioni di corrente, nei primi istanti la corrente si mantiene uguale a quella di regime e mantiene lo stesso verso.

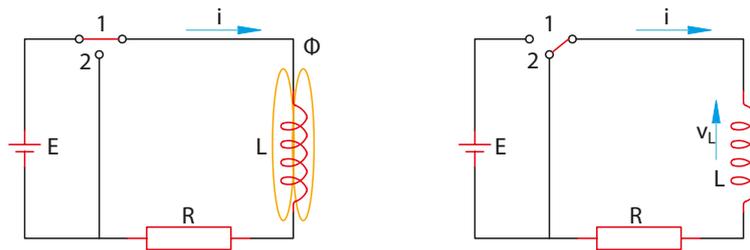
Per consentire questo fenomeno la tensione assume verso opposto (quindi segno negativo) e tensione e corrente sono concordi.

L'induttanza in questa fase funge da dispositivo attivo poiché restituisce l'energia immagazzinata nella fase di scarica.

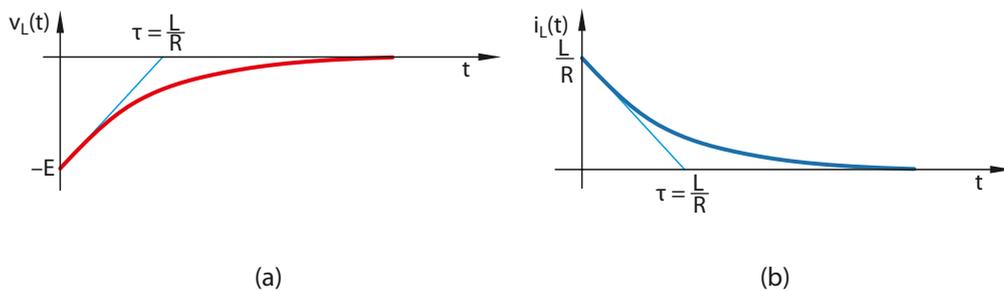
Progressivamente scaricandosi sia la tensione sia la corrente diminuiscono fino ad annullarsi a regime.

Si riportano di seguito le formule della scarica e i grafici corrispondenti **[fig. A1.32]**.

$$i_L(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad v_L(t) = -E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$



**A1.31** Circuiti di carica e scarica dell'induttore.



**A1.32** Scarica dell'induttore: a) tensione; b) corrente.

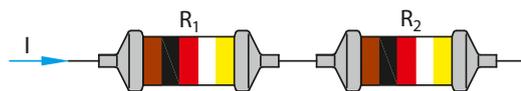
## ESERCITAZIONE GUIDATA / A1.1

### Serie e parallelo di resistenze

1. Analizzare la configurazione delle resistenze in serie.  
 $N$  resistenze si dicono disposte in serie quando sono interessate dalla medesima corrente.  
 Nella figura le due resistenze:

- condividono la medesima corrente  $I$ ;
- hanno diverse cadute di tensione  $V_{R1}, V_{R2}$ .

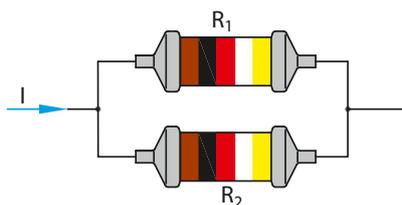
La resistenza equivalente è data dalla somma  $R_{EQ} = R_1 + R_2$ .



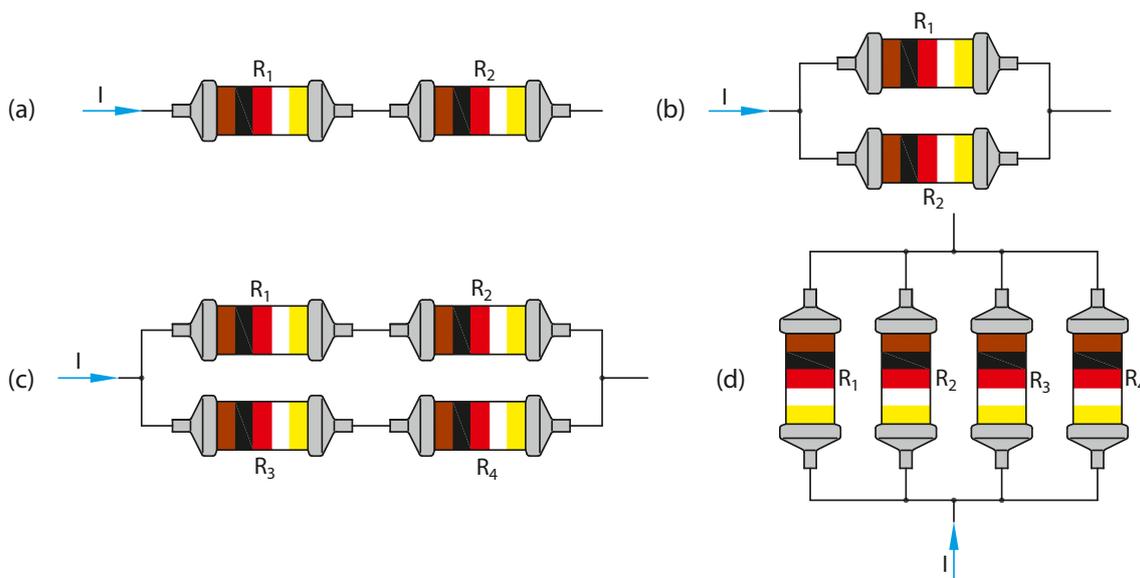
2. Analizzare la configurazione delle resistenze in parallelo.  
 $N$  resistenze si dicono disposte in parallelo quando sono interessate dalla medesima tensione.  
 Nella figura sottostante le due resistenze:

- condividono la medesima tensione  $V$ ;
- sono attraversate da diverse correnti  $I_{R1}, I_{R2}$ .

Se le due resistenze sono uguali  $R_1 = R_2 = R$  la resistenza equivalente è la metà:  $R_{EQ} = R/2$ .



3. Dopo aver osservato le figure e letto il valore dei resistori mediante il codice colori, rispondere ai quesiti.



- a. La  $R_{EQ}$  della figura (a) vale [ $\Omega$ ]:  500  2000  250  1000.
- b. La  $R_{EQ}$  della figura (b) vale [ $\Omega$ ]:  500  2000  250  1000.
- c. La  $R_{EQ}$  della figura (c) vale [ $\Omega$ ]:  500  2000  250  1000.
- d. La  $R_{EQ}$  della figura (d) vale [ $\Omega$ ]:  500  2000  250  1000.