

TS881QA

**Enrico Ambrosini
Pierpaolo Maini
Ippolito Perlasca**



Telecomunicazioni

Edizione mista



competenze

Articolazione informatica

TRAMONTANA

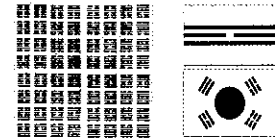
RCS
Education

non solo teoria 4

Le origini della numerazione binaria

Partendo da sinistra si vede uno degli esagrammi (grafici ottenuti dal raggruppamento ripetuto di sei elementi) del libro dei Mutamenti dell'antica Cina che ispirò Leibniz per definire il sistema di numerazione binaria: se si considerano le singole coppie di trattini brevi come degli 0 e i trattini lunghi come degli 1, il primo esagramma in alto a sinistra corrisponde a 0, il secondo a 1 fino ad arrivare all'ultimo in basso a destra che corrisponde a $1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^5 = 63$.

Più a destra sono riportate due bandiere che contengono trigrammi (questa volta gli elementi raggruppati sono solo tre): più in alto quella dell'Impero Vietnamita (stato fantoccio durante l'occupazione giapponese che durò solo dall'11 marzo al 23 agosto del 1945); più in basso la bandiera della Corea del sud. Queste bandiere confermano che il libro in questione ancora oggi ha influenza sulla cultura asiatica.



- ▶ **Non solo teoria**, ovvero schede che affrontano in forma pratica aspetti e applicazioni della materia.
- ▶ **Evidenziazione in riquadri** delle formule concettualmente conclusive di un discorso.
- ▶ **Indicazione grafica** del grado di difficoltà dei problemi e dei paragrafi di riferimento.
- ▶ **Rimandi alle lezioni multimediali.**

- ▶ **Rimandi ai contenuti della sezione AULADIGITALE**: schede integrative, problemi integrativi, ulteriori lezioni multimediali, ulteriori sezioni delle unità di teoria, file di simulazione.
- ▶ **Apertura delle singole sezioni** con un'immagine di parole chiave che sintetizza i contenuti e utilizzabile per un ripasso finale.
- ▶ **Ampio uso di software di simulazione** nelle lezioni multimediali (senza necessità di particolari prerequisiti), con particolare riferimento a Multisim, e LabVIEW della NI.

Parte digitale

- ▶ **DVD allegato al volume con Software National Instruments** (Multisim, e LabVIEW) con *licenza gratuita per uso limitato a fini didattici in ambito domestico*.
- ▶ **Nella sezione AULADIGITALE scaricabile via Internet**
 - **File di simulazione** previsti per le lezioni multimediali.
 - **Schede integrative** per ampliare la teoria del testo base.
 - **Sezioni delle unità di apprendimento e lezioni multimediali** aggiuntive a quelle del testo base.
 - **Problemi integrativi** svolti e non svolti per approfondire contenuti non essenziali.
 - **Guide all'uso dei programmi National Instruments.**

Il testo introduce la disciplina sviluppandone un'ampia introduzione storica dalle origini più antiche fino all'inizio delle telecomunicazioni moderne nate con l'elettricità.

Successivamente, rivolgendosi a studenti privi di nozioni in ambito elettrico ed elettronico, vengono sviluppati in termini minimali tutti i prerequisiti che si rendono necessari.

Lo sviluppo effettivo delle telecomunicazioni, pur se snello, è completo ed arriva alle tecniche più attuali.

Particolarmente utile per un approccio intuitivo risulta la sezione dedicata alle lezioni multimediali che, senza voler essere sostitutive della teoria, permettono un primo contatto con i contenuti in una forma accattivante e concettualmente semplice.

Corrispondenza tra conoscenze delle linee guida ministeriali e unità di apprendimento (U.A.) e relative sezioni (SZ.)
Caratterizzazione nel dominio del tempo delle forme d'onda periodiche: SZ. 3A
Reti elettriche in regime continuo e in regime alternato: U.A. 2 e 7
Elettronica digitale in logica cablata: U.A. 4
Modelli e rappresentazioni di componenti e sistemi di telecomunicazione: SZ. 2B e U.A. 4 e U.A. 6
Decibel e unità di misura: SZ. 2A, 2B e 6A
Analisi di segnali periodici e non periodici: U.A. 3, SZ. 7A
Portanti fisici e tecniche di interconnessione tra apparati e dispositivi: U.A. 10
Ricetrasmisione e propagazione delle onde elettromagnetiche: SZ. 10B
Principi di elettronica analogica per le telecomunicazioni: U.A. 6
Tecniche di modulazione nei sistemi di trasmissione analogica: U.A. 12
Reti a commutazione di circuito e tecniche di multiplexazione e commutazione: SZ. 12C, 13A e 15A
Apparati e tecniche per sistemi di trasmissione digitali in banda base e in banda traslata: U.A. 13
Parametri di qualità di un segnale in un collegamento di telecomunicazioni: U.A. 14
Architettura, servizi e tendenze evolutive dei sistemi per la comunicazione in mobilità SZ. 15A e U.A. 16
Architettura e servizi delle reti convergenti multi servizio: U.A. 17
Lessico e terminologia tecnica di settore anche in lingua inglese: distribuito nel testo

Indice

unità di apprendimento 1 Una storia lunga e affascinante

Sezione 1A Le origini delle telecomunicazioni

1 Premessa	18
2 Una possibile definizione e l'origine di un nome	18

AULADIGITALE

1B Tutta la sezione

3 Nella notte dei tempi	19
4 Nascita delle prime tecniche	19
5 Le telecomunicazioni crescono e diventano un fatto pubblico: politica, potere e società	21

unità di apprendimento 2 Elettricità e reti elettriche

Sezione 2A Richiami di fisica

1 Struttura della materia	28
2 La corrente elettrica	30
Quantità di elettricità	30
Intensità di corrente elettrica	30
3 Il generatore elettrico	31
4 Multipli e sottomultipli delle unità di misura	32

Facciamo il punto Nozioni introduttive 33

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 34

Sezione 2B Componenti e circuiti elettrici

1 Componenti e circuiti	36
Classificazione dei componenti elettrici	36
Definizioni sui circuiti	37
2 La resistenza, il resistore e la legge di Ohm	38
La legge di Joule e la potenza elettrica	39

Linearità e temperatura	40
Forme costruttive dei resistori	40

Facciamo il punto La legge di Ohm	40
3 Il generatore elettrico	41
4 Circuiti serie	41
Il partitore di tensione	43
5 Le grandezze elettriche in un circuito e gli strumenti per misurarle	44
6 Il potenziometro e il trimmer	45
Forme costruttive	45
7 Circuiti parallelo	46

Facciamo il punto I circuiti serie e parallelo	48
8 Il condensatore	48
9 Fenomeni transitori nei circuiti RC	50
Transitorio di carica	50
Transitorio di scarica	51
Studio analitico	52

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 53

non solo teoria

Le luci dell'albero di Natale, 44
Cambio portata di un voltmetro, 46

Sezione 2C Reti elettriche

- | | | |
|---|---|----|
| 1 | Il generatore di tensione | 57 |
| 2 | I principi di Kirchhoff | 58 |
| 3 | Il principio di sovrapposizione degli effetti | 60 |

AULADIGITALE

- 2A Soluzioni**
2B Schede integrative
 2B.1 Il calcolo approssimato
 2B.2 Inserzione potenziometrica
Problemi integrativi

- | | | |
|---|--------------------------|----|
| 4 | Il principio di Thevenin | 61 |
|---|--------------------------|----|

Facciamo il punto La risoluzione delle reti elettriche**VERIFICA** Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 63

- Soluzioni**
2C Scheda integrativa
 2C.1 Il generatore di corrente e il principio di Norton
Problemi integrativi
Soluzioni

unità di apprendimento 3 Segnali e strumenti**Sezione 3A Segnali**

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | Premessa | 68 |
| 2 | Segnali | 68 |
| 3 | Segnali unidirezionali e bidirezionali | 70 |

Facciamo il punto I segnali

- | | | |
|---|-----------------------|----|
| 4 | Il valore medio | 71 |
| 5 | Segnali alternati | 72 |
| 6 | Il valore efficace | 72 |
| 7 | Alcuni segnali tipici | 73 |

Facciamo il punto I segnali periodici**VERIFICA** Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 76**non solo teoria**

Le origini delle telecomunicazioni elettriche, 70

AULADIGITALE

- 3A Schede integrative**
 3A.1 Il valore medio
 3A.2 Il valore efficace
Problemi integrativi

Sezione 3B Strumenti di misura

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | Premessa | 79 |
| 2 | Il multimetro digitale | 79 |
| | <i>Gli strumenti multifunzione di tipo palmare</i> | |
| 3 | L'alimentatore stabilizzato | 81 |

Facciamo il punto Alimentatore stabilizzato e multimetro digitale

- | | | |
|---|---------------------------|----|
| 4 | Il generatore di funzioni | 82 |
| 5 | L'oscilloscopio | 83 |

Facciamo il punto Generatore di funzioni e oscilloscopio**VERIFICA** Test 86

- Soluzioni**
3B Lezioni multimediali
 3B.1 Utilità degli strumenti
Soluzioni

unità di apprendimento 4 Sistemi digitali**Sezione 4A Introduzione**

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | Universalità dell'elettronica digitale | 88 |
| 2 | Sistemi digitali | 91 |

VERIFICA Test • Problemi svolti 92**Sezione 4B Numerazione binaria**

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | Sistemi di numerazione | 93 |
| 2 | Conversioni | 95 |
| | <i>Conversione da binario a decimale</i> | 95 |
| | <i>Conversione da decimale a binario</i> | 95 |

Facciamo il punto Sistemi di numerazione posizionali**VERIFICA** Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 98**non solo teoria**

Le origini della numerazione binaria, 95

Sezione 4C Sistemi combinatori

- | | | |
|---|---|-----|
| 1 | Variabili logiche e circuiti combinatori | 100 |
| | <i>Circuiti combinatori</i> | 100 |
| 2 | Algebra di Boole | 101 |
| 3 | Funzioni logiche primarie | 102 |
| | <i>Funzione logica AND</i> | 103 |
| | <i>Funzione logica OR</i> | 103 |
| | <i>Funzione logica NOT</i> | 104 |
| | <i>Universalità delle funzioni logiche primarie</i> | 104 |
| 4 | Altre funzioni logiche | 105 |
| | <i>La funzione NAND</i> | 105 |
| | <i>La funzione NOR</i> | 106 |
| | <i>La funzione OR esclusivo (EX-OR)</i> | 106 |

Facciamo il punto Circuiti combinatori e algebra di Boole

- | | | |
|---|---|-----|
| 5 | Dispositivi logici di tipo particolare | 108 |
| 6 | Le scale di integrazione | 108 |
| 7 | Le famiglie logiche e le loro prestazioni | 109 |
| 8 | Introduzione al diodo e al transistor | 110 |
| | <i>Il diodo</i> | 110 |
| | <i>Parte logiche con i diodi</i> | 111 |
| | <i>Diodi particolari</i> | 112 |
| | <i>Il transistor bipolare</i> | 112 |

Il transistor MOS 114**Facciamo il punto Il diodo e il transistor**

- | | | |
|---|--|-----|
| 9 | Alcune funzioni combinatorie complesse | 116 |
| | <i>Multiplexer</i> | 116 |
| | <i>Demultiplexer</i> | 118 |
| | <i>Encoder</i> | 118 |
| | <i>Decoder</i> | 119 |

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 121**non solo teoria**

Le origini del computer, 105
 I circuiti integrati, 109
 Diodi e transistor, 114
 Come pilotare un carico di potenza, 115
 La tecnica della moltiplicazione, 117
 La macchina Enigma, 120

Sezione 4D Sistemi sequenziali

- | | | |
|---|---------------------|-----|
| 1 | Premessa | 127 |
| 2 | I latch | 128 |
| | <i>Latch SR</i> | 128 |
| | <i>Latch D</i> | 129 |
| 3 | I Flip-flop | 129 |
| | <i>Flip-flop SR</i> | 130 |
| | <i>Flip-flop D</i> | 130 |
| | <i>Flip-flop JK</i> | 131 |
| | <i>Flip-flop T</i> | 131 |

Facciamo il punto Latch e flip-flop

- | | | |
|---|-----------------------------------|-----|
| 4 | Applicazioni di latch e flip-flop | 132 |
| | <i>Il contatore</i> | 132 |
| | <i>I registri</i> | 136 |

Facciamo il punto I contatori**VERIFICA** Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 140**non solo teoria**

I contatori in commercio, 136
 Un dado elettronico, 138

Sezione 4E Sistemi programmabili

- | | | |
|---|--------------------------------------|-----|
| 1 | Le memorie | 143 |
| | <i>Definizioni</i> | 143 |
| | <i>Classificazione delle memorie</i> | 144 |

2	Memorie e semiconduttore	144	Blocchi funzionali di una CPU	154
3	Uso delle memorie	146	Unità logico-aritmetica	155
	Facciamo il punto Le memorie	147	I registri	155
4	I dispositivi ASIC	148	Circuito di decodifica e controllo microprogramma	156
	Dispositivi semi-custom	148		
	Dispositivi custom	149		
	Conclusioni	149		
5	Sistemi a microprocessore	151		
	Trasferimento dati	152		
6	Struttura di un microprocessore	153		
	Programmazione di una CPU	153		

AULADIGITALE

4A	Soluzioni	4C.6	La fisica del BJT
4B	Problemi integrativi	4C.7	La fisica dei MOSFET
	Schede integrative		Soluzioni
	4B.1 Aritmetica binaria	4D	Lezioni multimediali
	4B.2 I numeri negativi	4D.1	Il latch SR
	Soluzioni	4D.2	Approfondiamo il latch SR
4C	Problemi integrativi		Schede integrative
	Schede integrative	4D.1	Approfondimenti teorici sui bistabili
	4C.1 Proprietà e teoremi dell'algebra di Boole	4D.2	I contatori sincroni
	4C.2 Forme canoniche e mappe di Karnaugh		Soluzioni
	4C.3 I circuiti integrati	4E	Schede integrative
	4C.4 Parametri dei dispositivi digitali	4E.1	La RAM e la cache di un PC
	4C.5 La fisica dei diodi		Soluzioni

unità di apprendimento 5 Automi a stati finiti

Sezione 5A	Modelli e realizzazione degli automi	5	Automi asincroni e automi sincroni	167
1	Sistemi senza memoria e sistemi con memoria	160	6	La realizzazione hardware degli automi
2	Il modello dell'automata a stati finiti	160	7	Automi software
3	Automi di Mealy e automi di Moore	163		Facciamo il punto Automi a stati finiti
4	Automi riconoscitori di sequenze	166		VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere

AULADIGITALE

5A	Lezioni multimediali	5A.4	Automi di Mealy e automi di Moore
	5A.1 Sistemi con memoria	5A.5	Ulteriori esempi di automi
	5A.2 Riconoscere sequenze		Soluzioni
	5A.3 Un problema di tempi: automi sincroni e asincroni		

unità di apprendimento 6 Sistemi analogici per telecomunicazioni

Sezione 6A I quadripoli

1	Premessa	178
2	I generatori dipendenti	179
3	L'amplificatore	180
	Caratteristiche di un amplificatore	181
4	Il decibel	185
5	Unità assolute e relative	188
	Equivalente di trasmissione	188

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 191**AULADIGITALE**

6A	Soluzioni
6B	Soluzioni

Sezione 6B Amplificatori a retroazione negativa

1	Schemi a blocchi	194
	Sistemi ad anello aperto	195
	Sistemi ad anello chiuso e retroazione	195
2	Amplificatori a retroazione negativa	196
	Effetti della retroazione sul guadagno	196
	Effetti della retroazione sui disturbi	197
	Effetti della retroazione sulla distorsione	200
	Altri effetti della retroazione	201

Facciamo il punto La retroazione negativa 202**VERIFICA** Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 203

6C	Teoria, test e problemi
	Soluzioni

unità di apprendimento 7 Il regime sinusoidale

Sezione 7A Componenti e circuiti a regime sinusoidale

1	La funzione sinusoidale	208
2	Rappresentazione vettoriale delle grandezze sinusoidali	210
3	I componenti passivi lineari a regime sinusoidale	211
	Il resistore e la resistenza	211
	Il condensatore lineare	213
	L'induttore lineare a regime sinusoidale	215
4	Circuiti serie	217
	Circuiti RC serie	217
	Circuiti RL serie	218
	Circuiti RLC serie	219
5	Circuiti parallelo e serie-parallelo	220

Facciamo il punto Componenti e circuiti a regime sinusoidale 223

6	Il metodo simbolico	223
7	Componenti e circuiti con il metodo simbolico	226
	Resistore	226
	Condensatore	226
	Induttore	226
	Circuiti RC e RL serie	227
	Circuiti parallelo e serie parallelo	227
	L'ammetenza	227

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 229**non solo teoria**

Ma perché è importante il regime sinusoidale?, 222

AULADIGITALE

7A	Lezioni multimediali
7A.1	Componenti e circuiti RL serie

7A.2	Componenti e circuiti RC serie
	Soluzioni

unità di apprendimento 8 **L'analisi in frequenza nelle telecomunicazioni**

Sezione 8A Analisi armonica	
1 Teorema di Fourier	236
Facciamo il punto L'analisi armonica	241
2 Lo spettro di potenza	241
3 Lo spettro dei segnali aperiodici	242
VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	244
Sezione 8B Risposta in frequenza	
1 Analisi di un circuito lineare a regime sinusoidale	247
Metodo simbolico	248
2 Come ricavare la funzione di trasferimento di un circuito	248
3 Poli, zeri e fattorizzazione della funzione di trasferimento	249
4 Risposta in frequenza e diagrammi di Bode	249
5 I diagrammi di Bode in un caso semplice: il filtro RC passa-basso	251
Modulo della funzione di trasferimento	252
Fase della funzione di trasferimento	254
6 Il filtro RC passa-alto	255
7 Filtri passivi RL del primo ordine	256
8 Alcune caratteristiche dei filtri	257
VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	259

AULADIGITALE

8A Scheda integrativa	
8A.1 Il calcolo dei coefficienti di Fourier	8B.2 Tracciamento dei diagrammi di Bode con poli e zeri reali
Soluzioni	Soluzioni
8B Schede integrative	
8B.1 Fattorizzazione della funzione di trasferimento	

unità di apprendimento 9 **Le conversioni Analogico-Digitale e Digitale-Analogico**

Sezione 9A Conversione D/A		Sezione 9B Conversione A/D	
1 La distinzione fra analogico e digitale	264	1 La distinzione da analogico a digitale	271
2 L'errore di quantizzazione	265	2 L'errore di quantizzazione come rumore	273
3 La conversione da digitale ad analogico	265	3 Principio di funzionamento degli ADC	276
4 I principi fisici della conversione D/A	266	4 ADC ad approssimazioni successive	277
5 I parametri della conversione D/A	267	5 L'interfacciamento di un ADC a un sistema a bus	279
Facciamo il punto I DAC	269	6 Il numero effettivo dei bit di un ADC: l'ENOB	281
6 L'interfacciamento di un DAC a un sistema a bus	269		
VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	270		

7 Acquisizione di segnali variabili nel tempo	282	Facciamo il punto Sintesi globale DAC e ADC	286
Facciamo il punto Gli ADC	284	VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	287
8 La modulazione Sigma-Delta	285	non solo teoria	
		Il circuito del S&H, 283	

AULADIGITALE

9A Scheda integrativa		9B.6 La digitalizzazione delle immagini
9A.1 Parametri per la valutazione di un DAC		Schede integrative
Soluzioni		9B.1 Parametri per la valutazione di un ADC
9B Lezioni multimediali		9B.2 La modulazione Sigma-Delta
9B.4 Teoria e realtà: l'ENOD		Soluzioni
9B.5 La conversione di grandezze variabili nel tempo		

unità di apprendimento 10 **Mezzi trasmissivi**

Sezione 10A Cavi e cablaggio strutturato		VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	321
non solo teoria		L'antenna parabolica, 317	
1 Introduzione	290	Sezione 10C Fibre ottiche	
2 Le linee di trasmissione	290	1 Introduzione	324
3 L'analisi a costanti distribuite	291	2 La luce	325
4 Le caratteristiche della linea	294	3 La fibra ottica	328
5 Limiti per l'analisi a costanti concentrate e a costanti distribuite	297	4 Le caratteristiche dalla fibra	329
6 Linea chiusa con il carico: adattamento e riflessione	298	Dispersione modale	330
7 Onda stazionaria	301	Dispersione cromatica	331
8 Cablaggio strutturato	302	Banda passante	332
Facciamo il punto Cavi e cablaggio strutturato	306	Ulteriori note sulle prestazioni delle fibre ottiche	333
VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	307	5 I dispositivi ottici	335
Sezione 10B Il vuoto e le antenne		6 Il collegamento in fibra ottica	337
1 Le onde elettromagnetiche	310	7 Il cablaggio strutturato in fibra ottica	339
La propagazione nell'atmosfera	313	Facciamo il punto Fibre ottiche	342
2 Le antenne	314	VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	343
3 Il collegamento tra antenne	318	non solo teoria	
Facciamo il punto Il vuoto e le antenne	320	La storia del LASER, 341	
AULADIGITALE		Soluzioni	
10A Scheda integrativa		10C Scheda integrativa	
10A.1 Linee ad alta frequenza		10C.1 Il laser	
Soluzioni		Soluzioni	
10B Scheda integrativa			
10B.1 L'antenna parabolica			

unità di apprendimento **11** La teoria dell'informazione

Teoria dell'informazione: nozioni di base

1 La telegrafia e il problema della codifica	348
2 Shannon e la teoria dell'informazione	351
3 La misura dell'informazione	352
4 L'entropia di Shannon	353
5 La codifica	355
6 La compressione dei dati	358

7 Il canale privo di rumore	360
8 La capacità di un canale con rumore	362
9 I codici a rilevamento d'errore e a correzione d'errore	364

Facciamo il punto Nozioni introduttive 367

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 368

AULADIGITALE

11A Lezioni multimediali

11A.4 La compressione dei dati
11A.5 Il codice di Huffman
11A.6 Codici a correzione d'errore: il codice di Hamming

Scheda integrativa
11A.1 Il canale rumoroso
Soluzioni

unità di apprendimento **12** Modulazioni analogiche

Sezione 12A Modulazioni d'ampiezza

1 La modulazione	376
2 La modulazione d'ampiezza (AM)	378
3 Lo spettro del segnale modulato AM	380
4 La demodulazione con demodulatore a involuppo	381
5 La demodulazione coerente	382
6 La potenza nella modulazione d'ampiezza	383
<i>Tecnica DSB-SC</i>	383
<i>Tecnica DSB-TC</i>	384
7 La tecnica SSB	385
8 La tecnica con portanti in quadratura (QAM)	386

Facciamo il punto Modulazione d'ampiezza (AM) 387

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 388

Sezione 12B Modulazioni angolari

1 Le modulazioni angolari	392
2 La modulazione di frequenza (FM)	392

3 L'indice di modulazione	393
4 Lo spettro del segnale modulato FM	394
<i>FM a banda stretta (NBFM)</i>	394
<i>FM a banda larga (WBFM)</i>	395
<i>FM con modulazione non sinusoidale</i>	397
5 La potenza del segnale modulato FM	398
6 La modulazione di fase (Phase Modulation PM)	399
7 Lo spettro del segnale modulato PM	400
8 Confronto tra modulazioni angolari FM e PM	400

Facciamo il punto Modulazioni angolari 401

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 402

Sezione 12C Multiplazione a divisione di frequenza (FDM)

1 La trasmissione di segnali multipli	405
2 La multiplazione a divisione di frequenza (FDM)	406
3 La gerarchia del sistema FDM telefonico	407
4 Segnali multipli FDM radio	409

AULADIGITALE

12A Scheda integrativa

12A.1 Principio di funzionamento dei modulatori AM
Problemi integrativi
Soluzioni

12B Lezione multimediale

12B.5 Confronto tra le modulazioni analogiche
Scheda integrativa
12B.1 Il demodulatore di frequenza a PLL
Problemi integrativi
Soluzioni

unità di apprendimento **13** Trasmissione digitale

Sezione 13A Modulazione a impulsi codificati (PCM) e multiplazione TDM

1 I vantaggi della trasmissione digitale	412
2 Il segnale campionato a impulsi (PAM)	413
3 Il segnale a impulsi codificati (PCM)	415
4 L'errore di quantizzazione	417
5 La quantizzazione logaritmica	419
6 La multiplazione a divisione di tempo (TDM)	421
7 Le gerarchie di multiplazione	423

Facciamo il punto PCM e multiplazione TDM 425

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 426

AULADIGITALE

13A Soluzioni Lezioni multimediali

Sezione 13B Modulazioni digitali ASK, FSK, PSK, QAM

1 Le modulazioni digitali	429
2 La codifica multilivello	430
3 La modulazione ASK	432
2 La modulazione FSK	434
5 La modulazione PSK	436
6 La modulazione QAM	439
7 La modulazione Trellis	441
8 Parametri e prestazioni delle modulazioni digitali	442

Facciamo il punto Modulazioni digitali 444

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 445

13A.4 Esercitazione simulata sul CODEC telefonico
13B Soluzioni

unità di apprendimento **14** Il canale reale

Sezione 14A Il canale analogico

1 Il sistema di trasmissione	450
2 Il canale ideale	451
3 Il canale reale: la distorsione	453
4 Il rumore	455
5 Il rapporto segnale-rumore	458
6 Interferenza e diafonia	460

Facciamo il punto Il canale analogico 460

VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere 461

Sezione 14B Il canale digitale

1 Il canale digitale	466
2 I codici di linea	467
<i>Codici NRZ (Not Return to Zero)</i>	467
<i>Codici NRZI (Not Return to Zero Inverted)</i>	468
<i>Codice RZ (Return to Zero)</i>	468
<i>Codice AMI (Alternate Mark Inversion)</i>	469

Codice HDB3 (High Density Bipolar 3-zeroes)	469	5 Il Bit Error Rate (BER)	473
Codice CMI (Coded Mark Inversion)	470	6 Il diagramma a occhio	474
Codice Manchester (o bifase)	470	F acciamo il punto Il canale digitale	475
3 L'interferenza di intersimbolo	471	VERIFICA Test • Problemi svolti • Problemi da svolgere	476
4 Il jitter	472		

AULADIGITALE

14A Soluzioni
14B Soluzioni

Schede integrative
14B.1 ISI: condizioni di Nyquist
14B.2 Legame BER e S/N

unità di apprendimento **15** **Telefonia**

Sezione **15A** **Telefonia fissa, ISDN, ADSL, VoIP**

1 Introduzione	480
2 La rete telefonica fissa PSTN	480
3 ISDN	487
4 ADSL	489
5 VoIP	493

Facciamo il punto **Telefonia fissa, modem, ADSL** 495

VERIFICA Test • Problemi da svolgere 496

Sezione **15B** **Telefonia mobile**

1 Introduzione	497
2 I principi della rete di telefonia mobile	498
3 I servizi principali di un collegamento telefonico mobile	503
4 Le generazioni di sistemi di telefonia mobile	504
5 Le caratteristiche principali del GSM	506
6 Le caratteristiche principali dell'UMTS	508

Facciamo il punto **Telefonia mobile** 509

VERIFICA Test • Problemi da svolgere 510

AULADIGITALE

15A Schede integrative
15A.1 L'apparecchio telefonico
15A.2 Modem
Soluzioni

15B Scheda integrativa
15B.1 Il sistema di telefonia mobile GSM
Soluzioni

unità di apprendimento **16** **Le reti e i dispositivi wireless**

Sezione **16A** **Reti wireless: standard e dispositivi**

1 Reti WLAN	512
2 WiFi	512
Gli standard	513
Nuove applicazioni	514
Il WiMax	515

3 Bluetooth	515
La sicurezza	516
4 Standard ZigBee	517
La struttura dello standard	518
Le funzioni dei nodi ZigBee e la "scoperta della strada" in una rete	519
Lo ZigBee è ecologico	520

AULADIGITALE

16A Scheda integrativa
16A.1 Modulazioni per reti wireless e ADSL

unità di apprendimento **17** **Reti convergenti multiservizio**

Sezione **17A** **Reti convergenti multiservizio: le basi**

1 Introduzione	522
2 Le caratteristiche delle Next Generation Networks	523
3 La qualità del servizio (QoS)	526
4 Protocolli per la gestione della qualità di servizio (QoS)	528
5 Le reti di accesso di nuova generazione (NGAN)	532

Facciamo il punto **Reti convergenti multiservizio** 534

VERIFICA Test • Problemi da svolgere 535

non solo teoria

- Maggiori scambi tra le nazioni, 523
- La IETF e la IANA, 532

AULADIGITALE

17A Soluzioni

Lezioni Multimediali

Sezione **2B** **Componenti e circuiti elettrici**

1 Componenti elettrici	538
2 Collegamenti in serie e in parallelo. La misura di corrente e tensione	538
3 Legge di Ohm	540

Sezione **2C** **Reti elettriche**

1 I principi di Kirchhoff	542
---------------------------	-----

Sezione **4C** **Sistemi combinatori**

1 Gli assiomi dell'algebra di Boole	545
2 Le proprietà dell'algebra di Boole	547

3 Alcune funzioni combinatorie complesse 549

Sezione **8A** **Analisi armonica**

1 Il teorema di Fourier	553
-------------------------	-----

Sezione **9A** **La conversione Digitale-Analogica**

1 La conversione Digitale-Analogica	555
-------------------------------------	-----

Sezione **9B** **La conversione Analogico-Digitale**

1 La conversione Analogico-Digitale	557
2 Errore di quantizzazione	558
3 L'errore di quantizzazione come rumore	562

Sezione 10A Cavi e cablaggio strutturato

- | | | |
|---|--|------------|
| 1 | Le linee di trasmissione e la propagazione dell'onda | 566 |
| 2 | La riflessione della linea
<i>Ulteriori relazioni riguardanti l'adattamento delle linee</i> | 570
574 |

Sezione 11A Teoria dell'informazione: nozioni di base

- | | | |
|---|---|------------|
| 1 | Alcune note teoriche | 575 |
| 2 | L'informazione generata da una sorgente discreta: entropia e ridondanza
<i>L'entropia dell'italiano e delle altre lingue</i> | 576
580 |
| 3 | La capacità del canale | 582 |

Sezione 12A Modulazione di ampiezza

- | | | |
|---|--|------------|
| 1 | Modulazione di ampiezza
<i>Analisi nel tempo della modulazione d'ampiezza</i> | 588
588 |
| 2 | La demodulazione coerente | 590 |
| 3 | Analisi in frequenza dei segnali modulato e demodulato | 591 |
| 4 | La demodulazione a inviluppo | 593 |

Sezione 12B Modulazioni angolari

- | | | |
|---|--|------------|
| 1 | La modulazione di frequenza
<i>Analisi nel tempo dei segnali modulante e modulato</i> | 595
595 |
| 2 | Analisi in frequenza del segnale modulato | 597 |
| 3 | La modulazione di fase
<i>Confronto tra modulazione di fase e di frequenza</i> | 599
599 |
| 4 | Indice di modulazione per modulazione di fase | 602 |

Sezione 13A Modulazione a impulsi codificati (PCM) e multiploazione TDM

- | | | |
|---|--|------------|
| 1 | Modulazione a impulsi codificati (PCM) e multiploazione TDM
<i>Campionamento e codifica del segnale</i> | 604
604 |
| 2 | Dai bit PCM al segnale analogico | 609 |
| 3 | Il segnale multiplo a divisione di tempo
<i>Campionamento multiplo</i> | 611
612 |

Sezione 14A Il canale analogico

- | | | |
|---|---|------------|
| 1 | Il sistema di trasmissione
<i>Il canale ideale</i> | 616
616 |
| 2 | La distorsione | 618 |
| 3 | Il rumore | 621 |

AULADIGITALE

3B.1 Utilità degli strumenti – **4D.1** Il latch SR – **4D.2** Approfondiamo la conoscenza del latch SR – **5A.1** Sistemi con memoria – **5A.2** Riconoscere sequenze – **5A.3** Un problema di tempi: automi sincroni e asincroni – **5A.4** Automi di Mealy e di Moore – **5A.5** Ulteriori esempi di automi – **7A.1** Componenti e circuiti RL serie – **7A.2** Componenti e circuiti RC serie – **9B.4** Teoria e realtà: l'ENOB – **9B.5** La conversione di grandezze variabili nel tempo – **9B.6** La digitalizzazione delle immagini – **11A.4** La compressione dei dati – **11A.5** Il codice di Huffman – **11A.6** Codici a correzione d'errore: il codice di Hamming – **12B.5** Confronto tra modulazioni analogiche – **13A.4** Esercitazione simulata del codice telefonico

Bibliografia, 622

Indice analitico, 623

unità di apprendimento

Una storia lunga e affascinante

1

obiettivi di competenza finale

collocare le innovazioni tecnologiche relative alle telecomunicazioni nei contesti sociali, economici e politici delle epoche in cui sono state introdotte; comprendere il rapporto fra invenzione e sua accettazione sociale; riconoscere le "costanti" di una tecnologia attraverso il suo sviluppo storico, nello specifico i concetti di mezzo trasmissivo, codice, protocollo, sincronizzazione

Sezione 1A

Le origini delle telecomunicazioni

Sezione 1B

Dalla prima rivoluzione industriale alla nascita dell'elettronica

AULADIGITALE**AULADIGITALE**

1B Tutta la sezione

Nel libro

1A Tutta la sezione

Le origini delle telecomunicazioni

sezione 1A

1. Premessa

Non di sola tecnica...

Gli autori di questo libro sono affezionati a un'idea che di questi tempi ha forse un sapore un po' antico: *che la scuola sia non solo preparazione al lavoro ma anche (o forse soprattutto) educazione a una cittadinanza consapevole e critica*. Così, visto che scriviamo di telecomunicazioni per un pubblico di futuri tecnici, ci è sembrato importante cominciare con la storia di questa tecnologia, la più pervasiva, quella che più definisce i nostri modi di essere, operare nel mondo e interagire con gli altri.

Ci piacerebbe passare allo studente alle prese con codici, messaggi e circuiti la sensazione che quello che sta apprendendo lo rende parte di un'avventura umana antica e nello stesso tempo proiettata al futuro, in cui la conoscenza dei fatti tecnici non sia disgiunta dalla comprensione delle loro connessioni con l'economia, la società e la politica.

In un mondo sempre più plasmato dalle tecnologie, *il tecnico-cittadino non può abdicare alle sue responsabilità*, che sono quelle di lavorare bene ma anche di partecipare consapevolmente al dibattito e alle scelte sulle risorse, le opportunità e i possibili effetti collaterali dei saperi che contribuisce a mettere in campo.

Per ovvi motivi di spazio, invece di tentare impossibili sintesi che avrebbero sacrificato pezzi importanti e idee centrali di questa bella storia, abbiamo deciso di parlare qui solo dei suoi inizi, di quando gli uomini cercavano di intendersi a distanza prima dell'elettricità e dell'elettronica. Vi accorgete che i problemi le idee i principi, qualche volta le soluzioni di quei tempi lontani sono, mutate le tecniche, gli stessi su cui lavoriamo oggi. Per i volenterosi (meglio, gli avventurosi) che ci prendessero gusto, il resto della storia è reperibile su file (sezione 1B)¹.

Autodidattate

Sezione 1B

2. Una possibile definizione e l'origine di un nome

Le telecomunicazioni

Telecomunicazioni:
inviare segnali,
senza muovere
uomini e cose

Etimologia di
telecomunicazioni

Un etimo che è una
bella promessa:
condividere con chi è
lontano, attraverso i
luoghi e le culture.

Le telecomunicazioni sono l'insieme delle tecniche e dei mezzi che servono per trasmettere a distanza messaggi, notizie, ordini e informazioni. Possiamo essere più specifici, e dire che parliamo di telecomunicazioni quando questa trasmissione avviene senza spostare uomini o cose da luogo a luogo, ma attraverso l'uso di segnali: luminosi, sonori, elettrici, elettromagnetici.

In questo senso i segnali di fumo dei nativi americani costituiscono un sistema di telecomunicazione, i piccioni viaggiatori no.

Il termine **telecomunicazione** è relativamente recente: compare in Francia nel 1904 (*télécommunication*), lo inventa Édouard Estaunié, ingegnere delle Poste e Telegrafi francesi. Come molte parole "nuove", è costruita prendendo in prestito parole antiche: *comunicazione* viene dal verbo latino *communicare* (rendere comune qualche cosa, rendere partecipi di qualche cosa, condividere – da cui il nostro *comunicare*) e il prefisso *tele-* dal greco antico (τῆλε-) che significa *lontano*.

1. Una proposta agli insegnanti di telecomunicazioni: fate leggere questo capitolo a qualche collega di Storia. Sarebbe interessante che ne nascessero percorsi comuni, in cui il racconto dell'avventura umana si arricchisse del ruolo, spesso trascurato, delle scienze delle tecniche.

Gli inizi di una lunga storia

3. Nella notte dei tempi

Tuttavia l'uomo ha "telecomunicato" dagli inizi della sua storia, certamente ben prima di inventare la scrittura: fuochi visibili a distanza e ancor prima il suono di strumenti a percussione devono aver permesso ai nostri antenati di avvisare a distanza i loro simili di pericoli imminenti o della presenza della selvaggina. Non ci sono al proposito molte evidenze archeologiche, ma in epoca storica abbiamo conosciuto popolazioni (etichettate come "primitive" dal nostro pregiudizio razziale e culturale) che hanno utilizzato o ancora utilizzano queste tecniche. Ad esempio gli Yámanas, popolazione autoctona della Patagonia (che non è sopravvissuta ai benefici della civilizzazione, ed ormai estinta), usavano fuochi per segnalare le balene spiaggiate, da cui dipendeva molto della loro sussistenza. Furono questi fuochi che indussero Magellano a chiamare la loro terra Terra del Fuoco.

Fuochi, segnali di fumo (fig. 1), tamburi, corni e altri strumenti a fiato usati per segnalazioni costituiscono così il primo capitolo di questa storia. I messaggi che potevano essere trasmessi con questi metodi rudimentali erano pochi, ma la loro efficienza poteva essere notevole: nell'Antica Cina, lungo la Grande Muraglia costruita nel 220-206 a.C. dal primo imperatore Qin Shi Huang contro la minaccia dei popoli mongoli del Nord, la segnalazione tramite torce da una torre di guardia all'altra poteva far viaggiare l'allarme in caso di attacco per migliaia di km in poche ore.

In linguaggio moderno, *la maggior parte di questi sistemi si limitavano a trasmettere alternative binarie* (un fuoco acceso ci può dire solo "il nemico attacca", se è spento che il nemico non c'è). Altri incorporavano una sorta di codice, cioè *un mezzo per rappresentare e trasmettere, con i segnali disponibili, intere parole e messaggi diversi*: un esempio antico e raffinato è quello dei **tamburi parlanti** africani, i cui suoni sono articolati e strutturati come una vera e propria lingua e possono esprimere messaggi ("parole") di relativa complessità.



Figura 1

Nativi americani in un quadro di Frederic Remington (1861-1909).

4. Nascita delle prime tecniche

Al tempo degli Antichi Greci – più precisamente all'epoca ellenistica – risalgono i primi due esempi "tecnologici", che incorporano tecniche e saperi diversi, tra cui la scrittura, la matematica e le prime conoscenze di fisica.

Il primo risale a uno stratega greco di nome Aeneas che lo inventò intorno al 350 a.C. Le postazioni trasmettente e ricevente erano costituite da serbatoi identici pieni d'acqua, in cui galleggiava un sughero su cui era fissata un'asta verticale (fig. 2a).

Sull'asta erano incisi i possibili messaggi. Chi voleva trasmettere un messaggio agitava una torcia e contemporaneamente apriva lo scarico del suo serbatoio; il corrispondente vedeva la torcia e a sua volta apriva lo scarico. Un secondo sventolamento della torcia segnalava il momento in cui il messaggio che si desiderava comunicare

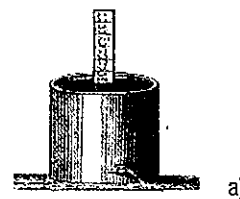
I primi esempi tecnologici risalgono all'antica Grecia.

Il telefono idraulico

arrivava a filo del bordo del serbatoio: il ricevente poteva allora leggerlo sull'asta del suo serbatoio, purché i due serbatoi fossero sufficientemente uguali da scaricarsi alla stessa velocità. In termini moderni lo sventolare della torcia ricorda un segnale di sincronismo, o la coppia bit di start/bit di stop in una trasmissione seriale. Lo storico greco Polibio (II secolo a.C.) racconta che il telegrafo di Aeneas fu usato dai Cartaginesi nella prima Guerra Punica (264-241 a.C.).

Il Quadrato di Polibio

Il secondo sistema è anch'esso riportato da Polibio, che ne fu l'inventore o almeno il perfezionatore, ed è per questo conosciuto come il **Quadrato di Polibio** (fig. 2b).



	1	2	3	4	5
1	A	B	Γ	Δ	E
2	Z	H	Θ	I	K
3	Λ	M	N	Ξ	O
4	Π	P	Σ	T	Υ
5	Φ	X	Ψ	Ω	

Figura 2
Il telegrafo idraulico di Aeneas (a); il Quadrato di Polibio (b).

Le lettere dell'alfabeto (greco, ovviamente) erano sistemate in una tabella quadrata di 5 colonne e 5 righe. Ogni lettera era individuata dal numero della sua riga e da quello della sua colonna, secondo un metodo che anticipa di 1700 anni le coordinate cartesiane. Per comunicare il "telegrafista" si metteva dietro un riparo con 5 torce accese alla sua sinistra e altre cinque alla sua destra. Se voleva trasmettere ad esempio la lettera Θ (teta), alzava 2 torce alla sua sinistra (numero della riga) e 3 alla sua destra (numero della colonna). Lento ma efficace; incidentalmente, il *Quadrato di Polibio è stato anche uno dei primi esempi di cifrario per crittografia* (scrittura segreta): un messaggio poteva essere "secretato" traducendolo in coppie di numeri. Un cifrario simile fu usato dai nichilisti russi che lottavano contro lo Zar alla fine '800: cosa che ci meraviglia un po', visto che un *cifrario a monosostituzione* come questo (alla stessa lettera corrisponde sempre lo stesso codice) è molto facile da decrittare; se si conosce la lingua in cui il messaggio originale è scritto, basta confrontare le frequenze delle coppie di numeri nel testo criptato, purché abbastanza lungo, con quelle delle singole lettere nella lingua.

I Greci usano i codici e inventano la crittografia.

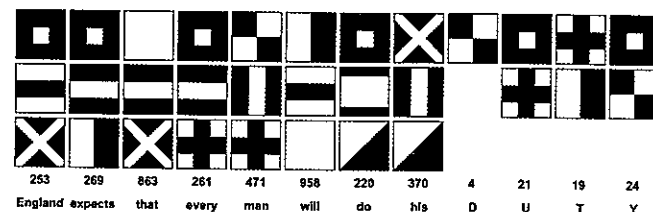
Dall'Antichità alla Rivoluzione francese

Per molti secoli i progressi furono pochi e, soprattutto, restarono appannaggio del potere politico e militare. Nel corso del medioevo sulle coste del Mediterraneo furono costruite numerose torri di avvistamento per difendersi dalle incursioni dei pirati barbareschi e turchi. Le segnalazioni da torre e torre e dalle torri al retroterra erano basati su fuochi e, di giorno, su specchi usati per riflettere la luce del sole, i cosiddetti **elio-grafi** - che scrivono con il sole - anch'essi risalenti peraltro all'Antica Grecia.

Nel sec. XVI cominciarono ad affermarsi le **bandiere di segnalazione**, usate soprattutto in marineria. Furono sviluppati numerosi codici basati sulle bandiere, ad esempio nella battaglia navale di Trafalgar, in cui il 21 Ottobre 1805 la flotta inglese comandata da Orazio Nelson distrusse la flotta di Napoleone, fu usato un codice basato su 10 bandiere che rappresentavano le cifre da 0 a 9. Combinazioni di bandiere issate sull'albero maestro rappresentavano cifre che corrispondevano a parole, riportate in un libro distribuito a tutta la flotta.

Ecco in **figura 3** il famoso messaggio di Nelson a tutte le navi, che diede il via alla battaglia (L'Inghilterra si aspetta che ogni uomo faccia il proprio dovere).

Figura 3
Il messaggio di Nelson che diede il via alla battaglia di Trafalgar.



Il telegrafo ottico

Con il telegrafo ottico di Chappe nasce la prima rete di telecomunicazioni.

5. Le telecomunicazioni crescono e diventano un fatto pubblico: politica, potere e società

Con Claude Chappe (1763-1805), fisico e ingegnere francese, ex-abate spretato dalla Rivoluzione Francese, la nostra storia fa un enorme salto, con la realizzazione della prima rete pubblica di telecomunicazione, che al culmine del suo sviluppo si sarebbe estesa a tutti i territori europei dell'impero napoleonico.

Chappe ideò una rete di stazioni ("semaphores") costituite da un sistema di 3 aste mobili issate su un lungo palo verticale. Le tre aste ruotavano in un piano verticale, la prima (detta "regolatore", lunga 4 m) intorno al suo centro, le altre due ("indicatori"), lunghe 2 m, incernierate alle estremità della prima (fig. 4a).

Le posizioni delle aste, comandate da un sistema di carrucole e funi, potevano variare indipendentemente l'una dall'altra a passi di 45°, per un totale di $8 \times 8 \times 8 = 256$ configurazioni possibili. Ogni configurazione rappresentava una lettera o un messaggio completo, secondo un particolare codice. Le aste erano verniciate di nero, per risultare più visibili sullo sfondo del cielo. Un modello a scala ridotta delle aste, posto alla base del palo, si muoveva in sincronia permettendo all'operatore, che di solito era situato in un locale al coperto, di verificare la posizione assunta dal sistema di segnalazione (fig. 4b).

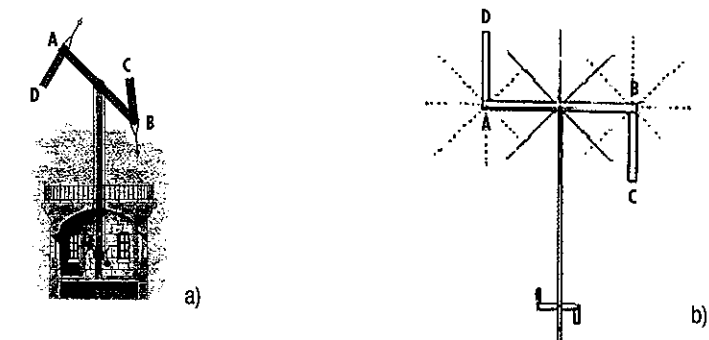


Figura 4
Il telegrafo di Chappe (a); le configurazioni possibili e il "ripetitore" alla base del palo (b).

Le stazioni erano poste in posizione elevata, a distanze dai 12 ai 25 km. Dopo qualche incertezza iniziale, Chappe conì per la sua invenzione il nome **tèle-graphie** - telegrafo (che scrive a distanza).

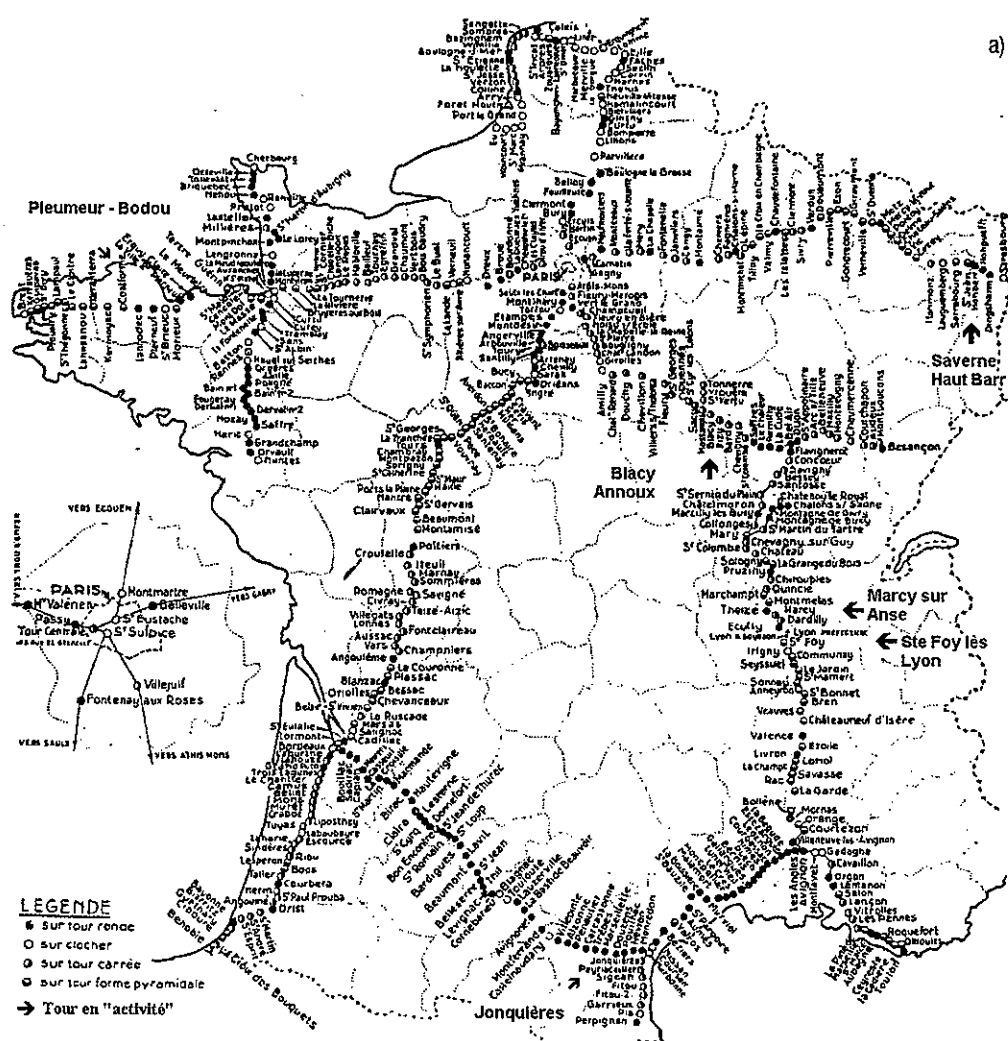
Grazie al fratello Ignazio, uomo politico membro dell'Assemblea Nazionale, Claude riuscì a far approvare la costruzione di una linea sperimentale da Parigi a Lilla, che entrò in funzione nel 1793. Quindici stazioni coprivano la distanza di circa 200 km. Presto vennero costruite altre linee: da Parigi a Landau (oggi in Germania, presso il confine con la Francia) e da Parigi a Digione. Nel 1799 erano operative 150 stazioni. Quando Napoleone prese il potere, l'espansione della rete seguì il ritmo delle sue conquiste: la linea che arrivava a Lilla venne estesa fino a Bruxelles, quella di Digione nel 1804 proseguì per Lione, passò per Torino e arrivò a Milano; in seguito fu prolungata fino a Venezia. Un'altra linea connesse la Francia alla Spagna.

Claude si ammalò di depressione e si tolse la vita nel 1805, ma la sua opera fu continuata dal fratello e socio Abraham.

Nel 1812 Napoleone incaricò Abraham Chappe di realizzare un sistema semaforico mobile, cioè trasportabile su carri, in vista della prossima - e sfortunata - invasione della Russia.

Lo sviluppo della rete proseguì in epoca post-napoleonica, per arrivare nel 1852 a circa 5000 km di linee, servite da 556 stazioni e da circa 3000 operatori. In **figura 5** trovate stampe d'epoca con la rete delle stazioni francesi e la rete Lione-Venezia.

Figura 5
La rete delle stazioni francesi (a) e la rete Lione-Venezia (b).



L'evoluzione dei codici

Anche i codici usati conobbero una continua evoluzione. All'inizio c'era una semplice corrispondenza fra configurazione delle aste segnalatrici e lettere e cifre (fig. 6).

T	t	F	f	T	t	F	f	T	t
a	b	c	d	e	f	g	h	i	
l	k	l	m	n	o	p	q	r	s
t	u	v	w	x	y	z	&	1	
2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Figura 6
Il primo codice usato per il telegrafo ottico.

Un protocollo completo

In seguito – intorno al 1795 – per evitare errori, si decise che il regolatore potesse assumere solo due posizioni, verticale e orizzontale, e che gli indicatori non potessero ripiegarsi sul regolatore: in questo modo le configurazioni scesero a $2 \times 7 \times 7 = 98$, che furono ulteriormente ridotte a 92, eliminando 6 configurazioni considerate difficilmente leggibili. Il codice era costituito da un libro di 92 pagine contenenti ciascuna 92 voci (lettere, numeri, parole e frasi di uso comune). La trasmissione di una singola informazione consisteva così in due configurazioni successive: la prima individuava la pagina, la seconda la voce nella pagina.

Al culmine dello sviluppo si arrivò a 3 libri di codice per un totale di $3 \times 92 \times 92 = 25392$ voci.

Le configurazioni con il regolatore inclinato a sinistra – che non trasmettevano voci del codice – erano usate come segnali di controllo, in particolare erano previsti segnali di:

- ▶ sincronizzazione;
- ▶ pausa;
- ▶ sospensione per guasto o per nebbia;
- ▶ priorità di direzione di trasmissione;
- ▶ conferma di ricezione corretta.

Una configurazione di sincronismo iniziale indicava quale libro usare, un'altra l'uso della pagina delle voci più frequenti, che poi venivano trasmesse con configurazioni singole, finché un'altra configurazione di sincronismo segnalava il ritorno al sistema delle coppie di configurazioni successive.

È stato stimato che apprestare una configurazione richiedesse circa 6 secondi: se la stazione successiva ripeteva immediatamente la configurazione avvistata. Ciò vuol dire, ad esempio, che sulla linea Parigi – Tolone, fatta di 120 stazioni, un messaggio cominciava ad arrivare a destinazione 6×120 secondi = 12 minuti dopo l'inizio trasmissione. Naturalmente il tempo di trasmissione di un intero messaggio era molto più lungo, anche perché le singole configurazioni erano mantenute per diversi secondi, specie in condizioni di scarsa visibilità.

Un protocollo completo

Altre nazioni costruirono nel corso del primo '800 reti di telegrafia ottica simili a quella di Chappe. Alcuni paesi, come la Prussia, adottarono, eventualmente modificandolo, il sistema di Chappe ad aste mobili. L'Inghilterra utilizzò un sistema di pannelli mobili che potevano spostarsi da una posizione verticale – e quindi visibile – a una posizione orizzontale in cui diventavano invisibili.

Il sistema svedese, costituito da otto palette montate incernierate su un'asta orizzontale, che potevano essere alzate o abbassate, richiama i moderni concetti di byte (8 bit sì-no) e di codice digitale binario.

Tutti questi sistemi vennero, nella seconda metà dell'800, gradualmente sostituiti dal telegrafo elettrico.

Pirateria informatica nell'Ottocento

Il telegrafo di Chappe è protagonista di un episodio del romanzo ottocentesco *Il Conte di Montecristo*, di Alexandre Dumas padre. L'eroe Edmond Dantès, che si nasconde sotto le vesti del ricco avventuriero conosciuto come il Conte di Montecristo, vuole vendicarsi del perfido finanziere Danglars, che in gioventù lo ha falsamente accusato facendolo finire in galera e rubandogli la fidanzata. Dantès corrompe l'operatore di una stazione intermedia di una linea di telegrafi Chappe usata tra l'altro per trasmettere le quotazioni di borsa, e gli fa trasmettere a Parigi la falsa notizia che le azioni spagnole di Danglard sono crollate. Danglard, ingannato, svende tutto e si rovina. È una storia impressionante per la sua modernità: ci sono le reti di comunicazione, la speculazione in borsa, la globalizzazione della finanza, la pirateria informatica – con il Conte di Montecristo nei panni di un hacker ante litteram.

Per arrivare ai tempi nostri ci mancava solo l'elettricità, ma stava arrivando...

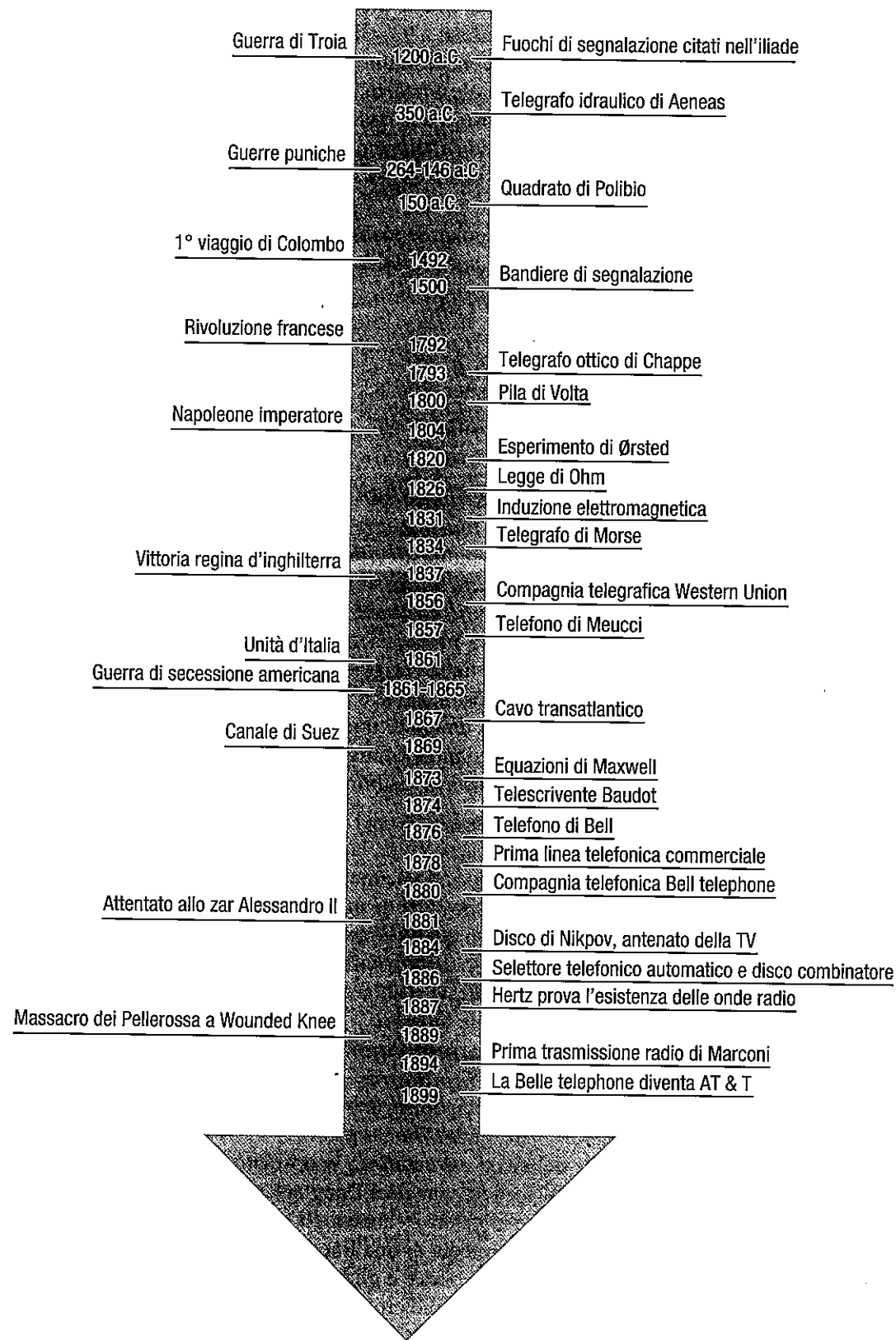


Figura 7
Freccia del tempo per le telecomunicazioni dalle origini ai giorni nostri. (segue)

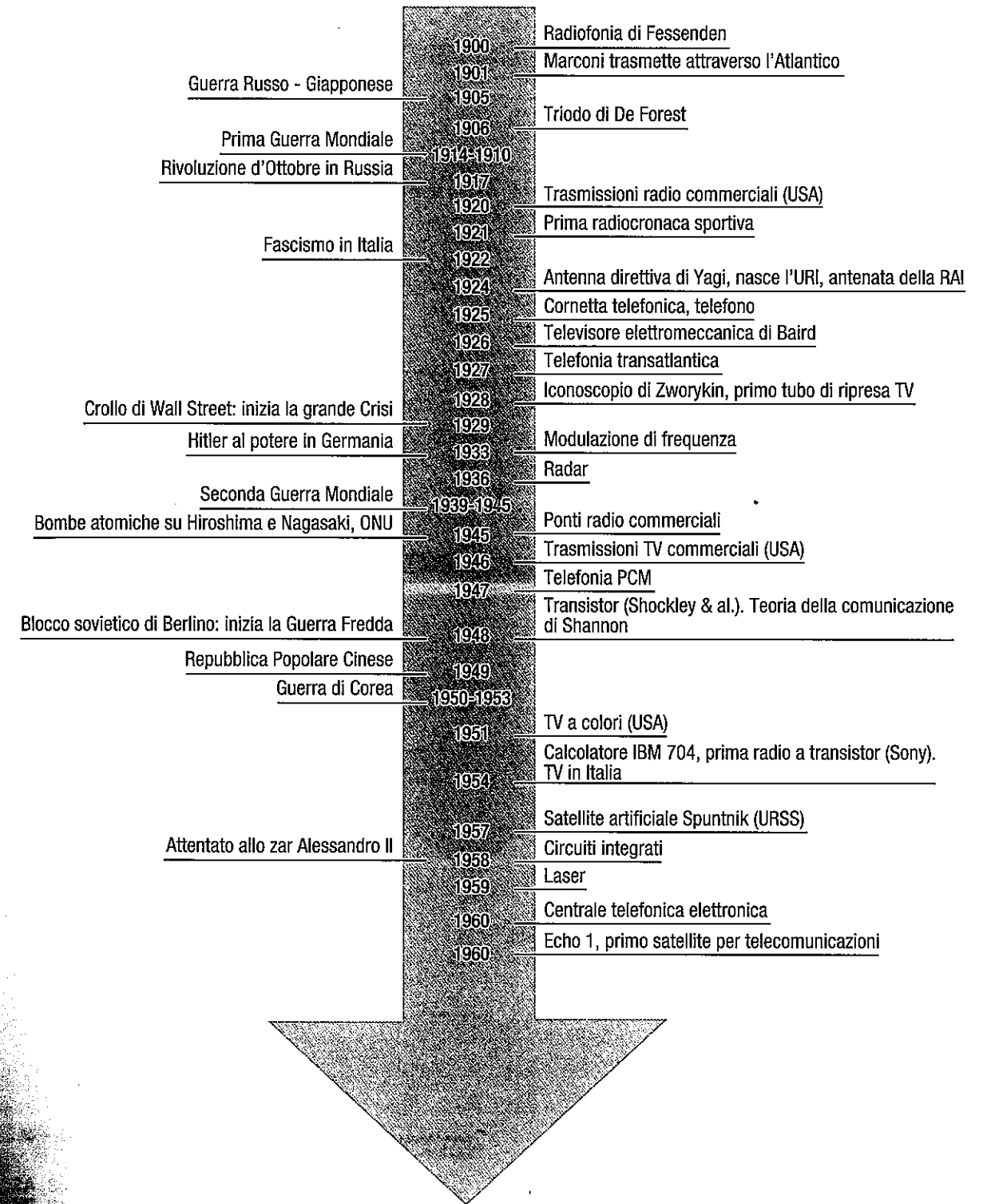


Figura 7
Freccia del tempo per le telecomunicazioni dalle origini ai giorni nostri. (segue)

unità di apprendimento

Elettricità e reti elettriche

2

obiettivo di competenza finale

saper analizzare il funzionamento di semplici circuiti in corrente continua

Sezione 2A

Richiami di fisica

obiettivo di competenza intermedio

acquisire padronanza sui concetti fondamentali alla base dei fenomeni elettrici e sulle relative unità di misura

Sezione 2B

Componenti e circuiti elettrici

obiettivo di competenza intermedio

acquisire autonomia di analisi di semplici circuiti resistivi di tipo serie-parallelo in forma teorica e con software dedicati

Sezione 2C

Reti elettriche

Modem

dati (USA)

sezione **2A** Richiami di fisica

generatore elettrico conduzione
 tensione potenziale differenza
banda elettronica protone
 neutrone molecola atomo
 elettrica corrente

PAROLE CHIAVE ▶

1. Struttura della materia

L'atomo era ritenuta l'unità più piccola ed indivisibile della materia dai filosofi greci Leucippo, Epicuro e Democrito (dottrina dell'atomismo, IV secolo a.C.). Il primo modello atomico che ipotizzò l'esistenza di particelle più piccole fu del fisico britannico Joseph John Thomson (1856-1940) che lo propose nel 1902; pensò l'atomo composto da un nucleo positivo dove erano immersi elettroni negativi. Nel 1911 il chimico e fisico neozelandese Ernest Rutherford (1871-1937) con un bombardamento di raggi alfa intuì un modello atomico con un nucleo attorno al quale ruotavano gli elettroni. Nel 1913 il fisico e matematico danese Niels Bohr (1885-1962) capì che gli elettroni potevano occupare orbite diverse in relazione al loro livello energetico. Il neutrone fu scoperto dal fisico inglese James Chadwick (1891-1924) nel 1932. La meccanica quantistica introdusse poi il concetto di orbitale in sostituzione di quello di orbita, eliminando quindi la rigida struttura atomica di tipo planetario.

Qualunque corpo che occupi spazio e sia dotato di massa è definito con il termine generale di **materia**. Dal punto di vista macroscopico *la materia si presenta in tre stati di aggregazione diversi e caratterizzati da proprietà fisiche differenti: solido, liquido e aeriforme*. Le caratteristiche della materia trovano una spiegazione sul piano microscopico: essa è infatti composta da aggregati di particelle elementari organizzate in **atomi**, a loro volta uniti a formare **molecole**. Gli atomi hanno una struttura interna realizzata da tre particelle fondamentali. I **protoni**, con carica elettrica positiva, insieme ai **neutroni**, con massa uguale a quella dei protoni, ma elettricamente neutri, compongono il nucleo, posto al centro dell'atomo. Intorno al nucleo si muovono gli **elettroni**, con carica elettrica negativa e massa inferiore a quella dei protoni. *Gli elettroni descrivono orbite a distanze diverse*, ma comunque molto lontane dal nucleo stesso. Non è possibile sapere con certezza dove si troverà in un certo istante un elettrone nell'atomo, dato che si muove in modo casuale intorno al nucleo, ma esiste una zona dove è *massima la probabilità di trovarlo*, chiamata **orbitale**. Ogni orbitale può contenere al massimo due elettroni, a ciascuno dei quali corrisponde un ben preciso valore di energia, chiamato **livello energetico**. All'orbitale più vicino al nucleo compete un livello energetico più basso, mentre gli altri assumono livelli energetici via via crescenti, con l'aumentare della loro distanza dal nucleo. I livelli energetici vengono numerati, partendo dal più interno verso il più esterno, con 1, 2, 3, 4, ecc., mentre gli orbitali vengono indicati con le lettere s, p, d, f, ecc.

Gli elettroni tendono ad occupare gli orbitali partendo da quello più vicino al nucleo, che richiede minore energia, riempiendo, via via, quelli ad energia superiore; tuttavia ogni livello energetico può avere al massimo un determinato numero di elettroni. Gli elettroni più vicini al nucleo sono, ovviamente, quelli legati più fortemente ad esso, mentre allontanandosi dal nucleo, la forza di tale legame diminuisce. Gli elettroni più esterni degli atomi, vengono chiamati **elettroni di valenza** e sono quelli che ne determinano le proprietà chimiche, in quanto più soggetti alle interazioni con l'esterno.

Protone: carica positiva nel nucleo.
Neutrone: carica nulla nel nucleo, con massa identica al protone.
Elettroni: cariche negative, con massa inferiore al protone, ruotano intorno al nucleo negli orbitali.

Elettroni di Valenza: sono i più esterni, determinano le proprietà dei materiali e creano i legami chimici con altri atomi formando le molecole.

Banda di valenza: occupata dagli elettroni di valenza.
Banda di conduzione: a livello energetico più elevato e normalmente vuota; se un elettrone acquista energia sufficiente per entrarvi diviene libero di muoversi all'interno del solido.

I metalli conducono perché la banda di valenza e di conduzione sono adiacenti o parzialmente sovrapposte.

Figura 2
 Banda di valenza e di conduzione parzialmente sovrapposte, nel caso di un conduttore (a) e separate da una zona proibita, nel caso di un isolante (b) o di un semiconduttore (c).

Nella formazione dei legami, gli atomi tendono a realizzare, quando possibile, una configurazione elettronica esterna con otto elettroni, cedendo o catturando o mettendo in comune elettroni con altri atomi. In condizioni normali, un atomo ha un numero di protoni esattamente uguale al numero di elettroni e in tal caso si dice **neutro**. Nel caso in cui l'atomo perda uno o più elettroni si trasforma in **ione positivo**, mentre se li cattura si trasforma in **ione negativo**. Invece la tendenza a mettere in comune elettroni di valenza tra atomi porta alla formazione di **legami chimici**, e alla formazione di **molecole**, le quali sono elettricamente neutre.

I **materiali solidi** presentano un *volume e una forma propri* e una forza di attrazione tra le molecole molto intensa e tale da tenerle unite. La rigidità del materiale solido, però non ferma il moto elettronico, in quanto ciascun elettrone esterno interagisce con i nuclei dei vari atomi, subendo l'attrazione dei nuclei più vicini, che gli permette di muoversi facilmente da un atomo all'altro. Quando gli atomi si uniscono per formare un solido, il concetto di livello energetico va esteso all'intero materiale mediante il concetto di **bande di energia**.

Nella struttura elettronica a bande (la quale descrive la gamma di energie che un elettrone può possedere), si distinguono una **banda di valenza**, che è quella a più elevata energia fra i livelli energetici occupati da elettroni, e una **banda di conduzione**, con la più bassa energia fra i livelli energetici non occupati da elettroni e comunque con livelli energetici superiori a quelli della banda di valenza. A temperatura ambiente (25 °C) la banda di valenza di un solido è generalmente occupata da elettroni, mentre la banda di conduzione è vuota. Se gli elettroni che si trovano nella banda di valenza ricevono un sufficiente aumento di energia, salteranno nella banda di conduzione dove sentono meno l'attrazione dei nuclei, e saranno liberi di muoversi in un flusso elettronico all'interno del solido.

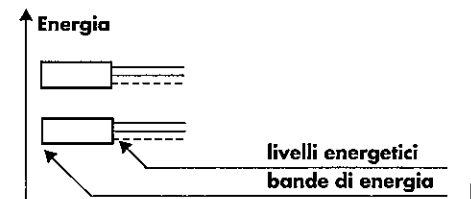
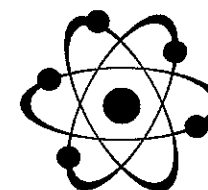
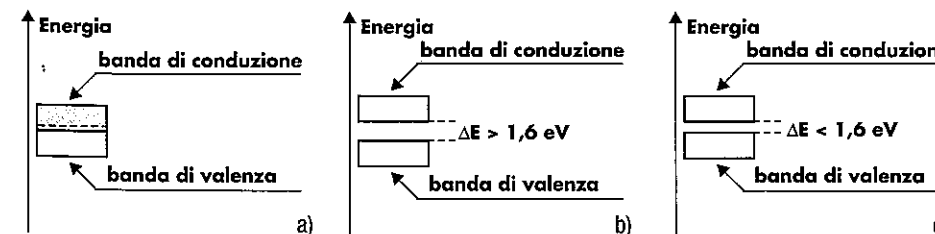


Figura 1
 Modello atomico (a), livelli energetici di un atomo isolato e bande di energia di un materiale solido (b).

Ciò può accadere soltanto se gli elettroni sono in grado di potere assorbire tali aumenti di energia, cioè se esistono nella banda di conduzione livelli energetici vuoti, corrispondenti ai loro nuovi contenuti di energia. Se banda di valenza e di conduzione sono adiacenti o parzialmente sovrapposte gli elettroni possono passare da un livello all'altro con una piccola spesa di energia e il materiale è un **conduttore** (**fig. 2a**): è il caso tipico dei **metalli**. Se banda di valenza e di conduzione sono separate da una zona proibita, corrispondente ad un salto di energia ΔE elevato, il materiale è un **isolante** (**fig. 2b**), e quindi non è un metallo; altrimenti, se $\Delta E \leq 1,6$ eV (l'energia è espressa in elettronvolt; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), allora è possibile con un piccolo guadagno di energia, far passare elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione (**fig. 2c**), e il materiale è un **semiconduttore** (ad esempio il germanio con $\Delta E = 0,7$ eV e il silicio con $\Delta E = 1,2$ eV).



2. La corrente elettrica

Abbiamo visto che nei metalli è facile fornire agli elettroni di valenza l'energia sufficiente a passare dalla banda di valenza a quella di conduzione. Se ciò si verifica è possibile ottenere un *movimento di cariche elettriche* (elettroni) *secondo una certa direzione*: si dice in questo caso che siamo in presenza di una **corrente elettrica**. Il riferimento ai metalli è dovuto al fatto che si tratta del caso che più direttamente interessa il seguito di questo corso ma, più in generale, la corrente elettrica si verifica ogni volta che si ha un movimento di cariche elettriche in una certa direzione anche se queste non sono elettroni; è ad esempio il caso del movimento di ioni all'interno di una soluzione elettrolitica.

Corrente di elettricità

Quantità di elettricità

Quantità di elettricità

■ *La somma algebrica delle cariche elettriche in gioco indica la quantità di elettricità.*

Si considera la somma algebrica perché *due cariche elettriche di pari quantità ma segno opposto sono equivalenti a una quantità di elettricità nulla.*

Il Coulomb

La quantità di elettricità si indica con la lettera Q e si misura in **coulomb** [C]. Un coulomb equivale a $6,25 \cdot 10^{18}$ elettroni.

Intensità di corrente elettrica

Si consideri, come schematizzato in **figura 3**, un filo di rame attraversato da una corrente elettrica e supponiamo che la quantità di elettricità che attraversa la sezione S in un certo intervallo di tempo sia costante, ovvero non vari cambiando l'intervallo di tempo (supposto comunque della stessa durata). Si parla in questo caso di **corrente continua** (DC: *direct current*). Il rapporto costante:

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad \mathbf{1}$$

è detto **intensità di corrente elettrica**. Espressa Q in coulomb e il tempo in secondi [s], l'intensità di corrente risulta in ampere [A]:

$$A = \frac{C}{s} \quad \mathbf{2}$$

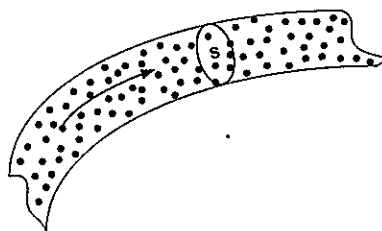


Figura 3
Valutazione dell'intensità di corrente.

Se la corrente non presenta un'intensità costante, ovvero siamo in presenza di una corrente variabile nel tempo, la sua intensità può essere definita considerando intervalli di tempo piccoli nell'intorno dell'istante t che interessa:

$$i(t) = \frac{\Delta q(t)}{\Delta t} \quad \mathbf{3}$$

Se l'intensità di corrente elettrica è costante la corrente si dice continua.

L'elettrotecnica si occupa della produzione, trasmissione ed utilizzazione dell'energia elettrica; l'Elettronica, principalmente, della gestione ed elaborazione dei segnali elettrici e da quest'ultima sono nate quindi le moderne Telecomunicazioni. Le origini dell'elettrotecnica si possono far coincidere con l'invenzione della pila da parte del comasco **Alessandro Volta** (1745-1827) intorno al 1800; le origini dell'elettronica con la costruzione nel 1904 del primo tubo a vuoto da parte dell'inglese **J.A. Fleming** (1849-1945).

Dove si sono usate le lettere minuscole per intendere grandezze variabili nel tempo e quindi Δq indica la quantità di elettricità che attraversa la sezione S nell'intervallo Δt considerato il più piccolo possibile e nell'intorno dell'istante t considerato. In matematica per esplicitare intervalli i più piccoli possibili (infinitesimi) si sostituisce la lettera Δ con una d e quindi il valore istantaneo dell'intensità di corrente si esprime più correttamente nella forma:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \mathbf{4}$$

Si noti come in questo caso si è evitato di esplicitare la dipendenza dal tempo infatti le scritture $i(t)$ e i sono equivalenti: è la lettera minuscola che evidenzia che ci si riferisce a grandezze variabili nel tempo. Al contrario, in ambito elettrico, le lettere maiuscole indicano grandezze costanti nel tempo.

3. Il generatore elettrico

Per ottenere il movimento delle cariche secondo una certa direzione bisogna disporre di un qualcosa che imponga alle cariche questo movimento. Il dispositivo in questione è detto **generatore elettrico**.

In **figura 4a** è schematizzato, in una forma simbolica molto generica, un generatore elettrico: i due suoi terminali, o morsetti, sono detti **polo positivo (+)** e **polo negativo (-)** e possono essere pensati come zone dove è presente un *addensamento di cariche positive* in uno e negative nell'altro.

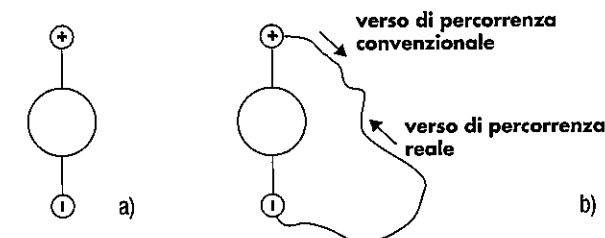


Figura 4
Rappresentazione elementare di un generatore elettrico (a) e suo inserimento in un percorso chiuso (b).

Dall'elettrostatica, è noto che le cariche di segno uguale si respingono e le cariche di segno opposto si attraggono. Se allora costruiamo un percorso chiuso (o come vedremo in seguito un **circuito chiuso**) collegando il polo positivo a quello negativo con un filo metallico (**fig. 4b**) cosa succederà? Le cariche negative sfruttando il conduttore anch'esso ricco di cariche negative andranno verso il polo positivo, creando una corrente elettrica; non si muoveranno invece le cariche positive perché nei conduttori metallici solo quelle negative sono libere. Fino a quando durerà questa corrente? Fino a quando i due poli non diverranno neutri: quello negativo perché rimasto privo di elettroni liberi e quello positivo perché gli elettroni arrivati hanno compensato le cariche positive presenti.

In un conduttore metallico le cariche libere di muoversi sono quelle negative e quindi la corrente avviene dal polo negativo a quello positivo. In realtà *per un fatto convenzionale si fissa il verso della corrente dal polo positivo a quello negativo*, come se a muoversi fossero le cariche positive. La distribuzione di cariche ai due poli determina tra gli stessi la presenza di una **differenza di energia potenziale**: se attraverso un filo metallico si collegano i due poli si permette alle forze di attrazione presenti di determinare il movimento delle cariche ovvero la *conversione della differenza di energia potenziale in lavoro*.

In ambito elettrico le lettere maiuscole si usano per indicare grandezze costanti nel tempo e quelle minuscole per le grandezze variabili.

Verso convenzionale della corrente

Differenza di potenziale

*Differenza di energia potenziale: si misura in joule.
Differenza di potenziale: si misura in volt.*

■ Si definisce **differenza di potenziale** V (d.d.p.) o **tensione** il rapporto tra la differenza di energia potenziale tra i due poli W e la quantità di elettricità Q in gioco:

$$V = \frac{\Delta W}{Q} \quad \mathbf{5}$$

Dimensionalmente la tensione si misura in **volt** quindi il volt equivale a joule/coulomb [J/C].

Esempio 1

Il singolo elettrone presente al polo negativo di un generatore elettrico con i poli aperti presenta un'energia potenziale rispetto al polo positivo di $25 \cdot 10^{-18}$ J. Sapendo che la quantità di elettricità di un singolo elettrone è $Q = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C, quanto vale la differenza di potenziale tra i due morsetti? Quanto vale l'energia potenziale del singolo elettrone espressa in eV?

Applicando la relazione **5** si trova subito:

$$V = \frac{\Delta W}{Q} = \frac{25 \cdot 10^{-18}}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 156,25 \text{ V}$$

Sapendo poi che $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ si trova subito che:

$$\Delta W = \frac{0,25 \cdot 10^{-16}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \approx 156 \text{ eV}$$

4. Multipli e sottomultipli delle unità di misura

Per completezza di informazione in **tabella 1** sono riportati i prefissi per i multipli e i sottomultipli più usati in elettronica e quindi nell'hardware dei sistemi di telecomunicazioni.

Tabella 1
Multipli e sottomultipli delle unità di misura elettriche.

giga	(G)	pari a 10^9	volte l'unità di misura di base
mega	(M)	pari a 10^6	volte l'unità di misura di base
chilo	(k)	pari a 10^3	volte l'unità di misura di base
milli	(m)	pari a 10^{-3}	volte l'unità di misura di base
micro	(μ)	pari a 10^{-6}	volte l'unità di misura di base
nano	(n)	pari a 10^{-9}	volte l'unità di misura di base
pico	(p)	pari a 10^{-12}	volte l'unità di misura di base

Esempio 2

$3 \text{ mV} = \text{tre millesimi di volt} = 0,003 \text{ V}$, ovvero $3 \cdot 10^{-3} \text{ V}$.
 $10 \mu\text{A} = \text{dieci milionesimi di ampere} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ A}$.

Moltiplicando i precedenti valori di tensione e di corrente si trova una potenza:
 $P = V \cdot I = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ W} = 30 \text{ nW}$.

Nel caso si faccia il rapporto tra tensione e corrente, si ottiene una resistenza:
 $R = V/I = 3 \cdot 10^{-3}/10 \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot 10^3 \Omega = 300 \Omega$.

Facciamo il punto

Atomo

- ▶ protone: carica positiva nel nucleo
- ▶ neutrone: carica neutra nel nucleo
- ▶ elettrone: carica negativa in movimento nell'orbitale

Orbitali

- ▶ zone intorno al nucleo dove è massima la probabilità di trovare gli elettroni

Elettroni di valenza

- ▶ determinano le proprietà chimiche
- ▶ formano i legami tra atomi se si formano orbitali con elettroni di valenza di atomi diversi in comune (molecole)

Nozioni introduttive

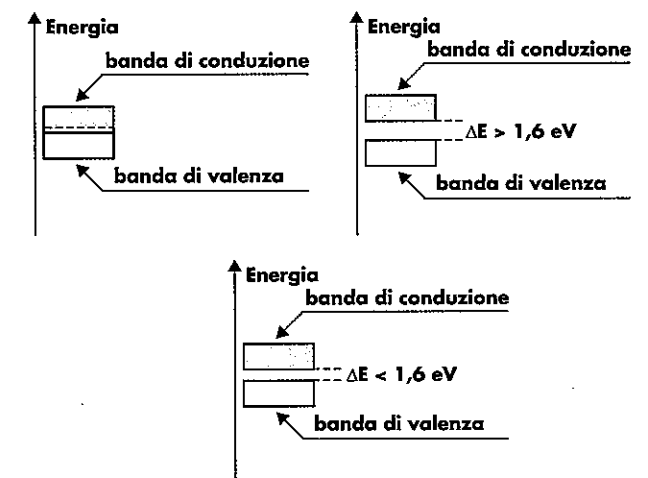
Se perde elettroni: **ione positivo**

Se acquista elettroni: **ione negativo**

Bande di energia

- ▶ banda di valenza: occupata dagli elettroni di valenza ed è quella a più elevato livello energetico occupato stabilmente da elettroni
- ▶ banda di conduzione: a livello energetico più elevato che a temperatura ambiente è normalmente vuota

per i solidi si hanno tre possibilità



se si orienta secondo una certa direzione il movimento delle cariche elettriche libere si ottiene la **corrente elettrica**

← nei conduttori

si definiscono

Quantità di elettricità

Somma algebrica delle cariche in gioco [coulomb]

Intensità corrente elettrica

Quantità di elettricità che attraversa una sezione nell'unità di tempo [ampere]

per ottenere la corrente

Si usa il **generatore elettrico**

- ▶ presenta ai suoi terminali una **differenza di potenziale** espressa in volt
- ▶ se si chiude il circuito passa corrente

La differenza di potenziale è pari al rapporto tra la differenza di energia potenziale e la **quantità di elettricità in gioco**

Test

- Par. 1 **1** In cosa si differenziano i protoni dai neutroni?
 a Hanno masse differenti.
 b Hanno polarità opposte.
 c I primi stanno nel nucleo e i secondi negli orbitali.
 d I secondi non hanno carica elettrica.
- Par. 1 **2** Un orbitale è una circostante il di un atomo dove è più probabile trovare un
- Par. 1 **3** Dal punto di vista atomico cosa differenzia un solido isolante da uno semiconduttore?
 a il primo ha la banda di valenza separata da quella di conduzione, il secondo le ha parzialmente sovrapposte
 b hanno entrambi la banda di valenza separata da quella di conduzione ma il primo ha un $\Delta E > 1,6$ eV, il secondo un $\Delta E \leq 1,6$ eV
 c si differenziano nel numero degli elettroni di valenza
 d si differenziano nelle caratteristiche del nucleo
- Par. 2 **4** C'è differenza tra corrente elettrica e intensità di corrente elettrica?
- Par. 2 **5** Cosa è una corrente continua?
 a È una corrente la cui intensità è costante nel tempo.
 b È una corrente che dura nel tempo senza mai interrompersi.
 c È una corrente che presenta una densità di corrente omogenea.
 d È una corrente che continua a cambiare di intensità.
- Par. 3 **6** Un generatore elettrico se inserito in un percorso chiuso:
 a producono una corrente di cariche positive dal + al -;
 b producono una corrente che per convenzione va dal + al -;
 c producono una corrente sempre composta da cariche sia positive che negative;
 d producono una corrente che per convenzione va dal - al +.
- Par. 4 **7** Il *nano* è pari a volte l'unità di misura base.
 Il *micro* è pari a volte l'unità di misura base.
 Il *giga* è pari a volte l'unità di misura base.
 Il *pico* è pari a volte l'unità di misura base.
- Par. 4 **8** Effettuare le seguenti conversioni:
 a $1,2 \text{ M}\Omega = \dots \Omega$;
 b $0,05 \Omega = \dots \text{ m}\Omega$;
 c $3,2 \mu\text{A} = \dots \text{ A}$;
 d $0,025 \text{ V} = \dots \text{ mV}$;
 e $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = \dots \text{ mV}$;
 f $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ A} = \dots \mu\text{A}$.

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

- Par. 2 **1** ●● Una sezione di un conduttore metallico è attraversata in 2 s da 10^{12} elettroni. Quanto vale l'intensità di corrente?
Soluzione
 Ricordando che un coulomb equivale a $6,25 \cdot 10^{18}$ elettroni, la quantità di elettricità di un elettrone risulta $1/6,25 \cdot 10^{18} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Pertanto la quantità di elettricità che attraversa la sezione in due secondi risulta:

$$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{12} = 160 \text{ nC}$$

L'intensità di corrente risulta infine:

$$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{160 \cdot 10^{-9}}{2} = 80 \text{ nA}$$

- Par. 2 **2** ●● Una sezione è attraversata in un secondo dal + verso il - da 10^{19} ioni positivi che presentano singolarmente una quantità di elettricità di $6,4 \cdot 10^{-19}$ C e dal - verso il + da 10^{20} elettroni. Quanto vale l'intensità di corrente?

Soluzione

Le cariche negative determinano una intensità di corrente (vedi il precedente problema per la quantità di elettricità di un elettrone):

$$I_{el} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} = 16 \text{ A}$$

che convenzionalmente va dal + al -.

L'intensità di corrente degli ioni risulta:

$$I_{ion} = 6,4 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{19} = 6,4 \text{ A}$$

L'intensità di corrente effettiva sarà la somma delle due:

$$I = I_{el} + I_{ion} = 22,4 \text{ A}$$

Problemi da svolgere

- Par. 2 **3** ●● Una sezione è attraversata nello stesso verso da 10^{15} elettroni e da 10^{15} ioni positivi che singolarmente presentano una quantità di elettricità pari a $6,4 \cdot 10^{-19}$ C. Calcolare l'intensità della corrente che attraversa la sezione (per la quantità di elettricità di un elettrone vedi il problema 1).

- Par. 3 **4** ●● In un generatore elettrico ogni elettrone presente al polo negativo presenta, rispetto al polo positivo, un'energia potenziale pari a $27 \cdot 10^{-18}$ J. Ricordando che la quantità di elettricità di un elettrone risulta pari a $1,6 \cdot 10^{-19}$ C (vedi problema 1), calcolare la differenza di potenziale del generatore.

Parole chiave

Gli insiemi delle parole chiave presenti a inizio delle singole sezioni seguono alcune regole:
 ▶ le parole usate possono assumere significato da sole o in unione ad altre;
 ▶ in linea generale non si usano articoli, preposizioni e coniugazioni (ad esempio "intensità di corrente elettrica" compare con le parole "intensità", "corrente" ed "elettrica" mentre non compare la preposizione "di");
 ▶ una parola da usare più volte è scritta più grande (in dimensioni proporzionalmente più grandi al numero di volte).

Seguendo queste regole, ricostruire i corretti termini delle parole chiave di questa sezione e raggrupparli per omogeneità concettuale (è possibile che alcuni possano entrare in più raggruppamenti).

Soluzione
 La parola "banda" è più grande perché compone sia il termine "banda di valenza" che il termine "banda di conduzione".
 Un esempio di possibili raggruppamenti è il seguente:

termini elettrici corrente elettrica - differenza di potenziale - tensione - generatore elettrico
termini atomici e molecolari atomo - protone - elettrone - neutrone - molecola - banda di valenza - banda di conduzione

sezione 2B Componenti e circuiti elettrici



PAROLE CHIAVE ►

1. Componenti e circuiti

Lezione multimediale 2B.1

In questa sezione si prenderà contatto con i primi componenti elettrici, quelli *discreti, lineari e passivi*. Questi verranno descritti attraverso il loro comportamento elettrico, prescindendo dai fenomeni fisici che lo giustificano.

Verranno, inoltre, studiati i concetti base sui circuiti elettrici. Anche in questo caso i concetti vengono solo introdotti nella loro essenzialità, al fine di fornire allo studente una visione d'insieme ma essenziale della materia.

Classificazione dei componenti elettrici

Il comportamento elettrico di un componente può essere descritto, nei casi più semplici, attraverso un grafico che esprime la sua **curva caratteristica** (o **caratteristica di trasferimento**). Questa mette in relazione l'**eccitazione** con la **risposta**; l'eccitazione rappresenta la grandezza elettrica applicata al componente (detta anche segnale d'ingresso), la risposta è la grandezza elettrica che si considera come effetto (detta anche segnale in uscita). Un componente che ha una caratteristica rettilinea è un componente **lineare**; la linearità va quindi riferita a una particolare coppia eccitazione-risposta in quanto, in relazione alla scelta, un componente può essere o non essere lineare.

È possibile classificare i componenti anche in relazione al numero dei terminali; si parla allora di **bipoli**, **tripoli**, **quadripoli** e, in generale, di **multipoli**.

Un componente si dice **integrato** se è l'equivalente di molte funzioni elettriche elementari; in pratica un componente integrato è normalmente multipolare e da solo è equivalente a un circuito elettrico complesso. Al contrario, un componente **discreto** è realizzato per svolgere solo una funzione elettrica elementare.

I componenti, infine, si dicono **attivi** se contengono dei generatori elettrici o sono interpretabili, nel loro funzionamento, come se li contenessero; in caso contrario sono detti **passivi**.

Definizioni sui circuiti

Circuito e nodo

- Si definisce **circuito elettrico** o **rete elettrica** un insieme di componenti tra loro variamente collegati.
- Si definisce **nodo** un punto di collegamento tra almeno tre componenti.

Si considerano nodi solo le connessioni almeno triple.

In figura 1a sono nodi i punti A, B, C, D. Per evitare di confondere degli incroci, a cui non corrisponde un collegamento elettrico (fig. 1b), con dei nodi bisogna evidenziare questi ultimi in modo adeguato (fig. 1a): in effetti nei casi in cui non esista ambiguità interpretativa è anche possibile evitare di evidenziare i nodi.

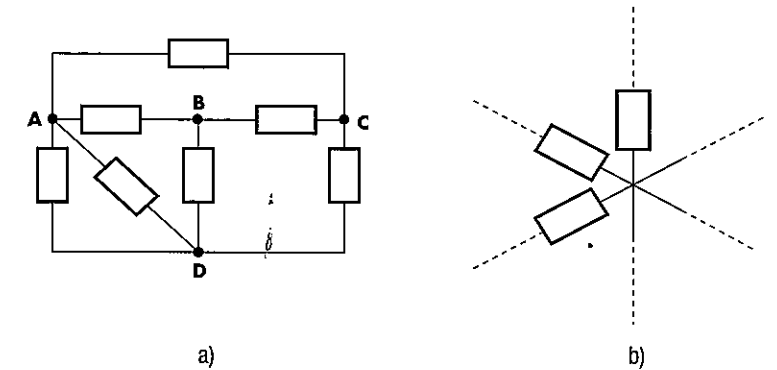


Figura 1

I punti A-B-C-D sono dei nodi (a), mentre se non è evidenziato il collegamento non si ha un nodo (b).

Ramo e maglia

- Si definisce **ramo** un tratto di circuito compreso tra due nodi.
- In figura 1a sono rami i tratti A-B, B-C, C-D, A-C, B-D e i due tratti A-D.
- Si definisce **maglia** un percorso chiuso che, partendo da un nodo, torna allo stesso.
- In figura 1a sono maglie i percorsi chiusi A-B-C-A, A-B-D-A, A-D-A, B-C-D-B, A-C-D-A.

Componenti in serie e in parallelo

- Più componenti inseriti sullo stesso ramo si dicono **in serie** (fig. 2a).
- Più componenti collegati tra gli stessi nodi si dicono **in parallelo** (fig. 2b).

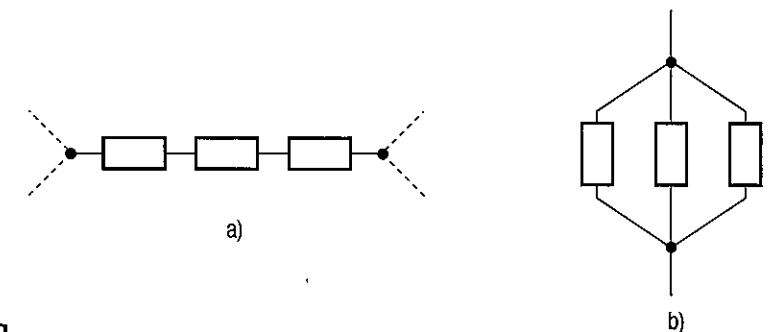


Figura 2

Componenti in serie (a) e in parallelo (b).

In altri termini si può dire che più componenti sono in serie se sono tutti attraversati dalla **stessa corrente**; si dicono invece in parallelo se hanno ai loro capi tutti la **stessa tensione**.

Vedremo nel successivo paragrafo il componente "resistore" che in unione al componente "generatore elettrico" permettono la realizzazione dei circuiti elettrici più semplici, che verranno introdotti nel seguito di questa sezione.

2. La resistenza, il resistore e la legge di Ohm

Lezione multimediale **2B.1**

Lezione multimediale **2B.3**

Curva caratteristica

Il **resistore** è un componente a due terminali (bipolo), *lineare e passivo*. La grandezza elettrica che lo contraddistingue è la **resistenza**, che si misura in ohm (Ω).

La curva caratteristica ideale di un resistore, che in prima approssimazione può considerarsi coincidente con quella reale, è riportata in **figura 3** ed è *tipica di un componente lineare*.

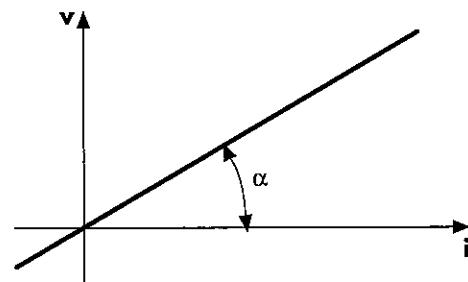


Figura 3
Curva caratteristica di un resistore ideale.

Matematicamente la caratteristica di un resistore è esprimibile con la relazione:

$$v(t) = R \cdot i(t) \quad \mathbf{1}$$

Legge di Ohm

Le legge di Ohm nella forma **1** venne scoperta nel 1826 dal tedesco **Georg Simon Ohm** (1789-1854) e viene spesso indicata come **prima legge di Ohm** per distinguerla dalla **seconda** che esprime la dipendenza della resistenza di un conduttore dalla sua lunghezza (proporzionalità diretta) e dalla sua sezione (proporzionalità inversa).

Questa esprime, nella sua formulazione più elementare, la **legge di Ohm**. Il termine $v(t)$ rappresenta la tensione, o differenza di potenziale (d.d.p.), che in un certo istante t si presenta ai capi dell'elemento resistivo e $i(t)$ la corrente che lo attraversa nello stesso istante. Al variare di i anche la tensione v cambia in modo *direttamente proporzionale*: il coefficiente di proporzionalità è la resistenza R ; più rigorosamente si dovrebbe precisare di operare a temperatura costante perché la resistenza, sia pure di poco, varia con la temperatura. Noi qui supporremo questa variazione trascurabile, considerando quindi la resistenza lineare.

Poiché il rapporto v/i , a parità di i , cresce al crescere dell'angolo α (fig. 4), si vede che, all'aumentare di questo angolo, aumenta anche R ; per $\alpha = 90^\circ$ si ha un valore infinito di R , per $\alpha = 0$ si ha un valore nullo di R .

Trigonometricamente risulta infine:

$$R = \operatorname{tga} \quad \mathbf{2}$$

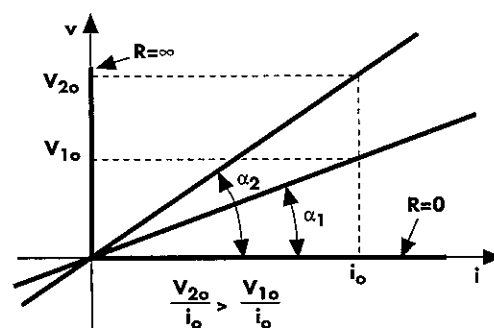


Figura 4
La resistenza cresce al crescere di α .

Se ai capi di un resistore è presente una tensione, questo è sicuramente attraversato da una corrente e, viceversa, se un resistore è attraversato da una corrente, ai suoi capi è sicuramente presente una tensione, salvo che nei casi limite di resistenza nulla (**cortocircuito**) e resistenza infinita (**circuito aperto**); nel primo caso infatti si ha *corrente senza tensione*, nel secondo *tensione senza corrente*.

In un **bipolo passivo** corrente e tensione hanno versi opposti.

Nelle **figure 3 e 4** la corrente è l'eccitazione e la tensione è la risposta, perché in questi termini si esprime la **1** ma nulla impedisce di fare la scelta opposta. Si noti anche che la resistenza è una caratteristica tipica di tutti gli elementi elettrici conduttori e non solo dei resistori.

In **figura 5** sono riportati i due simboli più usati per le resistenze. Sempre in **figura 5** si è evidenziato che, poiché la corrente convenzionalmente va dal punto a potenziale più alto a quello più basso, *il suo verso risulta opposto a quello della tensione* (per la quale la punta della freccia indica il punto a potenziale più alto).

Questa proprietà, generalizzando, va estesa a tutti i bipoli passivi, di cui la resistenza è solo l'esempio più elementare.

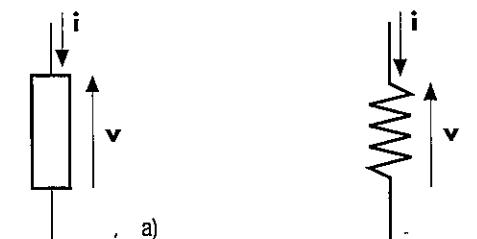


Figura 5
Simboli delle resistenze.

La legge di Joule e la potenza elettrica

In un conduttore reale e quindi a resistenza non nulla, e pertanto anche in un resistore, *il moto degli elettroni imposto dalla corrente è ostacolato nel suo movimento dalla resistenza*. Si verifica quindi un fenomeno di riscaldamento, ovvero avviene una dissipazione di energia cinetica sotto forma di energia termica.

Il fenomeno è correttamente descritto dalla **legge di Joule** che afferma:

La legge di Joule ■ un conduttore di resistenza R , attraversato da una corrente di intensità I , dissipa in calore nell'intervallo di tempo Δt , in cui la corrente assume il valore I , l'energia elettrica:

$$W = RI^2\Delta t \quad \mathbf{3}$$

Come noto, la potenza esprime l'energia nell'unità di tempo, pertanto in una resistenza R attraversata da una corrente I si ha una **dissipazione di potenza** pari a:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = RI^2 \quad \mathbf{4}$$

Ricordando la legge di Ohm si può anche scrivere:

$$P = RI^2 = RI \cdot I = VI \quad \mathbf{5}$$

o ancora:

$$P = RI^2 = R\left(\frac{V}{R}\right)^2 = \frac{V^2}{R} \quad \mathbf{6}$$

Naturalmente qualora le grandezze elettriche non siano costanti le precedenti relazioni, che esprimono la potenza dissipata da una resistenza, si possono scrivere nella forma:

$$p(t) = vi = Ri^2 = \frac{v^2}{R} \quad \mathbf{7}$$

La legge di Joule giustifica il riscaldamento dei resistori e quindi spiega perché la loro linearità sia solo un'approssimazione. Per essere veramente lineari il loro valore di resistenza non dovrebbe dipendere dalla temperatura.

Linearità e temperatura

Va a questo punto chiarito che la legge di Joule giustificando il riscaldamento dei conduttori attraversati da corrente chiarisce anche perché i conduttori in generale e i resistori in particolare non sono se non *approssimativamente* lineari: la corrente attraversandoli determina un riscaldamento e quindi una variazione della loro temperatura e quindi della resistenza che dipende sia pure di poco dalla temperatura.

Forme costruttive dei resistori

I resistori assumono dimensioni diverse in relazione alla potenza dissipabile (le dimensioni di figura 6a, anche se indicative, sono reali).

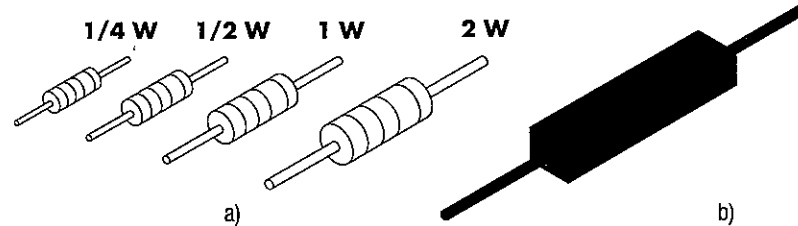


Figura 6 Resistori per piccole potenze con codice a colori (a) e di potenza elevata (b).

Per potenze superiori ai 2 W (fig. 6b) si ricorre a forme e metodi costruttivi diversi. Per basse potenze il valore numerico della resistenza è individuabile tramite un opportuno codice a colori; per resistori di potenza elevata il valore è riportato direttamente, in forma numerica, sul contenitore.

Facciamo il punto

la legge di Ohm dice che: $V = RI$

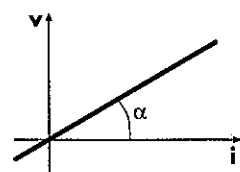
se si trascura l'effetto della temperatura

si considera R costante

e quindi

il resistore è lineare

graficamente



al crescere di α cresce $R \Rightarrow \begin{cases} \text{con } \alpha = 0^\circ & R = 0 \\ \text{con } \alpha = 90^\circ & R = \infty \end{cases}$

La legge di Ohm

R si dice resistenza
il componente bipolare di resistenza R è detto resistore

dimensionalmente

R si misura in ohm $[\Omega]$
 $\text{ohm}[\Omega] = \frac{\text{volt}[V]}{\text{ampere}[A]}$

$P = VI$ esprime la potenza dissipata

applicando la legge di Ohm

$P = \frac{V^2}{R}$
 $P = RI^2$

3. Il generatore elettrico

Concetto elementare di generatore

Come già visto nella sezione 2A, si può considerare **generatore elettrico** un componente attivo a due terminali capace di produrre ai suoi estremi una certa differenza di potenziale. Se si collega un generatore a un interruttore e ad una resistenza, si possono verificare le due situazioni di figura 7a e b.

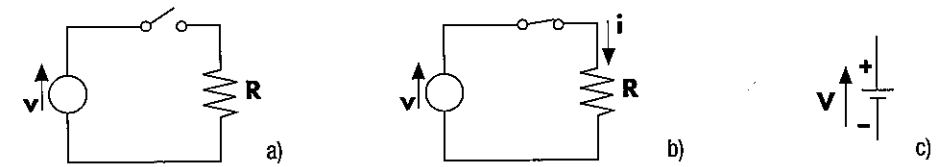


Figura 7 Circuito aperto (a): non circola corrente; circuito chiuso (b): circola corrente; simbolo della batteria (c).

Circuito aperto e chiuso

In figura 7a il circuito è aperto e quindi non passa corrente (la tensione applicata ai capi della resistenza è nulla). In figura 7b il circuito è chiuso e quindi passa una corrente $i = v/R$ (la tensione v del generatore è posta ai capi di R). In figura 7c il simbolo della batteria, che è un esempio classico di generatore elettrico.

4. Circuiti serie

La massa

Si considera **massa** di un circuito quella parte dello stesso che è ritenuta, *convenzionalmente*, a potenziale zero.

Il concetto di massa è molto importante in quanto le tensioni più significative vengono normalmente valutate rispetto a questa. La massa è indicata con il simbolo \perp .

Lezione multimediale **2B.2**

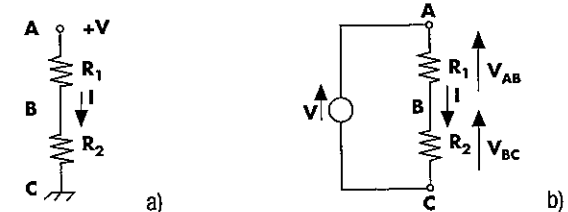


Figura 8 Due modi diversi di rappresentare due resistenze in serie.

In figura 8a è considerato il caso di due resistenze in serie che, come tali, sono entrambe attraversate dalla stessa corrente. Si noti che si usano simboli con lettere maiuscole perché ci si riferisce a grandezze continue (DC).

Se si prescinde dal concetto di massa, il circuito è equivalente a quello di figura 8b. Se si pone, ad esempio, $V = 30$ V, $R_1 = 100$ Ω e $R_2 = 220$ Ω e si procede a una misura sperimentale della corrente, si ottiene un valore pari a quello che si ricava con il seguente calcolo:

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{30}{320} \approx 0,0937 \text{ A} \approx 93,7 \text{ mA}$$

Generalizzando questo risultato si può dire che: *le resistenze in serie sono equivalenti a un'unica resistenza pari alla loro somma:*

$$R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

R_s rappresenta la resistenza equivalente delle n resistenze in serie.

Per la legge di Ohm risulta poi:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I \approx 9,37 \text{ V}; \quad V_{BC} = R_2 \cdot I \approx 20,6 \text{ V}$$

Da questi risultati si ricava:

$$V = V_{AB} + V_{BC} = R_1 I + R_2 I \approx 30 \text{ V}$$

In serie le tensioni si sommano.

■ Anche questa relazione, scritta nel caso particolare di due resistenze in serie, può essere generalizzata; si può quindi dire che: *la tensione applicata a un gruppo di resistenze in serie è pari alla somma delle tensioni ai capi delle singole resistenze.*

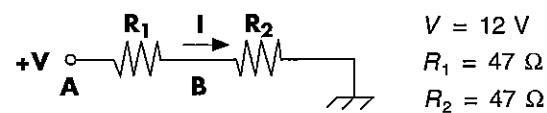
Ricordando la definizione di massa si può dire che in A è presente una tensione, rispetto a massa, di +30 V, in B di +20,6 V e in C, ovviamente, di 0 V. Poiché, come noto, la corrente va dal punto a potenziale più alto a quello più basso, le tensioni sulle singole resistenze sono dette **cadute di tensione** (c.d.t.); ad esempio nel nostro caso, la tensione passando da A a B e da B a C continua a diminuire, cioè a "cadere".

AULADIGITALE
 Scheda integrativa 2B.1
 Il calcolo approssimato

Esempio 1

Calcolare: a) la corrente i ; b) la c.d.t. sulle resistenze; c) la tensione in B, rispetto a massa.

Figura 9



$V = 12 \text{ V}$
 $R_1 = 47 \Omega$
 $R_2 = 47 \Omega$

Risulta:

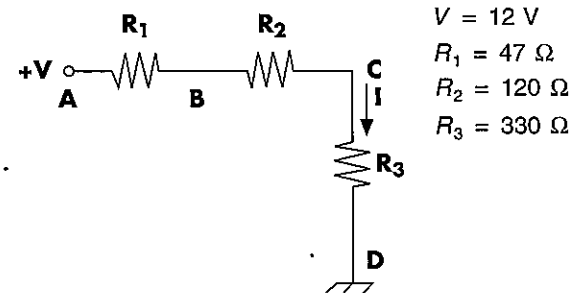
$$R_S = R_1 + R_2 = 47 + 47 = 94 \Omega; \quad i = \frac{V}{R_S} = \frac{12}{94} \approx 0,128 \text{ A} = 128 \text{ mA}$$

Essendo le due resistenze uguali, anche le c.d.t. sono: $V_1 = V_2 = R \cdot i = 6 \text{ V}$.
 La tensione in B, rispetto a massa, corrisponde alla c.d.t. su R_2 e quindi $V_B = 6 \text{ V}$.

Esempio 2

Calcolare: a) la corrente i ; b) le tensioni V_B e V_C rispetto a massa.

Figura 10



$V = 12 \text{ V}$
 $R_1 = 47 \Omega$
 $R_2 = 120 \Omega$
 $R_3 = 330 \Omega$

Risulta:

$$R_S = 497 \Omega; \quad i = \frac{V}{R_S} \approx 24,1 \text{ mA}; \quad V_B = V_A - V_{AB} = V_A - R_1 \cdot i \approx 10,87 \text{ V}$$

Si ricava infine:

$$V_C = V_A - V_{AB} - V_{BC} \approx 7,9 \text{ V} \quad \text{oppure} \quad V_C = V_{CD} = R_3 \cdot i \approx 7,9 \text{ V}$$

Il partitore di tensione

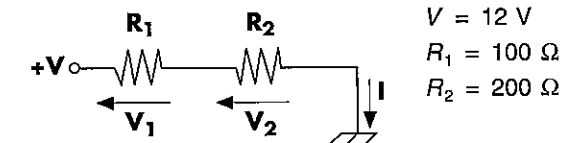
Spesso si dice che le resistenze in serie costituiscono un **partitore di tensione**: questo nome deriva dalla constatazione che *la tensione totale disponibile ai capi di più resistenze in serie si ripartisce, sulle singole resistenze, in modo direttamente proporzionale alle stesse.* Oppure, in modo del tutto equivalente, si può affermare che in un partitore di tensione il rapporto tra le tensioni è uguale a quello tra le resistenze.

Tra più resistenze in serie la tensione totale si ripartisce in modo direttamente proporzionale alle resistenze stesse.

Esempio 3

Calcolare le tensioni ai capi delle singole resistenze.

Figura 11



$V = 12 \text{ V}$
 $R_1 = 100 \Omega$
 $R_2 = 200 \Omega$

Per calcolare la tensione sulle singole resistenze basta osservare che:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3}$$

Questo vuole dire che la c.d.t. su R_1 è 1/3 di V ; risulta quindi $V_1 = 4 \text{ V}$.
 Per V_2 basta osservare che $R_2 = 2R_1$, e pertanto $V_2 = 8 \text{ V}$.

Se si dispone di un segnale di ampiezza eccessiva, questo può essere attenuato di una quantità nota usando un partitore di tensione (fig. 12).

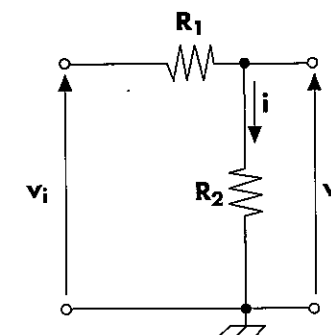


Figura 12

Il partitore usato come attenuatore.

Detti v_i il segnale in ingresso (input) e v_o quello in uscita (output), risulta:

$$v_o = v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{9}$$

Per comprendere la **9** si noti che:

$$i = \frac{v_i}{R_1 + R_2} \tag{10}$$

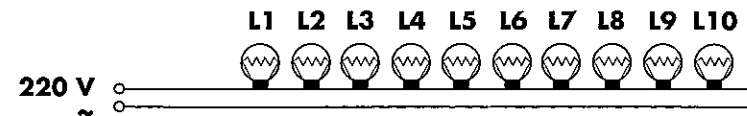
e che:

$$v_o = R_2 \cdot i \tag{11}$$

Se si sostituisce la **10** nella **11** si ottiene la **9**. Se ad esempio $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, si ottiene $v_o = 1/2 v_i$.

non solo teoria 1

Le luci dell'albero di Natale



Il modo più semplice per collegare le luci di un albero di Natale è quello di metterle in serie. Se le luci sono tutte uguali ogni lampadina avrà la stessa tensione di alimentazione perché, avendo tutte la stessa corrente, sono uguali anche le c.d.t. Ad esempio, in figura se ne considerano 10: usando la tensione di rete da 220 V ogni lampadina sarà alimentata con 22 V. In commercio esistono luci da 12 V e da 24 V quindi se servono 10 luci si useranno lampadine da 24 V (un poco di tolleranza in eccesso non guasta ...), se ne servono 20 si useranno lampadine da 12 V. Unico inconveniente di questo semplice metodo: se si rompe una lampadina si interrompe il circuito e si spengono tutte le luci...

5. Le grandezze elettriche in un circuito e gli strumenti per misurarle

Lezione multimediale **2B.2**

Riprendiamo il circuito di figura 8; in base a quanto sin qui studiato, in esso si possono evidenziare diverse grandezze elettriche:

- ▶ le cadute di tensione V_{AB} e V_{BC} sulle due resistenze;
- ▶ la corrente I comune al generatore e alle resistenze;
- ▶ le potenze dissipate sulle singole resistenze $P_1 = V_{AB} I$ e $P_2 = V_{BC} I$.

La potenza totale dissipata sarà pari alla somma di quelle dissipate dai singoli componenti. Siccome l'energia dissipata non può che coincidere con quella erogata dal generatore P_G si può anche scrivere:

$$P_G = VI = P_1 + P_2 \quad 12$$

La relazione 12 ha validità generale: la potenza globalmente dissipata in un circuito è somma delle potenze dissipate dai vari componenti del circuito e coincide con le potenze erogate dai generatori presenti nel circuito stesso.

Per la misura delle grandezze elettriche, facendo per comodità sempre riferimento al circuito di figura 8, si dispongono di due strumenti base:

- ▶ il voltmetro;
- ▶ l'amperometro.

Per la misura di una corrente si deve inserire uno strumento amperometrico in serie all'elemento circuitale (o più in generale al ramo) di cui interessa la corrente (fig. 13a): per evitare che l'inserimento dell'amperometro alteri il comportamento del circuito, e quindi la misura di corrente, bisogna che l'amperometro presenti una resistenza interna equivalente trascurabile (molto piccola rispetto alla equivalente serie del ramo di misura; nel nostro caso di $R_1 + R_2$).

Per la misura di tensione si deve porre in parallelo al ramo da misurare un voltmetro (fig. 13b): per evitare alterazioni nel circuito è importante che la resistenza interna equivalente del voltmetro sia molto più elevata di quella del ramo di misura, in modo che la corrente assorbita dal voltmetro sia trascurabile.

In entrambi i casi gli strumenti vanno inseriti con le corrette polarità. Se poi interessano delle misure di potenza e si opera in corrente continua queste possono essere ottenute in modo indiretto attraverso le misure di tensioni e correnti come indicato in figura 13c.

La potenza generata coincide con quella dissipata.

Amperometro: in serie al ramo di misura con resistenza interna trascurabile.

Voltmetro: in parallelo al ramo di misura con resistenza interna molto alta.

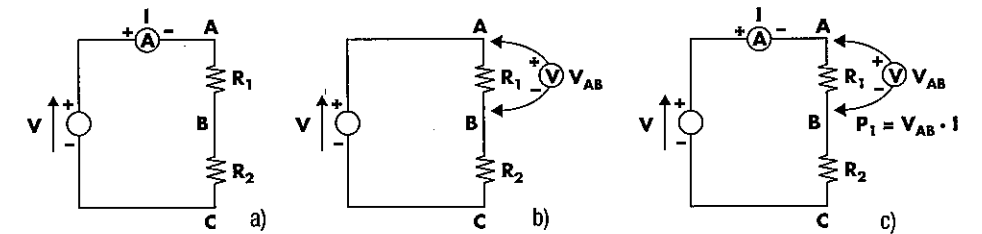


Figura 13 Misura della corrente I (a) della tensione V_{AB} (b) e della potenza P_1 (c).

In effetti esistono appositi strumenti per le misure delle potenze elettriche ma il loro uso non è strettamente necessario finché si opera in corrente continua.

6. Il potenziometro e il trimmer

In elettronica e nelle telecomunicazioni spesso si ha necessità di ricorrere a partitori di tensione regolabili; ciò si ottiene con appositi componenti noti con il nome di potenziometri.

Questi possono essere regolati tramite manopola rotativa o con un cursore a movimento rettilineo; per regolazioni da effettuare solo in sede di taratura sono disponibili anche potenziometri semifissi (spesso chiamati trimmer resistivi), regolabili tramite giravite. In figura 14a sono riportati i simboli più usati per questi componenti: i terminali A e B rappresentano gli estremi, usati come ingressi; C corrisponde al cursore mobile e in unione con A o B è usato come uscita.

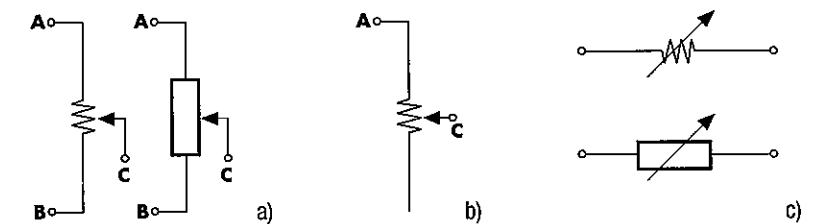
Se si usano solo due estremi, dei quali uno sia il cursore mobile (fig. 14b), lo stesso componente si usa come resistore variabile ed è chiamato reostato.

Spesso un resistore variabile è schematizzato per semplicità come in figura 14c.

Il potenziometro e il trimmer sono dei partitori di tensione.

Figura 14 Simbologie più diffuse per i potenziometri.

AULADIGITALE Scheda integrativa 2B.2 Inserzione potenziometrica



Forme costruttive

In figura 15 sono riportate delle tipiche forme costruttive di potenziometri; la figura a) si riferisce a un potenziometro rotativo, la figura b) a uno a cursore lineare, la figura c) a uno semifisso e la figura d) a uno semifisso multigiri.

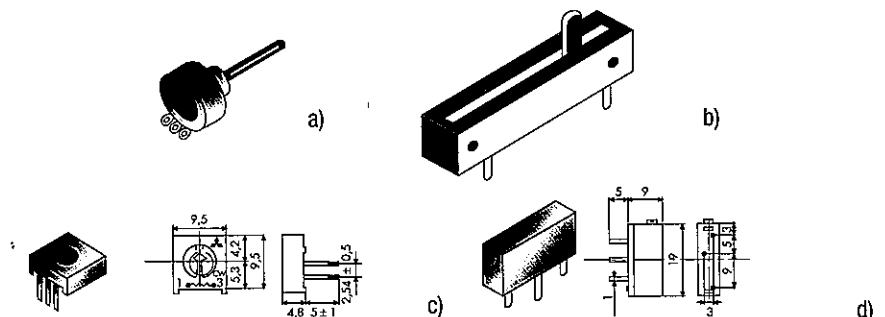
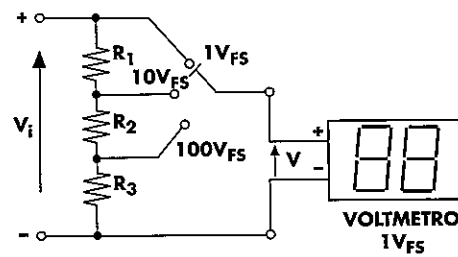


Figura 15 Potenziometro rotativo (a), potenziometro a cursore lineare (b), potenziometro semifisso (c) e potenziometro semifisso multigiri (d).

non solo teoria 2



Cambio portata di un voltmetro

Il circuito proposto è formato da un partitore di tensione con un commutatore meccanico (in pratica un potenziometro con delle posizioni stabilite): se si suppone la resistenza di ingresso del voltmetro (qui supposto a lettura numerica) molto alta rispetto alla resistenza serie del partitore, quest'ultimo è come se funzionasse senza carico e quindi è valida la relazione 9. Per il dimensionamento delle tre resistenze si può ricorrere al sistema di queste tre equazioni (avendo posto $R_1 + R_2 + R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ la resistenza interna del voltmetro deve essere come minimo di $1 \text{ M}\Omega$ per essere considerata molto più grande):

$$R_1 + R_2 + R_3 = 100 \text{ k}\Omega \quad \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} = 10 \quad \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} = 100$$

Si trovano i seguenti valori: $R_1 = 90 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 9 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$. In pratica si possono usare resistori all'1% della serie E96 di $90,9 \text{ k}\Omega$; $9,09 \text{ k}\Omega$ e $1 \text{ k}\Omega$.

7. Circuiti parallelo

Lezione multimediale 2B.2

Resistenza equivalente

Come noto, due o più resistenze in parallelo sono soggette tutte alla stessa tensione. Si può dimostrare che, detto n il numero di resistenze in parallelo, la resistenza equivalente R_p è ricavabile dalla seguente relazione:

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad 13$$

Per giustificare la 13 si tenga presente che, per il principio di conservazione delle cariche elettriche, la corrente totale entrante in un gruppo di resistenze in parallelo non può che essere pari alla somma delle correnti che le attraversano (ad esempio in figura 16 risulta $I = I_1 + I_2 + I_3$). Inoltre, essendo in parallelo, le resistenze hanno tutte la stessa tensione.

Si può quindi porre:

$$R_p = \frac{V}{I} = \frac{V}{\frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \dots + \frac{V}{R_n}} \quad 14$$

Raccogliendo e semplificando V si ottiene la relazione 13.

Nel caso particolare di due sole resistenze, la relazione 13 può anche essere scritta nel seguente modo:

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad 15$$

In parallelo si sommano le correnti.

Si osservi che la R_p risulta sempre inferiore al valore delle singole resistenze. Per quanto sin qui detto, è facile comprendere che la corrente totale entrante in un parallelo di resistenze si ripartisce tra le stesse in modo inversamente proporzionale al loro valore.

Da questo punto di vista si dice che le resistenze in parallelo formano un **partitore di corrente**. I successivi due esempi numerici dovrebbero aiutare a chiarire i concetti appena esposti.

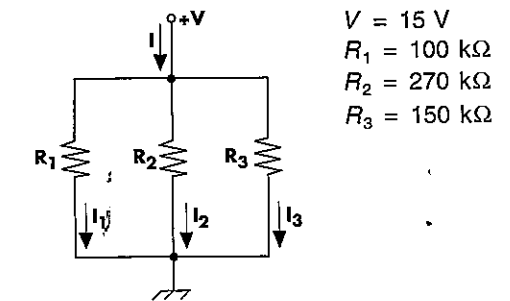
Nel caso particolare di due sole resistenze in parallelo R_1 e R_2 attraversate, rispettivamente, dalle correnti I_1 e I_2 (con $I = I_1 + I_2$), il partitore di corrente si traduce nelle semplici relazioni:

$$I_1 = \frac{I \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad I_2 = \frac{I \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad 16$$

Esempio 4

Calcolare: a) la resistenza equivalente parallelo; b) le correnti nelle singole resistenze e quella totale.

Figura 16



$V = 15 \text{ V}$
 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 270 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 150 \text{ k}\Omega$

Applicando la 13 si ottiene $R_p = 49 \text{ k}\Omega$. Le correnti nelle singole resistenze risultano:

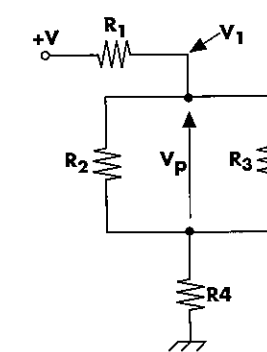
$$I_1 = \frac{V}{R_1} = 150 \mu\text{A} \quad I_2 = \frac{V}{R_2} = 55 \mu\text{A} \quad I_3 = \frac{V}{R_3} = 100 \mu\text{A}$$

La corrente totale si ottiene dalla somma delle tre precedenti: $I = I_1 + I_2 + I_3 = 305 \mu\text{A}$. Naturalmente la I risulta anche uguale a $I = V/R_p$.

Esempio 5

Calcolare: a) la tensione V_1 ; b) la tensione V_p ai capi del parallelo.

Figura 17



$V = 20 \text{ V}$
 $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$
 $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$

Poiché il parallelo tra R_2 e R_3 risulta $5 \text{ k}\Omega$, supposto, in prima approssimazione, $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ si può ritenere $V_1 = 3/4 V = 15 \text{ V}$. Analogamente $V_p = 1/4 V = 5 \text{ V}$. In termini più rigorosi, detta $R_p = 5 \text{ k}\Omega$ la resistenza del parallelo tra R_2 e R_3 , la resistenza serie totale risulta data da $R_S = R_1 + R_p + R_4 = 19,7 \text{ k}\Omega$ e quindi la corrente assorbita dall'alimentazione risulta $I = V/R_S = 1,015 \text{ mA}$. Le tensioni cercate risultano infine $V_p = R_p \cdot I = 5,075 \text{ V}$ e $V_1 = (R_4 + R_p) \cdot I = 15,23 \text{ V}$.

Facciamo il punto

Nel caso più semplice in un circuito ci sono: **generatori elettrici e resistori**

si dicono

in serie più resistori attraversati dalla stessa corrente

si dicono

in parallelo più resistori ai cui capi è applicata la stessa tensione

in questo caso

$$R_S = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

più resistori in serie

in questo caso

$$R_P = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

più resistori in parallelo

I circuiti serie e parallelo

in serie si sommano le tensioni

ovvero

si dice che formano un **partitore di tensione**: più resistori in serie ripartiscono la tensione totale in modo direttamente proporzionale al loro valore

si dice che formano un **partitore di corrente**: più resistori in parallelo ripartiscono la corrente totale in modo inversamente proporzionale al loro valore

ovvero

in parallelo si sommano le correnti

Equazione di comportamento

La caratteristica esprime graficamente la relazione:

$$i = C \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

17

Se il rapporto $\Delta v/\Delta t$ è molto piccolo si calcola la corrente istantanea, altrimenti quella media.

Questa relazione evidenzia che un condensatore è attraversato da corrente solo se la tensione ai suoi capi varia nel tempo ($\Delta v/\Delta t \neq 0$). Il rapporto $\Delta v/\Delta t$, che esprime il valore istantaneo della corrente, deve essere ottenuto considerando intervalli *più piccoli possibili* (matematicamente si parla di intervalli infinitesimi e il loro rapporto è detto *derivata* della tensione rispetto al tempo); se gli intervalli Δt non sono sufficientemente brevi, la 17 esprime la corrente media nell'intervallo considerato.

Un'altra relazione che descrive il comportamento di un condensatore è:

$$Q = CV \quad 18$$

dove Q esprime le cariche accumulate sulle singole armature e V la tensione ai capi del condensatore.

Dall'analisi della figura 18 si ottiene che:

$$C = \text{tg} \alpha \quad 19$$

Condensatori in parallelo

La capacità equivalente di n condensatori in parallelo è pari alla somma delle singole capacità:

$$C_P = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad 20$$

Condensatori in serie

La capacità equivalente di più condensatori in serie si ricava con la relazione:

$$C_S = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad 21$$

Le capacità in serie si riducono, in parallelo si sommano.

Si può quindi dire che *le capacità in parallelo aumentano e in serie diminuiscono*. La figura 19 si riferisce ai simboli più usati per i condensatori. La figura 19b, in particolare, si riferisce a quelli *polarizzati*, che richiedono di essere inseriti in circuito rispettando le giuste polarità (elettrolitici); la figura 19c si riferisce ai condensatori a capacità variabile (trimmer capacitivi).

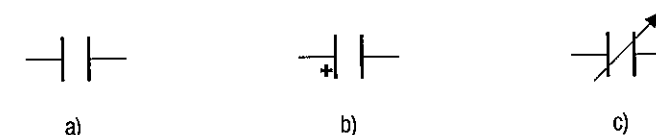


Figura 19

Simbolo generico di un condensatore (a), condensatore polarizzato (b) e condensatore variabile (c).

8. Il condensatore

Il condensatore è un *componente bipolare e passivo* capace di accumulare cariche elettriche sulle sue armature (elettrodi); la grandezza elettrica che lo contraddistingue è la **capacità C** , che si misura in **farad**.

In figura 18 è riportata la caratteristica di un condensatore ideale, che in prima approssimazione può essere ritenuta coincidente con quella di uno reale.

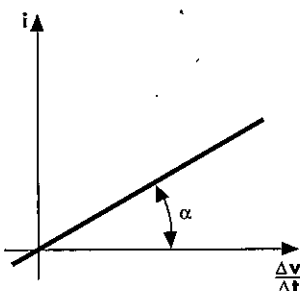


Figura 18

Retta caratteristica di un condensatore.

Nella figura 20 (a pagina seguente) sono riportate alcune tipiche forme costruttive: per capacità inferiori al microfarad si ricorre normalmente a condensatori *ceramici* (fig. 20a) o a *dieletrico plastico* (fig. 20b); per capacità più elevate si usano gli *elettrolitici*; in figura sono riportate delle forme costruttive riferite agli elettrolitici classici con dielettrico in *ossido di alluminio* (fig. 20c) e a quelli al *tantalio* (fig. 20d), che presentano una maggiore miniaturizzazione.

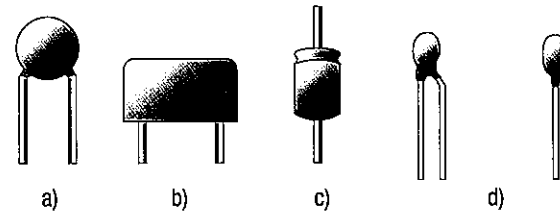


Figura 20
Condensatore ceramico (a), condensatore a dielettrico plastico (b), condensatore elettrolitico con dielettrico in ossido di alluminio (c) e condensatori elettrolitici al tantalio (d).

9. Fenomeni transitori nei circuiti RC

Costruttivamente il condensatore è composto da due lastre metalliche, dette **armature**, tra loro elettricamente isolate. Il condensatore pertanto in DC non conduce ma al momento dell'inserimento dell'alimentazione in un circuito con condensatori si verificano dei fenomeni transitori che determinano delle momentanee correnti, fino al raggiungimento dell'equilibrio tra le cariche presenti sulle armature.

Transitorio di carica

Si analizza che cosa succede nel circuito di **figura 21** quando si chiude l'interruttore T , supposti V una tensione continua e il condensatore inizialmente scarico.

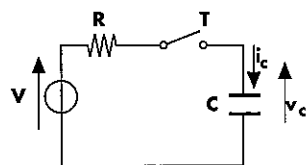


Figura 21
Circuito per lo studio del transitorio di carica di un condensatore.

Ipotesi iniziale

Con T aperto si ipotizza il condensatore scarico e quindi $v_c = 0$.

Ipotesi finale

Con T chiuso a transitorio esaurito, poiché V è costante, non ci può essere corrente ($\Delta v/\Delta t = 0$), quindi non si ha c.d.t. su R e risulta $v_c = V$.

Tra il regime permanente iniziale ($v_c = 0$) e quello finale ($v_c = V$) deve esistere un fenomeno transitorio durante il quale il condensatore si carica gradualmente. La **figura 22** evidenzia gli andamenti nel tempo della corrente e della tensione relative al condensatore durante questo transitorio di carica.

Come si vede, la tensione ai capi del condensatore cresce gradualmente, da un valore iniziale nullo, e tende a raggiungere il valore a regime in un tempo che, teoricamente infinito, in pratica è pari a 5τ .

Con τ si intende la **costante di tempo** del circuito pari a:

$$\tau = RC$$

Tracciando le rette tangenti alle curve nel punto corrispondente a $t = 0$ è possibile risalire al valore della costante di tempo.

Per quanto detto, si deduce che i tempi di carica sono direttamente proporzionali alla costante di tempo τ .

Costante di tempo

Dopo un tempo pari a 5τ il condensatore è praticamente carico.

Completando l'analisi della **figura 22** si vede che la corrente passa da un valore iniziale massimo (inizialmente C è un cortocircuito) a un valore finale nullo (C si comporta da circuito aperto).

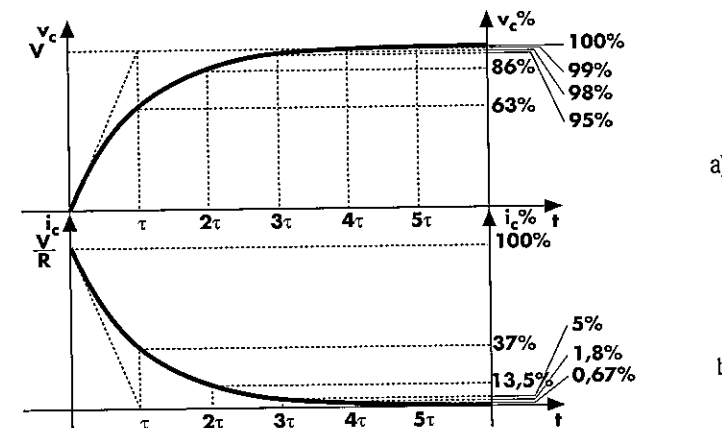


Figura 22
Andamento della tensione durante il transitorio di carica di un condensatore inizialmente scarico (a) e andamento della corrente (b).

Transitorio di scarica

Si considera ora il caso di un condensatore inizialmente carico e se ne analizza il transitorio in fase di scarica supponendo di chiudere l'interruttore (**fig. 23**).

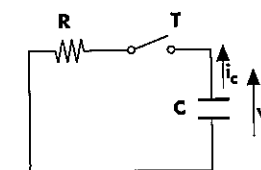


Figura 23
Circuito per lo studio del transitorio di scarica.

Ipotesi iniziale

$v_c = V$, con T aperto non si ha corrente e C mantiene la tensione V .

Ipotesi finale

Non si hanno generatori, quindi $i_c = 0$ e pertanto $v_c = 0$.

Il transitorio, anche in questo caso, è descrivibile attraverso un grafico (in **figura 24** è riportata la simulazione con $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ e tensione iniziale $V_C = 10 \text{ V}$).

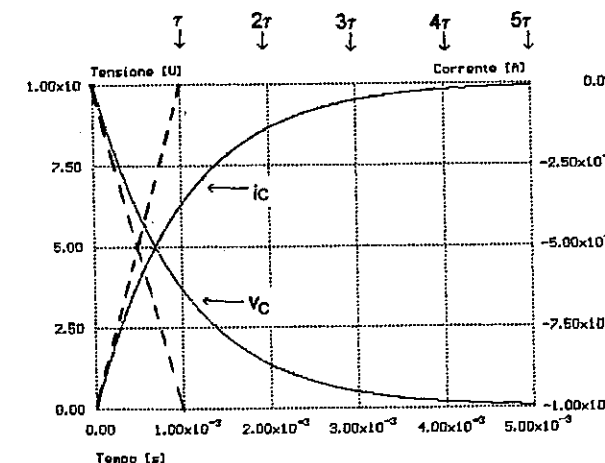


Figura 24
Simulazione del transitorio di scarica di un condensatore.

Durante la scarica la tensione decresce gradualmente e così pure la corrente; quest'ultima presenta un verso contrario rispetto a quello di carica (la scarica può ritenersi completa dopo un tempo pari a 5τ).

Studio analitico

Analiticamente le curve di carica e scarica risultano le seguenti:

Carica $\left\{ \begin{array}{l} v_c = V(1 - e^{-t/\tau}) \\ i_c = \frac{V}{R}e^{-t/\tau} \end{array} \right.$ **23**

Scarica $\left\{ \begin{array}{l} v_c = V \cdot e^{-t/\tau} \\ i_c = -\frac{V}{R}e^{-t/\tau} \end{array} \right.$ **24**

L'uso di queste relazioni permette lo studio completo dei transistori di carica e scarica ma per semplicità la loro giustificazione viene omessa.

Esempio 6

Si fissi, nel circuito di **figura 21**, $V = 10 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ e $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$; supposto inizialmente scarico calcolare v_c e i_c dopo 20 ms dalla chiusura di T .

Si calcola inizialmente la costante di tempo τ :

$$\tau = RC = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^3 \approx 10 \text{ ms}$$

La tensione si calcola con la prima delle **23**:

$$v_c = V(1 - e^{-t/\tau}) = 10(1 - e^{-2}) = 8,65 \text{ V}$$

Per il calcolo della i_c si può ricorrere alla seconda delle **23** oppure, noto il valore di v_c , ricavare la c.d.t. su R e applicare la legge di Ohm:

$$v_R = V - v_c = 10 - 8,65 = 1,35 \text{ V} \quad i_c = \frac{v_R}{R} = 1,35 \text{ mA}$$

Test

- Par. 1** **1** Un componente si dice bipolo se:
a ha tre terminali;
b ha due terminali;
c la corrente può attraversarlo in entrambi i sensi;
d deve essere sottoposto a una tensione bipolare.
- Par. 1** **2** Un ramo:
a è un sinonimo di maglia;
b è un tratto di circuito tra due componenti;
c è un tratto di circuito tra due nodi;
d è un tratto di circuito tra due maglie.
- Par. 1** **3** Una maglia:
a è un sinonimo di ramo;
b è un tratto di circuito tra due nodi;
c è un tratto di circuito che partendo da un nodo torna allo stesso nodo;
d è un tratto tra due o più rami.
- Par. 2** **4** Un resistore è:
a un sinonimo di resistenza;
b una resistenza di valore noto;
c un componente elettronico che presenta un ben definito valore di resistenza;
d la resistenza che assume un valore stabilito.
- Par. 2** **5** Per la legge di Ohm se ai capi di un resistore si applica una tensione, supposta costante, al crescere della resistenza:
a aumenta la corrente;
b diminuisce la corrente;
c la corrente non cambia.
d nessuno dei casi precedenti.
- Par. 3** **6** Un generatore elettrico è:
a un bipolo passivo;
b un dispositivo attivo attraversato da corrente;
c un dispositivo che determina una caduta di tensione;
d un dispositivo bipolare che impone ai suoi capi una certa differenza di potenziale.
- Par. 4** **7** Due resistenze in serie:
a sono attraversate dalla stessa corrente;
b sono attraversate da correnti uguali;
c hanno la stessa differenza di potenziale;
d sono necessariamente uguali.
- Par. 4** **8** Due resistenze in parallelo:
a sono attraversate dalla stessa corrente;
b presentano ai loro capi la medesima differenza di potenziale;
c presentano ai loro estremi tensioni uguali;
d hanno un valore resistivo metà di quello delle singole.
- Par. 4** **9** In un circuito composto da più resistori in serie:
a la tensione si ripartisce sui singoli resistori in modo inversamente proporzionale alle singole resistenze;
b la corrente si ripartisce nei singoli resistori in modo inversamente proporzionale alle singole resistenze;
c la corrente si ripartisce nei singoli resistori in modo direttamente proporzionale alle singole resistenze;
d la tensione si ripartisce sui singoli resistori in modo direttamente proporzionale alle singole resistenze.
- Par. 6** **10** Un reostato è:
a un sinonimo di potenziometro;
b un potenziometro piccolo;
c un particolare trimmer;
d una resistenza variabile realizzata con un potenziometro.

Problemi svolti

AULADIGITALE

Problemi integrativi

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

Par. 2 ① Se un resistore da 12 kΩ è attraversato da una corrente di 0,5 mA, che potenza dissipa?

○○●

Soluzione

Applicando la 4 risulta subito

$$P = RI^2 = 12 \cdot 10^3 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 3 \text{ mW}$$

Par. 2 ② Se a un resistore da 33 kΩ è applicata una tensione di 12 V, che potenza dissipa?

○○●

Soluzione

Applicando la 3 risulta subito

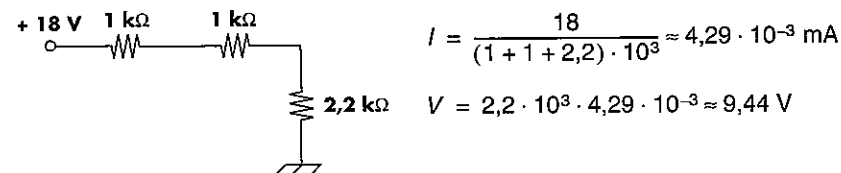
$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{12^2}{33 \cdot 10^3} = 4,36 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 4,36 \text{ mW}$$

Par. 4 ③ Calcolare la corrente che scorre nel circuito e la caduta di tensione ai capi del resistore da 2,2 kΩ.

○○●

Soluzione

Figura P1

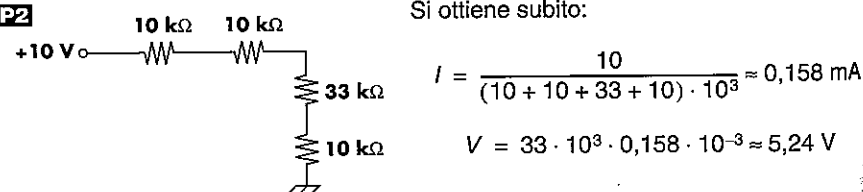


Par. 4 ④ Calcolare la corrente nel circuito e la tensione ai capi del resistore da 33 kΩ.

○○●

Soluzione

Figura P2

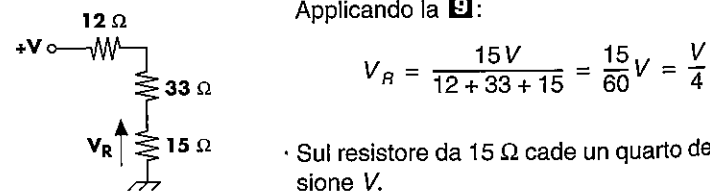


Par. 4 ⑤ Calcolare quale frazione della tensione V cade sul resistore da 15 Ω.

○○●

Soluzione

Figura P3



Par. 7 ⑥ Sapendo che V = 10 V, R₁ = 15 kΩ, R₂ = 10 kΩ, R₃ = 22 kΩ, calcolare:

○○●

- a) la resistenza equivalente parallelo;
- b) le correnti nelle singole resistenze e la corrente totale.

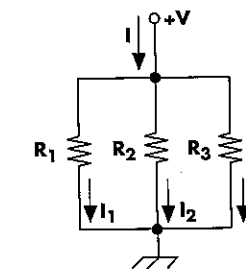
Soluzione

Applicando la 13 si ottiene R_p = 4,71 kΩ.

Le correnti nelle singole resistenze risultano:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = 666 \mu\text{A} \quad I_2 = \frac{V}{R_2} = 1 \text{ mA} \quad I_3 = \frac{V}{R_3} = 454 \mu\text{A}$$

Figura P4



La corrente totale si ottiene sommando le tre correnti o dividendo la tensione applicata V per la resistenza equivalente R_p:

$$I = \frac{V}{R_p} = 2,12 \text{ mA}$$

Par. 7

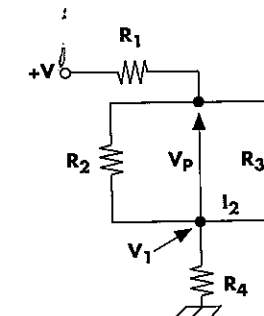
○○●

⑦ Posto: V = 15 V, R₁ = 33 kΩ, R₂ = R₃ = 100 kΩ, R₄ = 47 kΩ calcolare:

- a) la tensione V₁;
- b) la tensione V_p ai capi del parallelo.

Soluzione

Figura P5



Il parallelo di R₂ e R₃ risulta 50 kΩ. Poiché il parallelo di R₂ e R₃ risulta in serie con R₄ e R₁, la tensione applicata al parallelo risulta:

$$V_p = \frac{R_p}{R_1 + R_p + R_4} \cdot V = 5,77 \text{ V}$$

Analogamente la tensione V₁ è pari alla tensione su R₄ e risulta:

$$V_1 = \frac{R_4}{R_1 + R_p + R_4} \cdot V = 5,42 \text{ V}$$

Problemi da svolgere

AULADIGITALE

Problemi integrativi

Par. 2

○○●

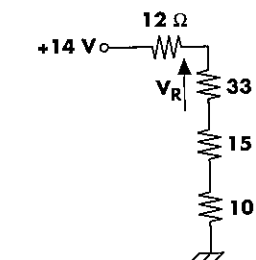
⑧ Un resistore da 10 kΩ è attraversato da una corrente di 5 mA. Calcolare la potenza che viene dissipata.

Par. 4

○○●

⑨ Calcolare la corrente che scorre nel circuito e la caduta di tensione ai capi del resistore da 33 Ω.

Figura P6

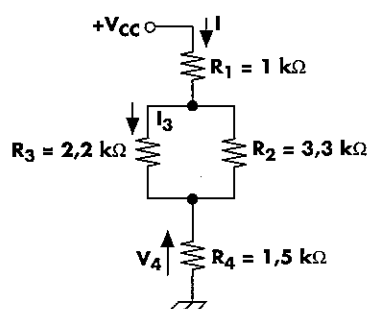


- Par. 4 ●●● **10** In un partitore di tensione formato da tre resistenze in serie, ai capi della prima cade una tensione doppia di quella che cade sulle altre due. Se la prima tensione è di 2 V e la corrente nel circuito è di 10 mA, quanto valgono le tre resistenze?
- a Rispettivamente: 100 Ω, 200 Ω e 200 Ω.
 b Rispettivamente: 200 Ω, 200 Ω e 100 Ω.
 c Rispettivamente: 2 kΩ, 1 kΩ e 1 kΩ.
 d Rispettivamente: 200 Ω, 100 Ω e 100 Ω.

- Par. 7 ○●● **11** Se nel circuito di **figura 16** si pone, a parità di valori resistivi, $I_3 = 50 \mu\text{A}$, quanto valgono V_1 , I_1 e I_2 ?
- a Rispettivamente: 7,5 V, 75 μA e 27,8 μA.
 b Rispettivamente: 7,5 V, 27,8 mA e 75 mA.
 c Rispettivamente: 15 V, 75 μA e 27,8 μA.
 d Rispettivamente: 7,5 V, 75 mA e 27,8 mA.

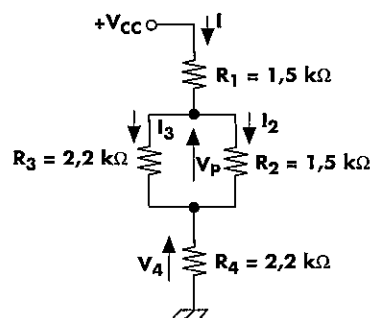
- Par. 7 ○●● **12** Posto $I_3 = 1 \text{ mA}$, calcolare I e V_4 .

Figura P7



- Par. 7 ○●● **13** Posto $V_p = 2 \text{ V}$, calcolare I e V_{CC} .

Figura P8



Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).

sezione **2C** **Reti elettriche**

tensione Thevenin
Kirchhoff effetti
sovrapposizione
forza elettromotrice
generatore

PAROLE CHIAVE ▶

1. Il generatore di tensione

Dovrebbe essere già noto nella sua formulazione più elementare il concetto di generatore elettrico: vediamo ora di chiarirlo meglio.

La **figura 1a** rappresenta simbolicamente un generatore variabile nel tempo, la $v_{ab} = e$ viene chiamata **forza elettromotrice** del generatore (f.e.m.).

Nel caso particolare di generatore in DC la tensione $V_{AB} = E$ è costante qualunque valore assuma R_L e quindi I .

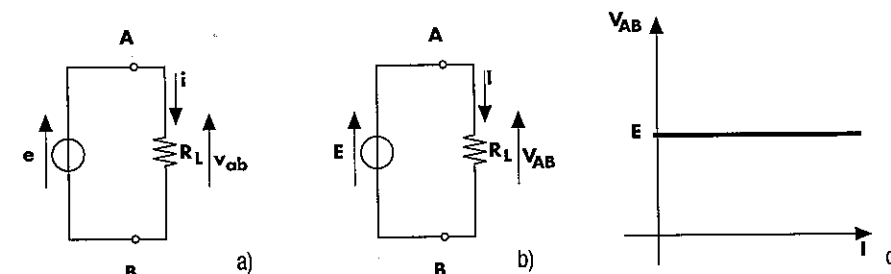


Figura 1

Generatore ideale di tensione variabile nel tempo (a); generatore ideale di tensione in DC o in AC (b) e suo grafico caratteristico (c).

■ Si definisce **generatore ideale di tensione** un generatore elettrico capace di presentare ai suoi terminali una tensione la cui ampiezza istantanea non dipende dal carico dell'utilizzatore.

Il **generatore reale** di tensione (**figura 2a**, vedi pagina seguente) presenta delle differenze rispetto al caso ideale: in particolare il valore istantaneo di v_{ab} dipende anche da R_L . Più precisamente, detta e la f.e.m. del generatore, pari al valore a vuoto di v_{ab} , e detta R_i la sua **resistenza interna**, risulta:

$$v_{ab} = e - R_i \cdot i$$

■

con:

La forza elettromotrice esprime la tensione a vuoto ai capi del generatore; è il valore di tensione massimo possibile e coincide con quella del generatore ideale.

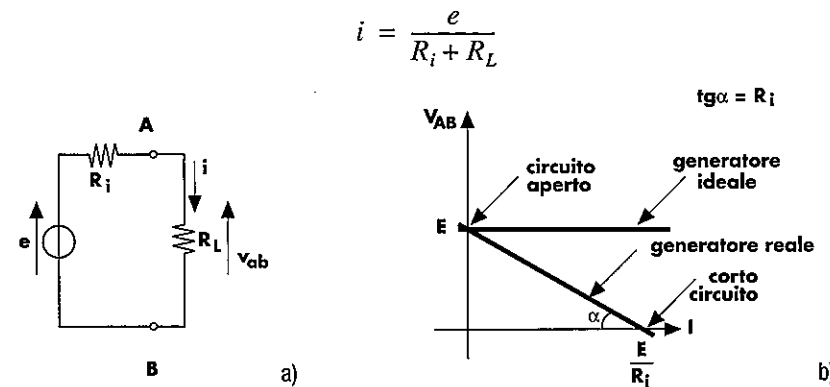


Figura 2 Generico generatore reale di tensione (a); confronto tra il caso ideale e quello reale in DC o in AC (b).

Se si considera, per semplicità di ragionamento, il caso particolare di un generatore reale di tensione in DC, si vede che al crescere della corrente erogata (ovvero al diminuire di R_L) la V_{AB} decresce linearmente (fig. 2b). In particolare si vede che la massima tensione in uscita è presente a vuoto (f.e.m.) e la massima corrente erogata si ha in cortocircuito. Il comportamento appena descritto corrisponde alla relazione:

$$V_{AB} = E - R_i \cdot I$$

La 3 è ovviamente un caso particolare della 1. Da ultimo si osservi che un generatore reale di tensione ben approssima quello ideale se

$$R_i \ll R_L$$

In questo caso risulta infatti trascurabile la c.d.t. su R_i .

2. I principi di Kirchhoff

Lezione multimediale **2C.1**

I principi di Kirchhoff sono concettualmente fondamentali, per lo studio delle reti elettriche, e permettono di generalizzare i concetti fin qui esposti (per le definizioni di nodo e ramo rivedere il paragrafo 1 della sezione 2B).

Primo principio ■ Il primo principio dice che in un nodo la somma algebrica delle correnti è uguale a zero:

$$\sum I = 0$$

Per convenzione si possono considerare, ad esempio, positive le correnti entranti e negative quelle uscenti dal nodo.

Secondo principio ■ Il secondo principio dice che la somma algebrica delle tensioni di una maglia è uguale a zero:

$$\sum V = 0$$

Per convenzione si possono, ad esempio, considerare positive le tensioni che hanno verso concorde con quello scelto per la percorrenza della maglia, e negative quelle discordi.

2 I principi di Kirchhoff furono formulati, il primo nel 1845 e il secondo nel 1847, dal fisico e matematico tedesco Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887). I suoi studi si svilupparono, oltre che in ambito elettrico, anche nella spettroscopia e nella termodinamica. Quelli spettroscopici, effettuati in collaborazione con Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899), famoso per il becco di Bunsen, molto usato in chimica, portarono alla determinazione della composizione chimica del Sole.

3 I principi di Kirchhoff permettono di ridurre la risoluzione del circuito alla risoluzione di un sistema di equazioni. Tale metodo è molto utile nel calcolo computerizzato.

Per meglio chiarire il secondo principio si considera il circuito riportato in figura 3.

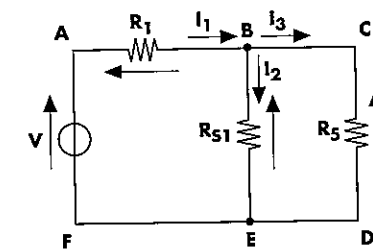


Figura 3 Applicazione dei principi di Kirchhoff.

Applichiamo il secondo principio alle tre maglie del circuito (il verso di percorrenza delle maglie è indicato dall'ordine di successione delle lettere):

$$\begin{aligned} V - R_1 I_1 - R_{51} I_2 &= 0 && \text{maglia ABEFA} \\ V - R_1 I_1 - R_5 I_3 &= 0 && \text{maglia ABCDEFA} \\ R_{51} I_2 - R_5 I_3 &= 0 && \text{maglia BCDEB} \end{aligned}$$

Volendo è possibile verificare la correttezza di queste relazioni assegnando dei valori ai componenti e risolvendo il circuito con le modalità viste nella sezione 2B.

In un circuito, in base ai principi di Kirchhoff, è quindi possibile scrivere una equazione per ogni nodo e una per ogni maglia del circuito. Queste equazioni non risultano però tutte tra loro indipendenti; in particolare, detto n il numero di nodi (si considerano solo i nodi relativi a connessioni almeno triple), le equazioni ai nodi indipendenti sono $n - 1$; detto r il numero dei rami, le equazioni alle maglie indipendenti sono $r - n + 1$.

Globalmente il numero di equazioni indipendenti risulta pari al numero dei rami, infatti $(n - 1) + (r - n + 1) = r$.

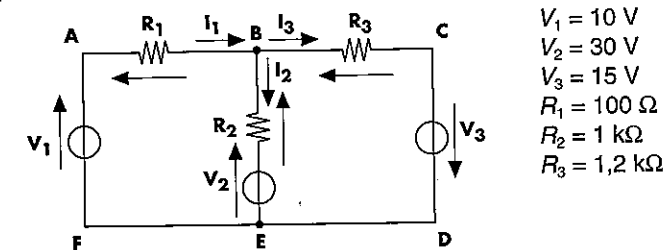
In conclusione è possibile risolvere con Kirchhoff un circuito attraverso la soluzione di un sistema di equazioni, purché le incognite non siano in numero superiore a r ; in quest'ultimo caso il sistema, e quindi il circuito, presenterebbe infinite soluzioni.

I principi di Kirchhoff risultano particolarmente comodi se usati risolvendo il sistema tramite un computer, in quanto in questo modo è possibile risalire alla risoluzione di un circuito, comunque complesso, semplicemente scrivendo le equazioni del sistema risolutivo.

Esempio 1

Calcolare le tre correnti I_1 , I_2 e I_3 .

Figura 4



- $V_1 = 10 \text{ V}$
- $V_2 = 30 \text{ V}$
- $V_3 = 15 \text{ V}$
- $R_1 = 100 \Omega$
- $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 1,2 \text{ k}\Omega$

Si noti innanzitutto che i rami sono tre, esattamente come le incognite, e che quindi il circuito è risolvibile. Si tenga anche presente che le polarità dei generatori vanno intese come reali, poiché si suppongono note a priori, mentre i versi di percorrenza delle correnti sono da considerarsi puramente convenzionali (quelli reali saranno desumibili dai risultati).

Le equazioni ai nodi risultano:

$$\begin{aligned} \text{nodo B} & \quad I_1 - I_2 - I_3 = 0; \\ \text{nodo E} & \quad I_2 + I_3 - I_1 = 0. \end{aligned}$$

Essendo $n = 2$ si ha una sola equazione ai nodi indipendente. Le equazioni alle maglie risultano:

maglia ABEFA	$V_1 - V_2 - R_1 I_1 - R_2 I_2 = 0;$
maglia BCDEB	$V_2 + V_3 + R_2 I_2 - R_3 I_3 = 0;$
maglia ABCDEFA	$V_1 + V_3 - R_1 I_1 - R_3 I_3 = 0.$

Poiché $r = 3$ si ha $r - n + 1 = 2$ e quindi solo due di queste equazioni sono indipendenti. Un possibile sistema risolutivo è il seguente:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ V_1 - V_2 - R_1 I_1 - R_2 I_2 = 0 \\ V_2 + V_3 - R_3 I_3 + R_2 I_2 = 0 \end{cases}$$

Risolviendo il sistema si trova: $I_1 \approx 0,7$ mA; $I_2 = -20,07$ mA; $I_3 = 20,77$ mA. Poiché I_2 è negativa, il verso inizialmente fissato era errato.

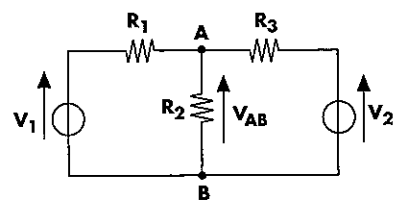
3. Il principio di sovrapposizione degli effetti

Il principio di sovrapposizione degli effetti, valido solo per i circuiti lineari, afferma che *in presenza di più generatori è possibile studiare separatamente l'effetto di ognuno di questi; il risultato complessivo è dato dalla somma algebrica degli effetti dei singoli generatori.* I generatori non considerati vanno annullati, considerandone solo le rispettive resistenze interne.

Esempio 2

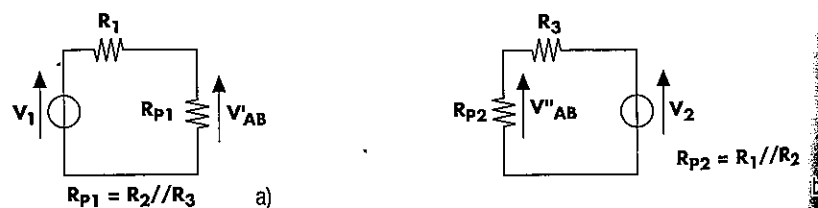
Posto $V_1 = V_2 = 4$ V, $R_1 = 1$ k Ω , $R_2 = R_3 = 2$ k Ω , valutare il valore della tensione V_{AB} .

Figura 5



In figura 6a è riportato il circuito che si ottiene considerando solo il generatore 1. In particolare risulta $R_{P1} = R_1$ e quindi l'effetto di questo generatore sulla V_{AB} è pari a $V'_{AB} = 1/2 V_1 = 2$ V.

Figura 6



Se si considera solo il generatore 2 il circuito è quello di figura 6b e si ottiene:

$$R_{P2} \approx 0,66 \text{ k}\Omega \quad V''_{AB} = \frac{V_2}{R_3 + R_{P2}} = R_{P2} \approx 1 \text{ V}$$

Sommando infine gli effetti si trova:

$$V_{AB} = V'_{AB} + V''_{AB} = 3 \text{ V}$$

Utile per valutare gli effetti sul circuito dei singoli generatori.

AULADIGITALE

Scheda integrativa 2C.1
Il generatore di corrente e il principio di Norton

Questo principio deve il suo nome all'ingegnere francese, specializzato in telegrafia, Léon Charles Thévenin (1857-1926) che lo formulò nel 1883; anche se la sua prima formulazione risale al 1853 e si deve al fisico e fisiologo tedesco Hermann von Helmholtz (1821-1894).

Il principio di sovrapposizione degli effetti è un metodo concettualmente semplice, che permette di ridurre lo studio di un circuito complesso, con molti generatori, a tanti circuiti più semplici, uno per ogni generatore.

La sua utilità non si riduce solo a questo: è utile rimarcare anche il fatto che *con questo metodo è possibile valutare l'effetto del singolo generatore sul risultato finale.*

4. Il principio di Thevenin

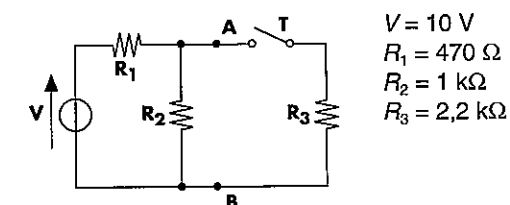
Il principio di **Thevenin** afferma che una rete elettrica, comunque complessa purché lineare, vista da due terminali, è equivalente a un generatore reale di tensione. La f.e.m. del generatore equivalente corrisponde alla tensione a vuoto ai due terminali e la resistenza interna è quella vista dai terminali stessi, dopo avere sostituito i generatori presenti con le corrispondenti resistenze interne.

Questo principio è molto utile per lo studio delle reti elettriche.

Esempio 3

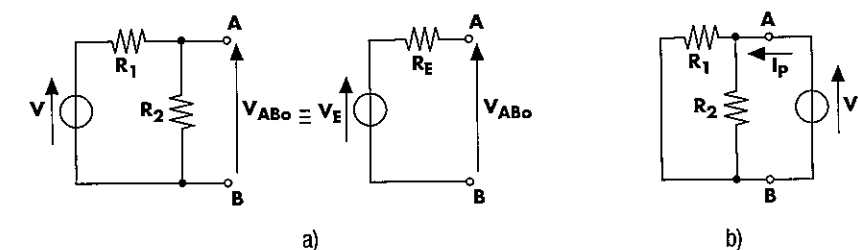
Calcolare, applicando Thevenin, la c.d.t. su R_3 quando si chiude T .

Figura 7



Applicando Thevenin è possibile sostituire il bipolo contenuto nell'area evidenziata con un generatore di tensione equivalente (fig. 8a).

Figura 8



In particolare risulta che la V_E è uguale alla V_{AB} a vuoto (cioè alla V_{AB0}) e quindi:

$$V_E = \frac{V}{R_1 + R_2} R_2$$

Per calcolare la R_E basta valutare la resistenza vista dai morsetti del bipolo, dopo avere annullato gli effetti dei generatori interni. Per fare questo si può immaginare di porre ai morsetti A e B del bipolo un ipotetico generatore di prova V_P (fig. 8b):

$$R_E = \frac{V_P}{I_P}$$

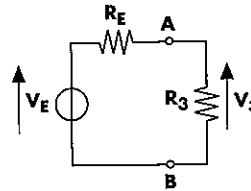
In pratica si vede subito che nel nostro caso risulta $R_E = R_1 // R_2$. Numericamente risulta $V_E \approx 6,8$ V e $R_E \approx 320 \Omega$.

È ora possibile, supposto T chiuso, collegare il bipolo equivalente alla R_3 (fig. 9). Risultato:

$$V_3 = \frac{V_E}{R_E + R_3} R_3 =$$

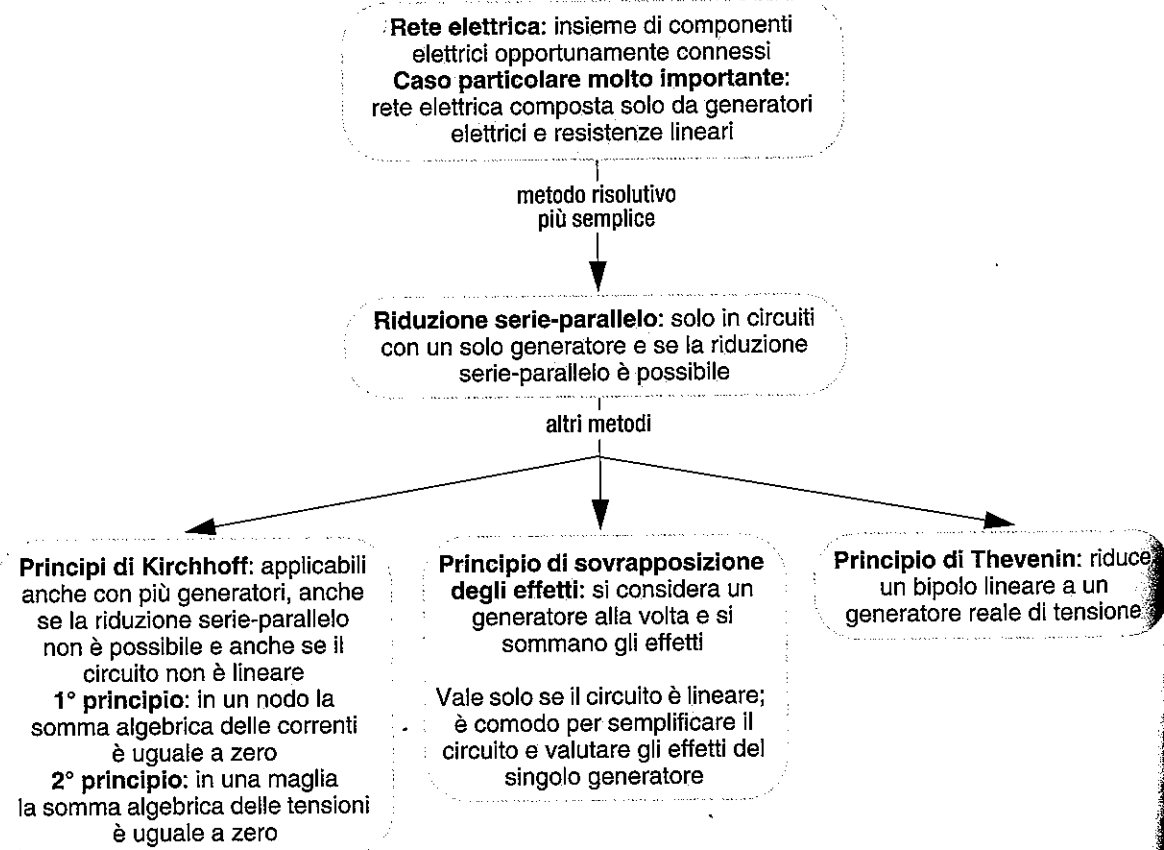
$$= \frac{6,8}{320 + 2200} \cdot 2200 \approx 5,94 \text{ V}$$

Figura 9



Facciamo il punto

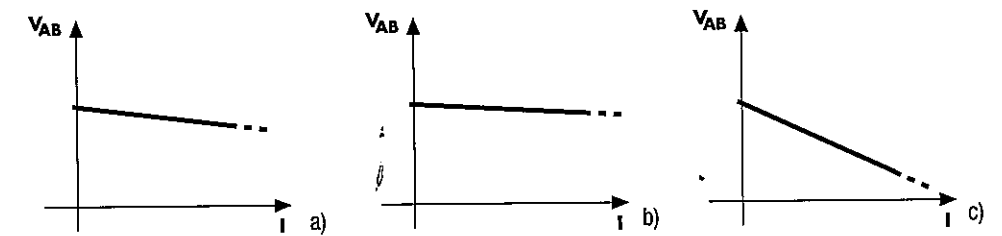
La risoluzione delle reti elettriche



Test

- Par. 1 1 Un generatore ideale di continua fornisce sempre lo stesso valore di tensione qualunque sia il valore della erogata.
- Par. 1 2 Un generatore reale di tensione presenta una f.e.m. di 10 V e una resistenza interna di 2Ω ; quanto vale la corrente di cortocircuito?
 a 0,2 A
 b 5 A
 c 8 A
 d 5 V
- Par. 1 3 Quale dei seguenti grafici si riferisce al generatore reale di tensione con resistenza interna più piccola?

Figura P1



- Par. 2 4 Enunciare il primo principio di Kirchhoff.
- Par. 2 5 Enunciare il secondo principio di Kirchhoff.
- Par. 2 6 Quante sono le equazioni ai nodi indipendenti e quante quelle alle maglie?
- Par. 3 7 Enunciare il principio di sovrapposizione degli effetti.
- Par. 3 8 Se si annulla un generatore ideale di tensione si ottiene un
- Par. 4 9 Il principio di Thevenin afferma che:
 a un circuito elettrico comunque complesso è sempre interpretabile come un generatore reale di tensione;
 b un circuito elettrico comunque complesso, purché lineare e visto da due terminali, è sempre interpretabile come un generatore ideale di tensione;
 c un circuito elettrico comunque complesso, purché lineare e visto da due terminali, è sempre interpretabile come un generatore reale di tensione;
 d un circuito elettrico comunque complesso, purché lineare e visto da due terminali, è sempre interpretabile come un generatore reale di corrente.

Problemi svolti

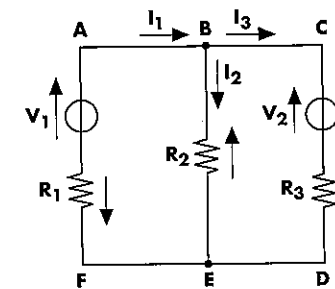
AULADIGITALE

Problemi integrativi

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

- 1 Calcolare, con Kirchhoff, le tre correnti I_1, I_2 e I_3 .

Figura P2



- $V_1 = 50 \text{ V}$
- $V_2 = 10 \text{ V}$
- $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 6,2 \text{ k}\Omega$

Soluzione

Un possibile sistema risolutivo è il seguente:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 & \text{nodo B} \\ V_1 - R_2 I_2 - R_1 I_1 = 0 & \text{maglia ABEFA} \\ R_2 I_2 - R_3 I_3 - V_2 = 0 & \text{maglia BCDEB} \end{cases}$$

Si cerchino anche altri due sistemi risolutivi.

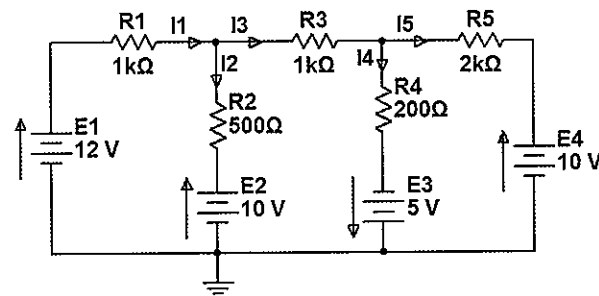
(Risposta: $I_1 = 8,74 \text{ mA}$; $I_2 = 8,92 \text{ mA}$; $I_3 = -0,175 \text{ mA}$)

Par. 2

2

Risolvere il circuito di figura P3 usando Kirchhoff.

●●● **Figura P3**



Soluzione

Un possibile sistema risolutivo è il seguente:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_3 - I_4 - I_5 = 0 \\ E_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 - E_2 = 0 \\ E_2 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 + E_3 = 0 \\ -E_3 + R_4 I_4 - R_5 I_5 - E_4 = 0 \end{cases}$$

Per la sua risoluzione, non certo agevole, possiamo ricorrere al programma **Sistemi3.exe** disponibile tra i file di supporto, che permette la risoluzione di sistemi lineari fino a 10° ordine e che richiede il sistema scritto nella forma:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

Il nostro sistema va quindi scritto in questa forma e poi vanno inseriti i valori numerici:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 + 0 + 0 = 0 \\ 0 + 0 + I_3 - I_4 - I_5 = 0 \\ -R_1 I_1 - R_2 I_2 + 0 + 0 + 0 = -E_1 + E_2 \\ 0 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 + 0 = -E_2 - E_3 \\ 0 + 0 + 0 + R_4 I_4 - R_5 I_5 = E_3 + E_4 \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 + 0 + 0 = 0 \\ 0 + 0 + I_3 - I_4 - I_5 = 0 \\ -1000 I_1 - 500 I_2 + 0 + 0 + 0 = -12 \\ 0 + 500 I_2 - 1000 I_3 - 200 I_4 + 0 = -15 \\ 0 + 0 + 0 + 200 I_4 - 2000 I_5 = 15 \end{cases}$$

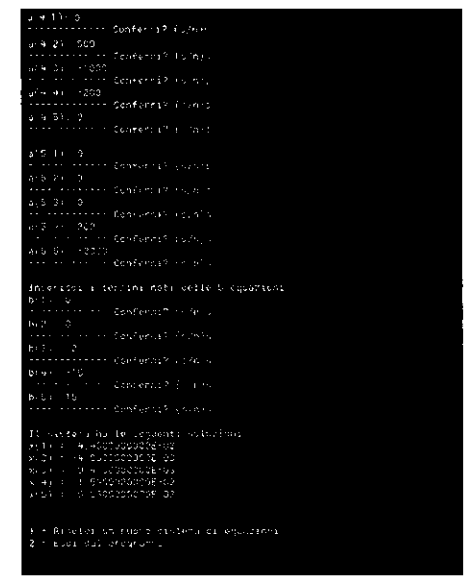
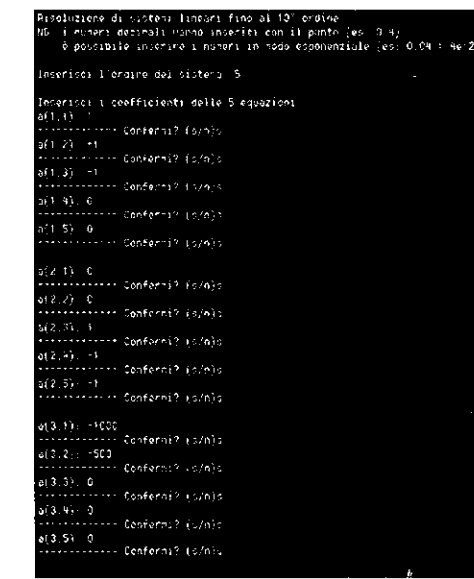
A questo punto basterà avviare il programma, inserire i dati e ottenere i risultati di figura. In particolare le correnti risultano:

$$I_1 = 4,48 \text{ mA}; \quad I_2 = -4,96 \text{ mA}; \quad I_3 = 9,44 \text{ mA}; \quad I_4 = 15,4 \text{ mA}; \quad I_5 = -5,96 \text{ mA}$$

Attenzione l'interfaccia utente del programma è molto semplice: se si commettono errori di scrittura non è possibile correggere e si deve necessariamente uscire dal programma e ripetere la procedura. Per evitare questo inconveniente il programma chiede ogni

confirma del dato inserito.

Figura P4

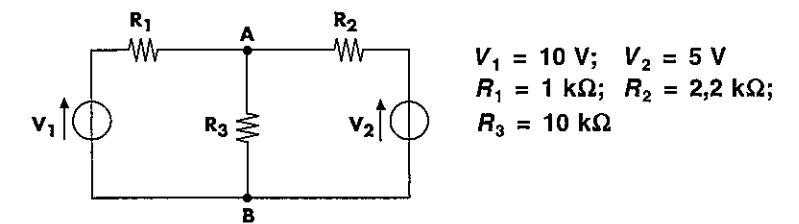


Par. 3

3

Calcolare, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, la tensione V_{AB} .

●●● **Figura P5**



$$\begin{aligned} V_1 &= 10 \text{ V}; & V_2 &= 5 \text{ V} \\ R_1 &= 1 \text{ k}\Omega; & R_2 &= 2,2 \text{ k}\Omega; \\ R_3 &= 10 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Soluzione

Considerando V_1 si ha:

$$V'_{AB} = \frac{V_1}{R_1 + (R_2 // R_3)} (R_2 // R_3) \approx 6,43 \text{ V}$$

Considerando solo V_2 :

$$V''_{AB} = \frac{V_2}{R_2 + (R_1 // R_3)} (R_1 // R_3) \approx 1,46 \text{ V}$$

Pertanto la tensione richiesta risulta: $V_{AB} = V'_{AB} + V''_{AB} = 7,89 \text{ V}$.

Par. 4

4

Risolvere il problema 3 usando Thevenin.

Soluzione

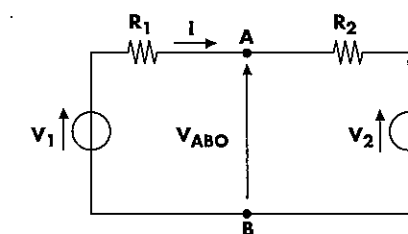
Si può staccare il resistore R_3 e ricavare il generatore equivalente visto dai morsetti A e B. In particolare nel circuito risultante di figura P6 la tensione a vuoto V_{ABO} rappresenta la f.e.m. del generatore equivalente V_E :

$$V_E = V_{ABO} = V_1 - R_1 I = V_2 + R_2 I \approx 8,44 \text{ V}$$

con:

$$I = (V_1 - V_2) / (R_1 + R_2) \approx 1,56 \text{ mA}$$

Figura P6



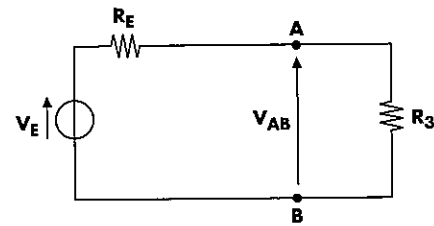
La resistenza equivalente vista dai morsetti A e B dopo avere annullato i generatori risulta:

$$R_E = R_1 // R_2 \approx 687 \Omega$$

Se ora si sostituisce il circuito di **figura P6** con il suo generatore equivalente e si ripristina la resistenza R_3 (fig. P7) si trova subito la tensione cercata:

$$V_{AB} = \frac{V_E}{R_E + R_3} R_3 \approx 7,89 \text{ V}$$

Figura P7



Problemi da svolgere

AULADIGITALE

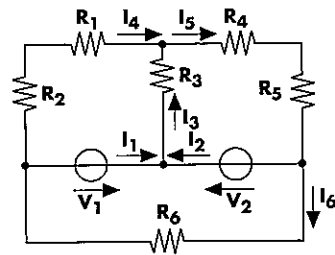
Problemi integrativi

Par. 2

5

Scrivere un sistema di Kirchhoff che permetta il calcolo delle correnti, supposti noti tutti i valori dei componenti.

Figura P8

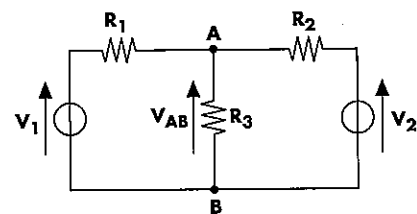


Parr. 3 e 4

6

Calcolare V_{AB} usando la sovrapposizione degli effetti e/o Thevenin.

Figura P9



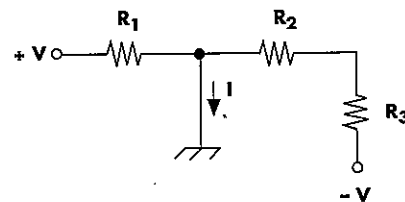
- $V_1 = 12 \text{ V}$
- $V_2 = 24 \text{ V}$
- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$

Par. 4

7

$V = 12 \text{ V}; R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$

Figura P10



Calcolare la corrente I .

Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).

obiettivo di competenza finale

acquisire una visione d'insieme dei segnali e degli strumenti di misura

Sezione 3A
Segnali

obiettivo di competenza intermedio

comprendere il concetto di segnale e conoscere i principali parametri dei segnali strumentali

Sezione 3B
Strumenti di misura

obiettivo di competenza intermedio

conoscere le funzionalità principali degli strumenti di base di un laboratorio

AULADIGITALE

- 3A Schede integrative
- 3A1 Il valore medio
- 3A2 Il valore efficace
- Problemi integrativi
- Soluzioni
- Lezioni multimediali
- 3B1 Utilità degli strumenti
- Soluzioni

Nel libro

- 3A Teoria, test e problemi
- 3B Teoria, test e problemi

sezione **3A** Segnali

segnale
 efficace
 alternato
 medio
 triangolare
 duty
 quadra
 periodico
 bidirezionale
 valore
 onda
 ciclo

PAROLE CHIAVE ►

1. Premessa

Il concetto di segnale, che verrà chiarito nel prossimo paragrafo ma che in forma intuitiva si può già ritenere noto, ha notevole importanza nell'ambito delle telecomunicazioni. Nelle moderne telecomunicazioni di tipo elettrico si possono considerare due categorie fondamentali di segnali:

- quelli di **tipo strumentale**, finalizzati a misure e in genere a prove di verifica dei sistemi di telecomunicazioni;
- quelli di **effettiva trasmissione e ricezione dell'informazione**, che sono quelli normalmente usati dagli utenti.

In questa sezione considereremo soprattutto quelli del primo tipo.

2. Segnali

Segnale e informazione

■ In linea generale si considera **segnale** una grandezza fisica la cui variazione nel tempo trasmette una informazione.

Nelle moderne telecomunicazioni assumono particolare importanza i segnali di tipo elettrico; tra questi sono molto usati nelle applicazioni strumentali quelli **periodici**.

■ Si definisce **periodico** un segnale che, dopo un certo intervallo di tempo, torna a ripetersi ancora uguale (**fig. 1**).

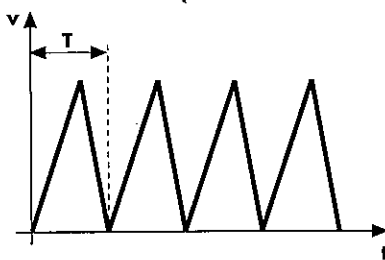


Figura 1
Segnale periodico.

Questo intervallo di tempo è detto **periodo (T)** e si misura normalmente in secondi. Il numero di periodi che si ripetono nell'unità di tempo è detto **frequenza (f)**.

misura in hertz (Hz):

$$f = \frac{1}{T}$$

1

Matematicamente un segnale periodico è una funzione del tempo del tipo:

$$v(t) = v(t + nT) \quad \text{con } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

2

Questa relazione afferma sinteticamente che il segnale $v(t)$ (o anche semplicemente v , sottintendendo t) all'istante t presenta un valore uguale a quello che assume agli istanti $t + nT$, ovvero agli istanti che distano dall'istante t un multiplo intero nT del periodo T . Notare che l'informazione trasportata da un segnale periodico è contenuta nella variazione imprevista di qualche parametro, e non nella sua espressione matematica che di solito è già nota. La maggioranza dei segnali periodici sono prodotti dagli strumenti di laboratorio.

Esempio 1

I segnali periodici sono prodotti da appositi strumenti elettronici (un caso classico è quello del generatore di funzioni che vedremo nella sezione 3B). Se si applica un segnale periodico in ingresso a un sistema elettronico (ad esempio un amplificatore), si possono valutare le prestazioni del sistema in questione dalle variazioni che il segnale presenta alla sua uscita (se si tratta di un amplificatore il rapporto tra l'ampiezza, non nota, del segnale periodico in uscita e l'ampiezza, nota, del segnale periodico in ingresso esprime la sua amplificazione).

Il segnale trasmesso dalle emittenti radiofoniche in **modulazione di frequenza (FM)** consiste in un segnale sinusoidale in alta frequenza (da 88 a 108 MHz) modulato in frequenza dal **segnale audio** (acustico: musica, parlato). Questa modulazione consiste nel fare variare la frequenza della sinusoidale in alta frequenza (detta portante del segnale audio) in modo direttamente proporzionale all'ampiezza del segnale audio stesso (detto **segnale modulante**): in ricezione è possibile recuperare l'informazione del segnale audio, contenuta nella sua ampiezza, dalla variazione della frequenza della sinusoidale portante. L'informazione contenuta nella portante non è quindi nella sua legge di periodicità, che è nota, ma nella variazione della sua frequenza, variazione che non è nota a priori.

■ I segnali privi di periodicità vengono detti **aperiodici (fig. 2)**; questi ultimi, che possono però ancora considerarsi periodici di periodo T infinito, sono quelli normalmente presenti nei sistemi di telecomunicazioni.



Figura 2
Segnale aperiodico.

I segnali aperiodici sono i più diffusi in natura; ad esempio la voce umana o la musica sono aperiodici perché presentano un'ampiezza che varia nel tempo senza alcuna periodicità.

Si possono considerare segnali anche grandezze costanti (in elettronica definite grandezze continue):

- 1) perché a volte sono costanti solo sul breve periodo, e variano invece su tempi lunghi; si pensi al valore di temperatura rilevato da un sensore;
- 2) perché può essere che l'informazione sia contenuta nel valore della grandezza, come ad esempio quando si fanno misure in un circuito.

Uso delle lettere minuscole e maiuscole

Si osservi da ultimo che nelle **figure 1 e 2** si sono indicate le grandezze sull'asse y con una lettera minuscola. Come già noto, in questo modo si vuole simboleggiare il generico valore istantaneo di una grandezza variabile nel tempo (in pratica la scrittura v è equivalente alla scrittura $v(t)$); le grandezze costanti nel tempo, al contrario, vengono indicate con lettere maiuscole.

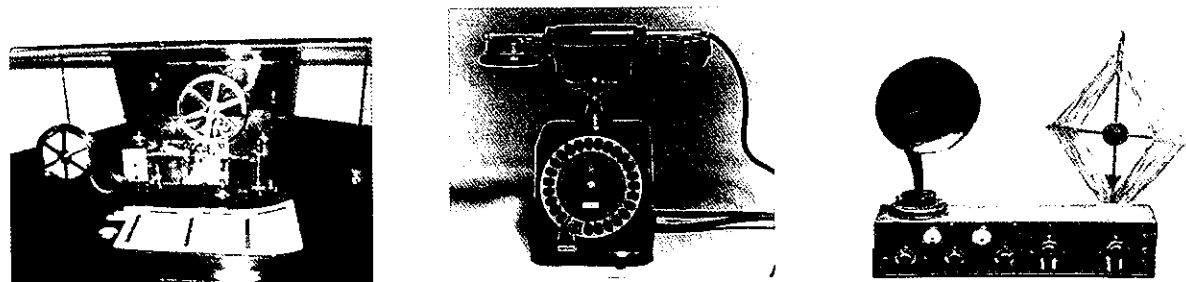
non solo teoria 1

Le origini delle telecomunicazioni elettriche

Partendo da sinistra. Il **telegrafo**, inventato dallo statunitense **Samuel Morse** (1791-1872) tra il 1832 e il 1836, trasmette segnali elettrici in un opportuno codice di punti e linee, detto appunto codice Morse.

Un telefono anni '20-'40; il **telefono**, inventato dal fiorentino **Antonio Meucci** (1808-1889) nel 1854, e sfruttato commercialmente dallo scozzese **Alexander Graham Bell** (1847-1922), trasmette segnali elettrici che trasportano la voce.

Una **radio** del 1924 della ditta Allocchio Bacchini con otto valvole (tubi a vuoto) e altoparlante a tromba; l'invenzione della radio si deve al bolognese **Guglielmo Marconi** (1874-1937), che nel 1895 realizzò il primo prototipo funzionante di telegrafo senza fili da cui nacque, successivamente, la radio.



3. Segnali unidirezionali e bidirezionali

Indipendentemente dalla periodicità o meno di un segnale, questo si definisce **unidirezionale** o **unipolare** se la grandezza fisica che rappresenta assume nel tempo solo valori negativi o positivi.

In alternativa si definisce **bidirezionale** o **bipolare** se la grandezza fisica assume nel tempo sia valori positivi che negativi. È in particolare interessante osservare che se a un segnale bidirezionale (fig. 3a) se ne somma uno continuo e quindi unidirezionale, di ampiezza opportuna (fig. 3b), si ottiene un segnale unidirezionale (fig. 3c). Si noti che la situazione indicata in **figura 3** è solo un caso particolare; infatti, in questa figura, il segnale continuo assume il valore minimo necessario a garantire l'unidirezionalità del segnale (con una componente continua maggiore il segnale unidirezionale assumerebbe un valore minimo maggiore di zero mentre con una componente minore il segnale rimarrebbe bidirezionale).

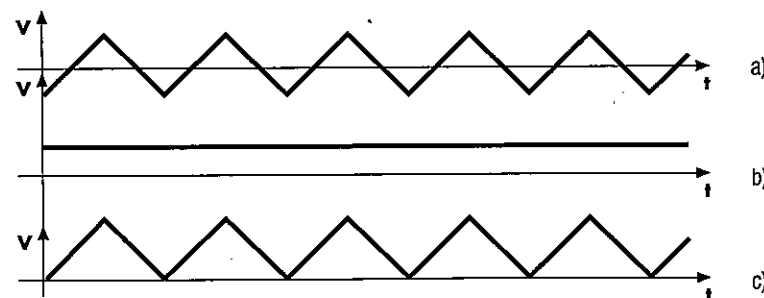
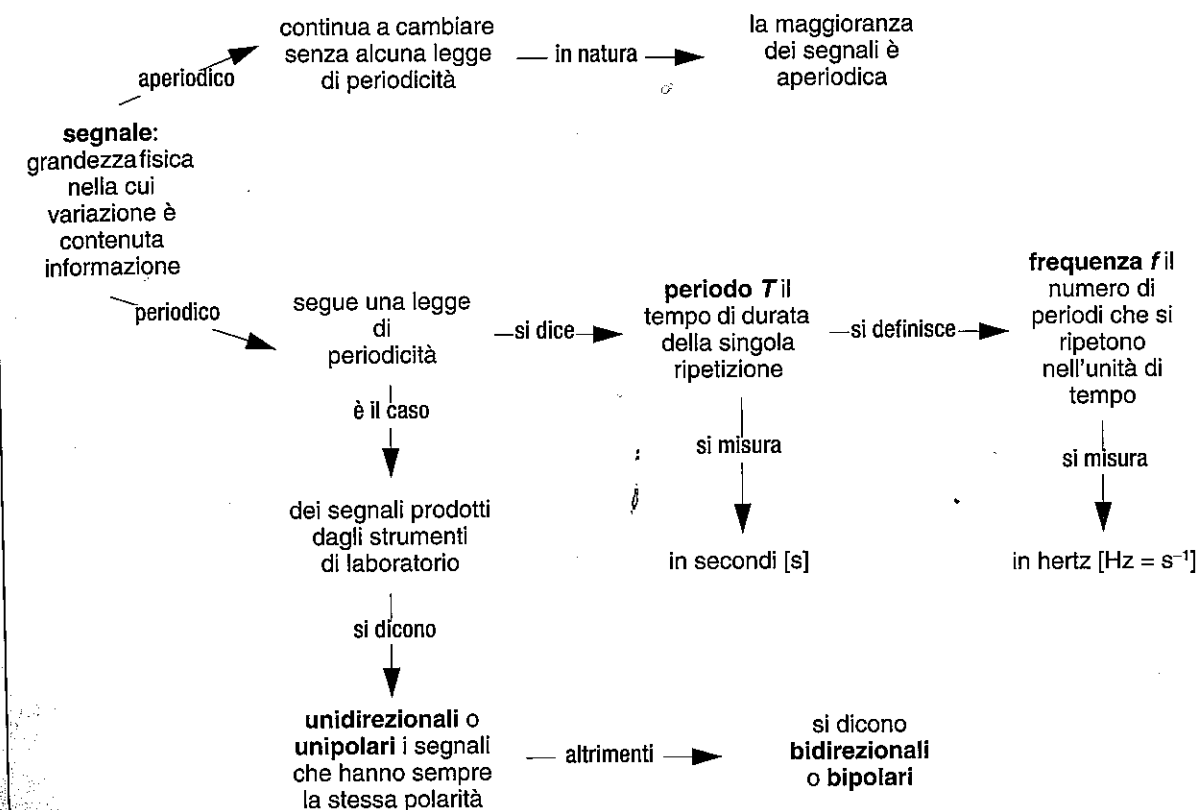


Figura 3
Un segnale unidirezionale ottenuto dalla somma di uno continuo con uno bidirezionale.

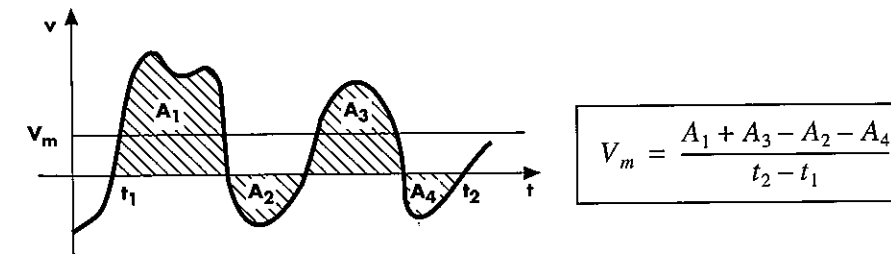
Facciamo il punto

I segnali



4. Il valore medio

Considerando una generica funzione del tempo $v(t)$ (fig. 4) si può affermare che il suo **valore medio** nell'intervallo considerato, si ottiene calcolando il rapporto tra l'area sottesa dalla curva nel suddetto intervallo e l'intervallo stesso; tale area è intesa come somma algebrica delle aree sottese dalla curva, superiormente e inferiormente all'asse t .



$$V_m = \frac{A_1 + A_3 - A_2 - A_4}{t_2 - t_1} \quad \text{3}$$

Figura 4
Valore medio con segnale bidirezionale.

La relazione **3** esprime il valore medio nell'intervallo considerato, supposte le aree in valore assoluto.

Il valore medio è importante per i segnali periodici, infatti l'eventuale componente continua di un segnale periodico coincide con il suo valore medio. Pertanto un segnale periodico a valore medio nullo è privo di componente continua.

5. Segnali alternati

■ Si definisce **alternato** un segnale periodico a valore medio nullo (privo di componente continua).

Un caso particolarmente importante è quello del segnale **sinusoidale** o **armonico** (fig. 5), espresso dalla relazione matematica:

$$v(t) = V_p \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad 4$$

dove V_p indica il **valore massimo** o **di picco** del segnale mentre ω è detta **pulsazione** e φ **fase** del segnale.

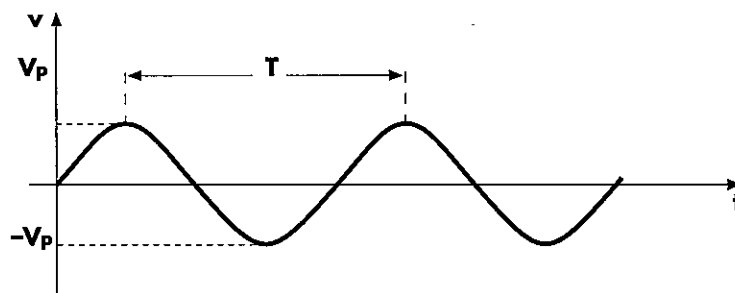


Figura 5
Segnale alternato sinusoidale.

Il prodotto ωt come pure φ sono degli angoli espressi in radianti. Nel caso particolare di figura 5 si ha $\varphi = 0$.

La frequenza, la pulsazione e il periodo non sono tra loro indipendenti:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{e} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad 5$$

6. Il valore efficace

Il valore efficace esprime l'equivalente continuo dal punto di vista energetico.

Un parametro molto importante, usato soprattutto con correnti e tensioni alternate, ma estendibile, per le stesse grandezze, al più generale caso periodico, è il valore efficace (**RMS: Root Mean Square**).

■ Si definisce **valore efficace** di una corrente periodica quel valore di corrente continua che provoca su una resistenza, in un tempo uguale a T , lo stesso effetto termico della corrente periodica.

AULADIGITALE
Scheda integrativa 3A.2
Il valore efficace

Poiché ai capi di una resistenza attraversata da corrente è presente una tensione direttamente proporzionale alla corrente, la definizione appena data per la corrente è facilmente estendibile anche alla tensione.

Esempio 2

Se si dice che una lampadina alimentata in alternata a $220 V_{\text{eff}}$ presenta una potenza di $60 W$ si vuole dire che la stessa lampadina alimentata con una tensione continua da $220 V$ produrrebbe una potenza da $60 W$, ovvero la stessa che in media produce alimentandola in alternata a $220 V_{\text{eff}}$.

7. Alcuni segnali tipici

Segnale armonico

Di seguito vengono riassunte le caratteristiche di alcuni segnali periodici particolarmente significativi.

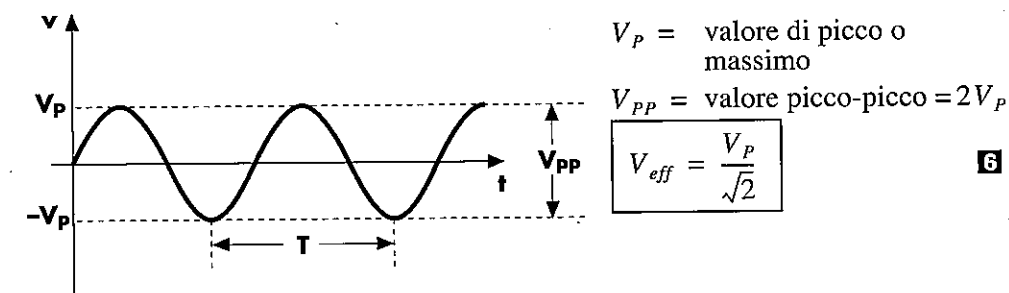


Figura 6
Segnale alternato sinusoidale.

In figura 6 è riportato un **segnale armonico**: trattandosi di un segnale alternato, il suo valore medio è nullo. Analiticamente il segnale armonico (o sinusoidale) è definito dalla relazione 4.

In figura 7 è riportato un segnale di tipo **armonico raddrizzato a semionda**; si tratta di un segnale unidirezionale e, come tale, a valore medio non nullo.

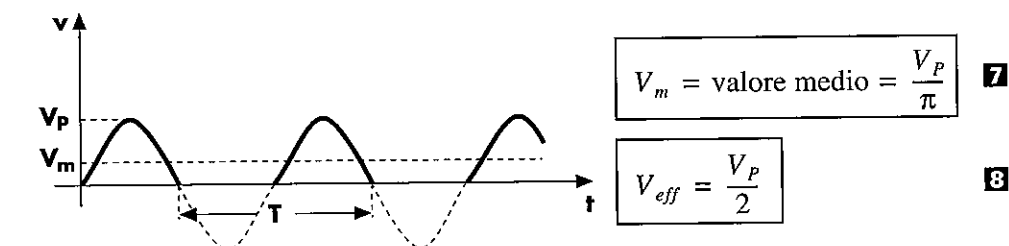


Figura 7
Segnale raddrizzato a doppia semionda.

In figura 8 è riportato il caso di un **segnale armonico raddrizzato a doppia semionda** o **a onda intera**; si noti che il periodo T indicato è quello del segnale sinusoidale da cui si suppone venga ricavato quello raddrizzato; il periodo di quest'ultimo è ovviamente la metà ovvero $T/2$.

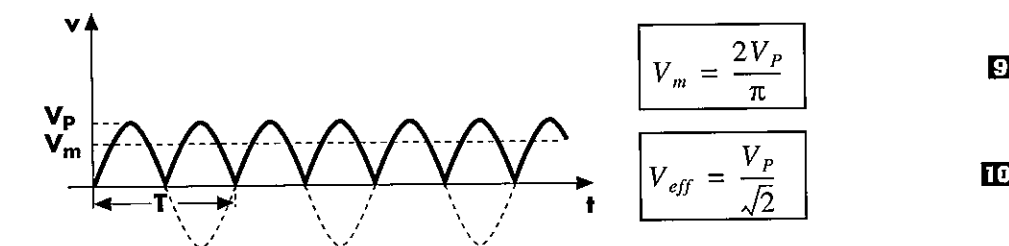


Figura 8
Segnale raddrizzato a doppia semionda.

In figura 9 è riportato un **segnale alternato triangolare**.

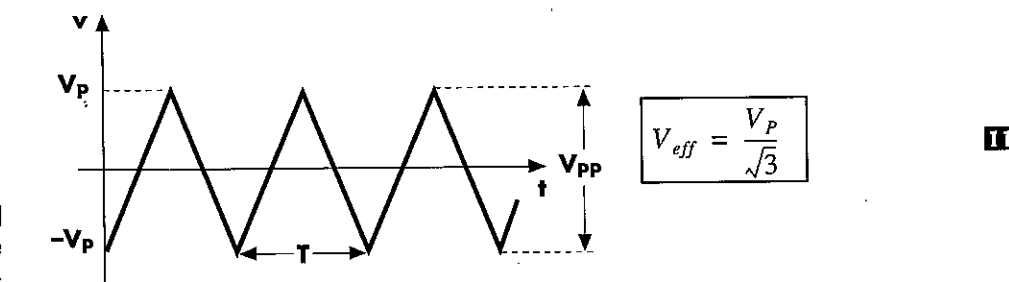


Figura 9
Segnale triangolare alternato.

La figura 10 riporta il caso di un segnale triangolare unidirezionale con valore minimo nullo.

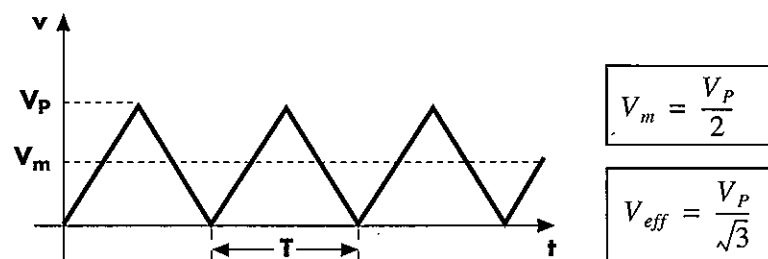


Figura 10
Segnale triangolare unidirezionale.

La figura 11 riporta un particolare segnale triangolare a dente di sega.

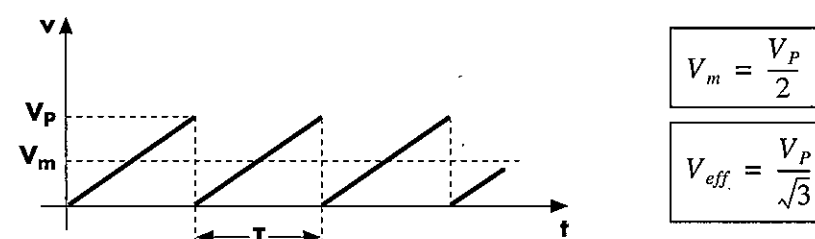


Figura 11
Segnale triangolare a dente di sega.

Si noti anche che, nei segnali delle figure 10 e 11, il valore di picco coincide con quello picco-picco.

La figura 12 riporta un segnale a due livelli a valore medio nullo; i due livelli hanno la stessa durata: si parla in questo caso di segnale a onda quadra.

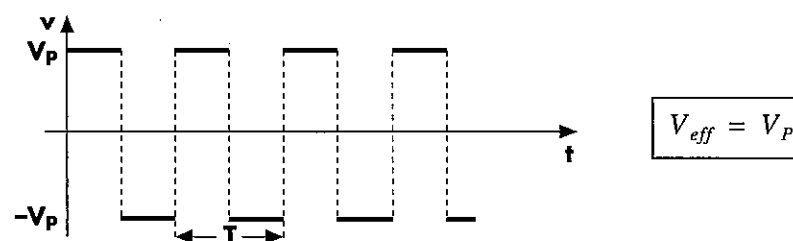


Figura 12
Segnale alternato a onda quadra.

In figura 13 si considera un segnale a due livelli di pari durata, ma con valore medio diverso da zero (e con valore minimo pari a zero); si parla ancora di segnale a onda quadra a causa appunto della pari durata dei due livelli.

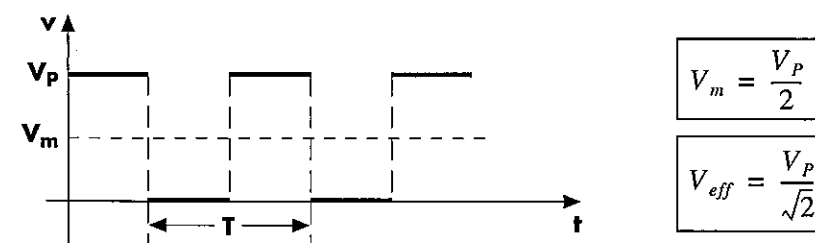


Figura 13
Segnale unidirezionale a onda quadra.

Si noti come in figura 13 il valore di picco coincide con quello picco-picco.

Duty cycle

Se i due livelli hanno una durata diversa, come in figura 14, si parla di **segnale impulsivo**. Un parametro particolarmente importante per i segnali a due livelli, e in particolare per quelli impulsivi, è il **duty cycle** (ciclo utile), definito come il rapporto tra il tempo di durata del livello alto (basso) e il tempo di ripetizione:

$$D = \frac{t_d}{T}$$

19

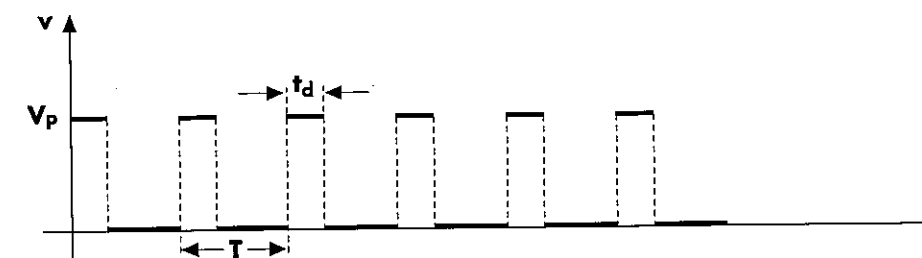


Figura 14
Segnale impulsivo.

Spesso questo parametro risulta espresso in forma percentuale. Se il segnale a due livelli presenta un ciclo utile del 50%, è un'onda quadra. Se t_d , come in figura 14, si riferisce alla durata del livello alto, si parla di **impulsi positivi** (in figura 14 $D < 50\%$), se si riferisce alla durata del livello basso, si parla di **impulsi negativi**. Non si interpretino erroneamente le diciture "impulsi positivi" e "impulsi negativi": non sono positivi o negativi nel senso numerico del termine ma convenzionalmente, in base al fatto che t_d venga valutato sul livello alto anziché su quello basso.

Facciamo il punto

I segnali periodici

valore medio di un segnale in un certo intervallo di tempo: esprime il rapporto tra l'area sottesa dalla curva del segnale e l'intervallo dello stesso

per un segnale periodico

la componente continua coincide con il suo valore medio

si dice

alternato un segnale periodico a valor medio nullo

segnali periodici tipici

sinusoidale: è alternato ($V_m = 0$); $V_{PP} = 2V_P$; $V_{eff} = V_P/\sqrt{2}$

raddrizzato a semionda: $V_m = V_P/\pi$; $V_{eff} = V_P/2$

raddrizzato a onda intera: $V_m = 2V_P/\pi$; $V_{eff} = V_P/\sqrt{2}$

triangolare alternato: $V_{eff} = V_P/\sqrt{3}$

triangolare unidirezionale a valor minimo nullo: $V_m = V_P/2$; $V_{eff} = V_P/\sqrt{3}$

triangolare a dente di sega: $V_m = V_P/2$; $V_{eff} = V_P/\sqrt{3}$

onda quadra alternata: $V_{eff} = V_P$

onda quadra unidirezionale a valor minimo nullo: $V_m = V_P/2$; $V_{eff} = V_P/\sqrt{2}$

impulsivo: $D = t_d/T$; $V_m = V_H D + V_L (1 - D)$ (vedi problema svolto 8)

valore efficace di una grandezza periodica: esprime la grandezza continua equivalente dal punto di vista energetico

Test

- Par. 2 **1** Un segnale è:
 a una grandezza fisica variabile nel tempo;
 b un suono;
 c una grandezza fisica la cui variazione temporale è portatrice di informazione;
 d una tensione alternata.
- Par. 2 **2** In un circuito una tensione continua dovrebbe assumere il valore di 1 V; a causa di un guasto assume invece il valore di 0,8 V. La tensione in questione:
 a non è un segnale perché, essendo continua, non varia nel tempo;
 b è un segnale la cui informazione è contenuta nella variazione di 0,2 V che si è verificata tra il valore corretto e quello effettivo;
 c è un segnale perché qualsiasi grandezza fisica lo è;
 d non è un segnale perché la sua variazione è solo del 20% e quindi non significativa.
- Par. 2 **3** Si definisce periodico un
- Par. 2 **4** Con il simbolo v si indica:
 a una tensione;
 b una tensione alternata;
 c il valore istantaneo di una tensione variabile nel tempo;
 d una tensione triangolare.
- Par. 3 **5** Un segnale unidirezionale è:
 a un segnale che trasmette informazione in una sola direzione;
 b un segnale tutto positivo o tutto negativo;
 c un segnale a valor medio positivo;
 d un segnale positivo e negativo.
- Par. 5 **6** Si dice alternato un segnale:
 a periodico a valore medio nullo;
 b sinusoidale;
 c unidirezionale;
 d periodico.
- Par. 6 **7** Il valore efficace di un segnale periodico è:
 a il suo valore medio;
 b la sua componente continua;
 c il valore continuo termicamente equivalente;
 d il valore di picco diviso radice di 2.
- Par. 7 **8** Il duty cycle di un segnale impulsivo è:
 a il rapporto tra la durata del livello basso e la durata del livello alto;
 b il rapporto tra l'ampiezza di uno dei due livelli e la durata del periodo;
 c il rapporto tra la durata di uno dei due livelli e il tempo del periodo;
 d il rapporto tra il tempo del periodo e la durata di uno dei due livelli.

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

AULADIGITALE

Problemi integrativi

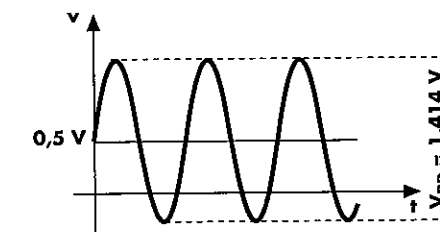
- Parr. 3 e 7 **1** ●●● Se a un segnale alternato sinusoidale di $0,5 V_{eff}$ si somma una tensione continua di $0,5 V$, si ottiene un segnale unidirezionale?

Soluzione

Dalla **6** si ricava $V_p = 0,707 V$. Come si vede dalla figura P1, il segnale risultante è ancora

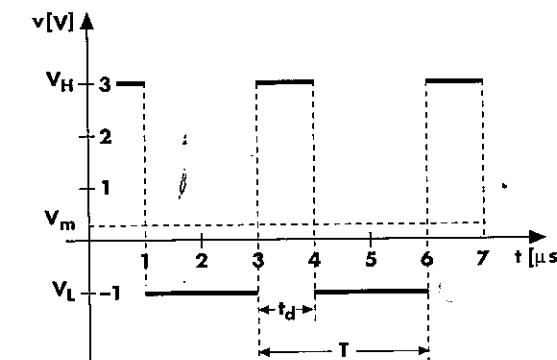
bidirezionale.

Figura P1



- Par. 7 **2** ●●● Del segnale impulsivo indicato in figura P2 valutare la frequenza, il duty cycle e il valore medio.

Figura P2



Soluzione

Il periodo risulta $T = 3 \mu s$ e quindi la frequenza vale $f = 1/T = 1/3 \cdot 10^{-6} \approx 333 \text{ kHz}$. Valutando il duty cycle rispetto al livello alto e applicando la **19** si ottiene $D = 1/3 = 0,33$. Per quanto riguarda il valore medio si può applicare la **3**:

$$V_m = \frac{V_H t_d + V_L (T - t_d)}{T} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} \approx 0,33 V$$

Questa relazione è esprimibile anche in funzione del duty cycle:

$$V_m = \frac{V_H t_d + V_L (T - t_d)}{T} = V_H D + V_L (1 - D)$$

Si potrebbe anche dimostrare che il valore efficace risulta

$$V_{eff} = \sqrt{V_H^2 D + V_L^2 (1 - D)}$$

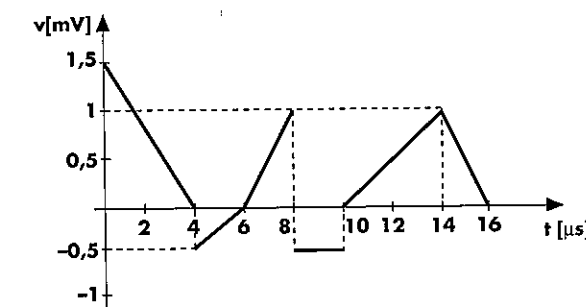
Problemi da svolgere

AULADIGITALE

Problemi integrativi

- Par. 4 **3** ●●● Facendo riferimento alla figura P3, calcolare il valore medio nell'intervallo tra 0 e 16 μs.

Figura P3



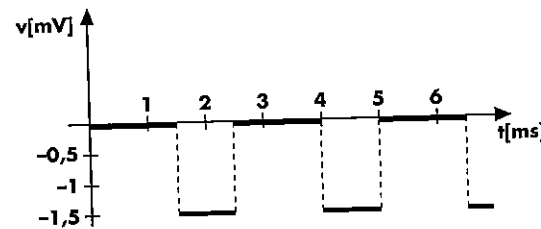
Par. 7 **4** Facendo riferimento al segnale alternato del problema 1, quanto deve valere il valore minimo della componente continua positiva necessaria per avere un segnale unidirezionale? E il valore massimo negativo?

Par. 7 **5** Il segnale in **figura 12** ha valore efficace $V_{eff} = 5$ V. Calcolare il valore efficace del segnale che si ottiene aggiungendo una componente continua pari a V_p (si osservi che il segnale diventa unidirezionale).

Par. 7 **6** Calcolare il valore efficace di un segnale armonico raddrizzato a semionda, sapendo che il suo valore medio è 1 V.

Par. 7 **7** Valutare la frequenza, il duty cycle e il valore medio del segnale di **figura P4**.

Figura P4



Par. 7 **8** Un segnale a due livelli, con valore minimo $V_L = 0$ e ampiezza picco-picco di 10 V, presenta un valore medio $V_m = 2,5$ V; determinare il valore del duty cycle (ricordarsi del problema 2).

Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).

sezione **3B Strumenti di misura**

TRMS
 multmetro
 stabilizzato
 oscilloscopio
 G.d.F.
 funzioni
 digitale
 generatore
 alimentatore
 BNC
 DMM

PAROLE CHIAVE ►

1. Premessa

Si forniranno di seguito le informazioni essenziali sulla strumentazione elettronica di base; per quanto riguarda gli strumenti più specifici per le telecomunicazioni, che si aggiungono a quelli qui considerati ma non li sostituiscono, se ne parlerà direttamente quando sarà necessario per lo sviluppo dei vari argomenti.

2. Il multmetro digitale

Il **multmetro digitale** (DMM: *Digital Multi-Meter*) è uno strumento molto versatile, che di solito permette di misurare:

- tensioni continue;
- tensioni alternate;
- correnti continue;
- correnti alternate;
- resistenze in continua.

In alcuni casi sono presenti anche altre funzioni quali la misura delle capacità, delle cadute di tensione sui diodi e delle frequenze.

Fondamentalmente il **DMM** è un *voltmetro in continua*: tutte le altre funzioni sono ottenute con opportuni accorgimenti circuitali interni al multmetro, atti a convertire le grandezze da misurare in tensioni continue. Spesso è disponibile anche una funzione legata alla misura di valori bassi di resistenza, che consente la verifica della "continuità elettrica" evidenziata dal suono di un *buzzer* (cicalino) interno.

Nelle misure in AC ha un campo di funzionamento corretto, nella misura del valore efficace di segnali sinusoidali, compreso tra un limite inferiore mediamente di 10÷50 Hz e uno superiore di 1÷100 kHz ma esistono strumenti espressamente previsti per le telecomunicazioni con un limite superiore molto più elevato.

A che cosa serve

AUTODIGITALE
 Lezione multimediale 3B.1
 Utilità degli strumenti

Il multmetro digitale è uno strumento di precisione che permette la misura di diverse grandezze.

Il DDM è la versione digitale del suo precursore analogico, noto con il nome di **tester** o **multimetro analogico**. Lo strumento base, che in quelli digitali è un **convertitore analogico digitale** (ADC), in quelli analogici è un **amperometro a bobina mobile** il cui precursore è il **galvanometro a fili** del 1881 di Deprez-D'Ansonval, che a sua volta si rifaceva al **syphon recorder** del britannico **W. Thomson** (1824-1907) e usato per la telegrafia su cavi sottomarini.

La visualizzazione avviene su un display a **LED** (*Light Emitting Diode*) o a **LCD** (*Liquid Crystal Display*) a 4 o più cifre. In taluni casi la cifra più significativa (la più a sinistra) può assumere solo i valori 0 e 1 o anche 0, 1 e 2; si parla allora di multimetri a 4 e 1/2 cifre, 5 e 1/2 cifre ecc., per intendere che la cifra più significativa può assumere solo un limitato numero di valori (vedere successivo esempio).

Esempio 1

Un multimetro a 4 e 1/2 cifre, se ha la cifra più significativa che può valere solo 0 e 1, può presentare un valore massimo leggibile pari a 19999 (prescindendo dalla posizione della virgola) e quindi i possibili valori di fondo scala sono 1,9999 - 19,999 - 199,99 - 1999,9 - 19999. In altri termini, ad esempio, per i primi tre casi (supponendo la lettura in mV): 2 mV, 20 mV, 200 mV; o anche, per i primi quattro: 2 V, 20 V, 200 V e 2000 V. Se lo strumento fosse a 5 cifre e 1/2, con la cifra più significativa che può valere 0 - 1 e 2, i possibili valori di fondo scala sarebbero 2,99999 - 29,9999 - 299,999 - 2999,99 - 29999,9 e 299999 (ovvero 3, 30, 300, 3000 ecc.). Infine, in un multimetro a 4 cifre i fondoscala sarebbero 9,999 - 99,99 - 999,9 e 9999 (ovvero 10, 100, 1000 e 10000).

Se il multimetro è TRMS misura il valore efficace anche per segnali alternati non sinusoidali.

Esistono multimetri a **vero valore efficace** (**TRMS: True Root Mean Square**) che sono in grado di fornire il valore efficace delle tensioni e correnti alternate di qualsiasi forma (anche se, con grandezze non sinusoidali, il limite superiore di frequenza è più limitato rispetto al valore che si verifica con le sinusoidi). I multimetri che non sono **TRMS**, invece, sono in grado di fornire il valore efficace solo con grandezze sinusoidali. In **figura 1** sono riportati un esempio di multimetro da banco della Agilent e un set di accessori.

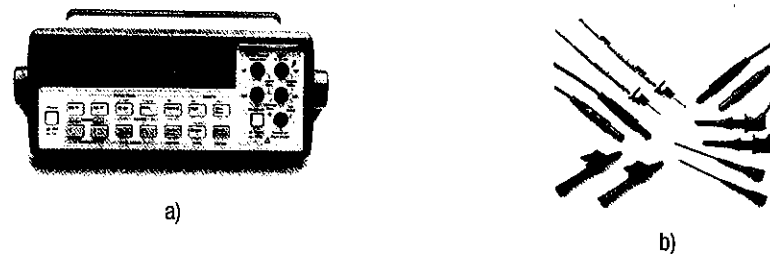


Figura 1
Un multimetro da banco della Agilent (mod. 33401 A) a 6 e 1/2 cifre (a) e un set di accessori (b).

Come collegarlo

Nel funzionamento come voltmetro il **DMM** va collegato con i puntali al circuito come indicato in **figura 2a**, ovvero in parallelo al circuito di misura; i puntali sono normalmente uno rosso e uno nero; nel funzionamento come amperometro va invece collegato come in **figura 2b**, ovvero in serie al circuito di misura.

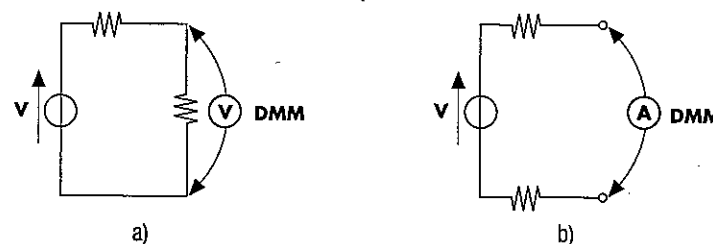


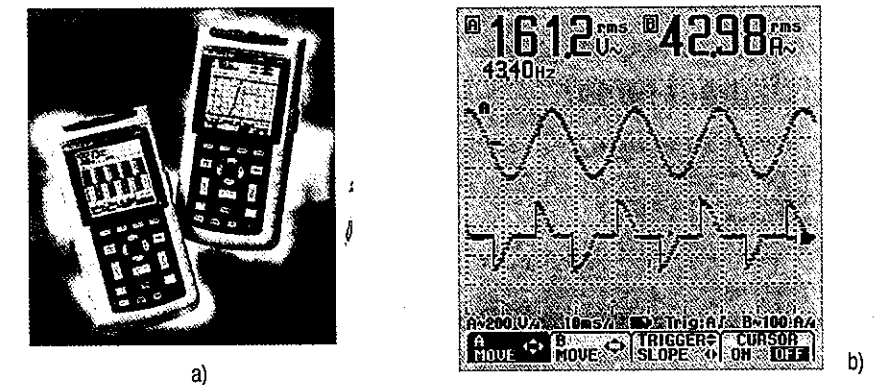
Figura 2
Il DMM collegato come voltmetro (a) e come amperometro (b).

Gli strumenti multifunzione di tipo palmare

Si tratta di strumenti dell'ultima generazione che offrono in spazi ridotti (si tratta di strumenti portatili il cui nome richiama la possibilità di poterli tenere sul palmo di una mano) ampie possibilità di misure. Per la loro completezza rientrano sicuramente nella categoria dei multimetri: tensioni, correnti, resistenze, frequenze, capacità ecc.; presentano però la caratteristica di permettere la visualizzazione delle forme d'onda, visto che incorporano un vero e proprio oscilloscopio (limitato solo nelle dimensioni dello schermo; vedi il paragrafo 5).

I più famosi sono quelli prodotti dalla **Fluke** e denominati **ScopeMeters®**; in **figura 3a** ne sono riprodotti due esemplari.

Figura 3
Due esempi di ScopeMeters® della serie 120 (a) che incorpora un oscilloscopio a doppia traccia digitale fino a 40 MHz e due multimetri del tipo TRMS. Esempio di videata (b).



3. L'alimentatore stabilizzato

Si tratta di uno strumento capace di fornire in uscita una tensione continua, ottenuta dalla conversione della tensione di rete alternata (220 V - 50 Hz), molto stabile anche al variare della corrente erogata e della tensione di rete.

È uno strumento molto utile perché quasi tutti i circuiti elettronici richiedono, per un corretto funzionamento, una adeguata alimentazione continua, usata come sorgente di energia e, inoltre, può essere usato per realizzare i circuiti in corrente continua che abbiamo studiato nella precedente unità di apprendimento. L'uscita è disponibile su due morsetti, uno per la polarità positiva e l'altro per quella negativa. La tensione è normalmente regolabile da zero (o pochi) volt a qualche decina di volt. La corrente massima può raggiungere anche parecchi ampere. Nei casi migliori esiste uno strumento che indica la tensione fornita; la lettura può essere **analogica** (strumento a indice) o **digitale** (strumento a indicazione numerica). Spesso lo stesso strumento può essere utilizzato anche per la misura della corrente erogata; in altri casi, a tal fine, è presente un apposito strumento amperometrico. Sono anche reperibili alimentatori multipli.

Gli alimentatori multipli risultano, normalmente, tra loro perfettamente isolati e indipendenti e quindi possono essere collegati in serie (per aumentare la tensione totale) o, se regolati alla stessa tensione, collegati in parallelo (per aumentare la corrente erogabile); è anche possibile collegare le uscite in modo da realizzare alimentatori con uscite positive e negative rispetto a massa.

La **figura 4b** (vedi pagina seguente) indica come ottenere l'aumento della tensione tramite collegamento in serie di due uscite; la **figura 4c** indica come ottenere una tensione positiva e una negativa rispetto a massa: nel caso che le due uscite siano predisposte per la stessa tensione, si ottiene una tensione simmetrica (ad esempio ± 15 V); in quest'ultimo caso si dice anche che la tensione è **duale**.

L'alimentatore stabilizzato fornisce l'energia necessaria al funzionamento dei circuiti elettronici in prova.

Alimentatori in serie e in parallelo

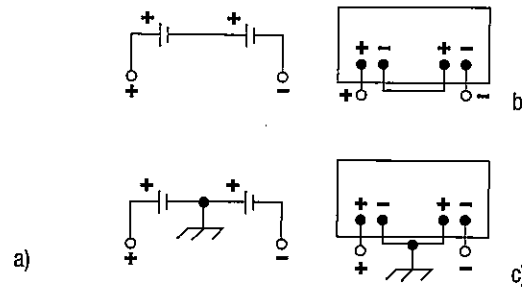


Figura 4
Esempio di alimentatore stabilizzato commerciale Agilent (mod. E3630 A) a lettura digitale (a); modalità di collegamento in serie (b) e per ottenere tensioni positive e negative rispetto a massa (c).

Facciamo il punto

Alimentatore stabilizzato e multimetro digitale

alimentatore stabilizzato:
fornisce una tensione continua molto stabile

serve a

alimentare i circuiti in prova

TRMS: misurano il valore efficace con qualsiasi forma d'onda; **gli altri:** il valore efficace è giusto solo con segnali sinusoidali

← in alternata

multimetro digitale:
strumento di misura universale

misure più diffuse

tensioni in DC e in AC
correnti in DC e in AC
resistenze in DC

altre misure possibili

capacità
misure sui diodi
frequenze
continuità elettriche

visualizzazione

display a LED o LCD

AULADIGITALE
Lezione multimediale 3B.1
Utilità degli strumenti

Il generatore di funzioni è un generatore di tensioni periodiche.

4. Il generatore di funzioni

Il **generatore di funzioni** è uno strumento che è in grado di fornire segnali in tensione periodici, in una gamma di frequenze che vanno dalla frazione di hertz a diversi megahertz (ma anche gigahertz).

Le forme d'onda disponibili sono la sinusoidale, la triangolare e la quadra. Spesso si ha la possibilità di regolare il duty cycle e di aggiungere una componente continua (*offset di tensione*) al segnale con la possibilità, quindi, di ottenere segnali bidirezionali o unidirezionali. Negli strumenti previsti per le telecomunicazioni sono disponibili anche segnali modulati AM e FM (vedi unità di apprendimento 12). L'ampiezza in uscita è normalmente regolabile da pochi millivolt ad alcune decine di volt, in modo continuo e a scatti (*steps*).

È normalmente disponibile un'uscita quadra *compatibile* TTL e/o CMOS (si trattano particolari dispositivi tipicamente usati nei sistemi digitali). In questo caso le uniche regolazioni possibili sono quelle della frequenza e del duty cycle.

Connettori BNC e cavo schermato

Spesso sono disponibili anche uno o più ingressi con i quali è possibile agire sui segnali forniti dal generatore, provocando la variazione di alcuni parametri tramite comandi esterni.

Le entrate e le uscite del G.d.F. (Generatore di Funzioni) sono normalmente disponibili su bocchettoni BNC. Un BNC complementare ai precedenti risulta poi presente su ogni *cavo schermato*, necessario al raccordo del G.d.F. con i circuiti esterni (figg. 5a e 5b).

Cavi coassiali BNC-BNC e transizioni T (BNC-BNC-BNC) vengono usati per collegamenti tra gli strumenti di laboratorio (ad esempio tra generatore di funzioni e oscilloscopio), invece per collegare gli strumenti al circuito elettronico si adoperano cavi coassiali BNC-coccodrillo (pinzette seghettate per agganciare i fili elettrici).

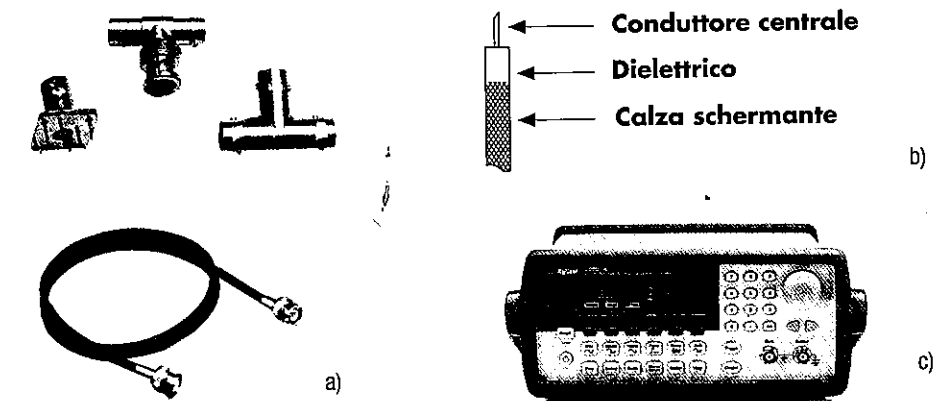


Figura 5
Alcuni esempi di BNC (a), la struttura del cavo schermato (b), esempio di G.d.F. di produzione Agilent (33220 A) (c).

La *calza* del cavo schermato viene collegata alla **massa** del G.d.F., ovvero a un punto per convenzione a potenziale zero; *questo permette di schermare il segnale*, cioè di impedire a eventuali disturbi, di natura elettromagnetica, di essere captati dal conduttore centrale e di trovarsi quindi sovrapposti al segnale (in realtà i disturbi vengono captati ugualmente ma con minore intensità). Il collegamento tra massa del G.d.F. e calza del cavo avviene tramite il conduttore esterno del BNC che è realizzato in modo da mantenere la schermatura.

La **figura 5** riporta un esempio di G.d.F. commerciale di elevata qualità: permette la creazione di forme d'onda definibili arbitrariamente dall'operatore, ha incorporato un frequenzimetro digitale e arriva a 20 MHz.

5. L'oscilloscopio

L'**oscilloscopio** è uno strumento che presenta due ingressi, chiamati *x* e *y*, *sensibili ai valori istantanei delle tensioni* applicate agli ingressi stessi. Pertanto le entrate dell'oscilloscopio vanno considerate, ai fini dei collegamenti con i circuiti esterni, come se fossero dei voltmetri.

L'oscilloscopio è dotato di uno schermo realizzato da un tubo a raggi catodici (CRT: *Cathode Ray Tube*) o negli strumenti più recenti del tipo LCD (*Liquid Crystal Display*), sul quale, tramite un punto luminoso e posto in movimento tramite segnali opportuni, è possibile tracciare delle immagini.

Si tratta di uno strumento molto utile in quanto permette di osservare visivamente l'andamento nel tempo dei segnali sotto osservazione, permettendone, quindi, una valutazione di tipo qualitativo.

Come si vede in **figura 6b**, sullo schermo è presente un reticolo utile alla misura dell'ampiezza della immagine (ogni quadrato corrisponde normalmente a 1 cm²).

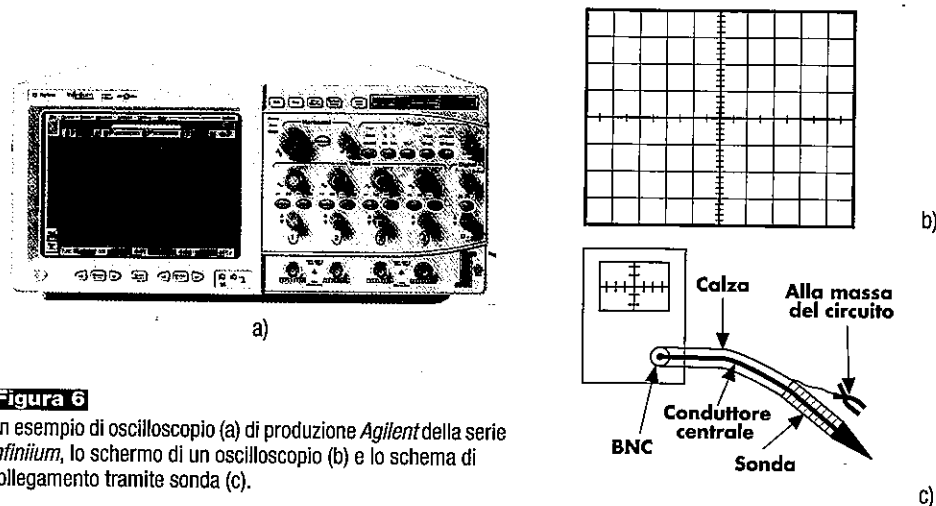


Figura 6
Un esempio di oscilloscopio (a) di produzione Agilent della serie Infinium, lo schermo di un oscilloscopio (b) e lo schema di collegamento tramite sonda (c).

Uso in x-y Il segnale applicato all'ingresso dell'asse *x* produce spostamenti orizzontali del punto luminoso, direttamente proporzionali ai valori istantanei della tensione presente all'ingresso stesso; analogamente, il segnale applicato all'ingresso *y* produce spostamenti verticali del punto luminoso direttamente proporzionali ai valori istantanei della tensione applicata all'ingresso stesso. Pertanto è possibile tracciare sullo schermo dei grafici, ottenuti inviando opportuni segnali ai due ingressi, usando lo schermo come piano cartesiano. In questo caso si dice che l'oscilloscopio funziona in *modo x-y*.

Uso con base dei tempi interna Se il segnale che comanda il movimento secondo l'asse *x* è prodotto internamente allo strumento, in modo che questo movimento avvenga a velocità costante nota, l'asse *x* diventa *base dei tempi*. Si dice, in questo caso, che l'oscilloscopio funziona con *base dei tempi interna* e serve a visualizzare il grafico dell'andamento nel tempo di un segnale applicato all'ingresso *y*. Il segnale da visualizzare deve essere, nei più vecchi oscilloscopi **analogici**, periodico perché altrimenti risulterebbe visualizzato sullo schermo per un tempo troppo breve; i più recenti oscilloscopi **digitali** non hanno questa limitazione.

Mono e doppia traccia Esistono oscilloscopi **monotraccia**, **doppia traccia** (i più diffusi) e, di più recente produzione, a **quattro tracce**; gli ultimi due tipi permettono la contemporanea visualizzazione di più segnali e presentano quindi più ingressi *y*. Gli ingressi *y*, trattandosi di ingressi voltmetrici, presentano un'elevata resistenza (o più correttamente impedenza) di ingresso (tipicamente 1 MΩ).

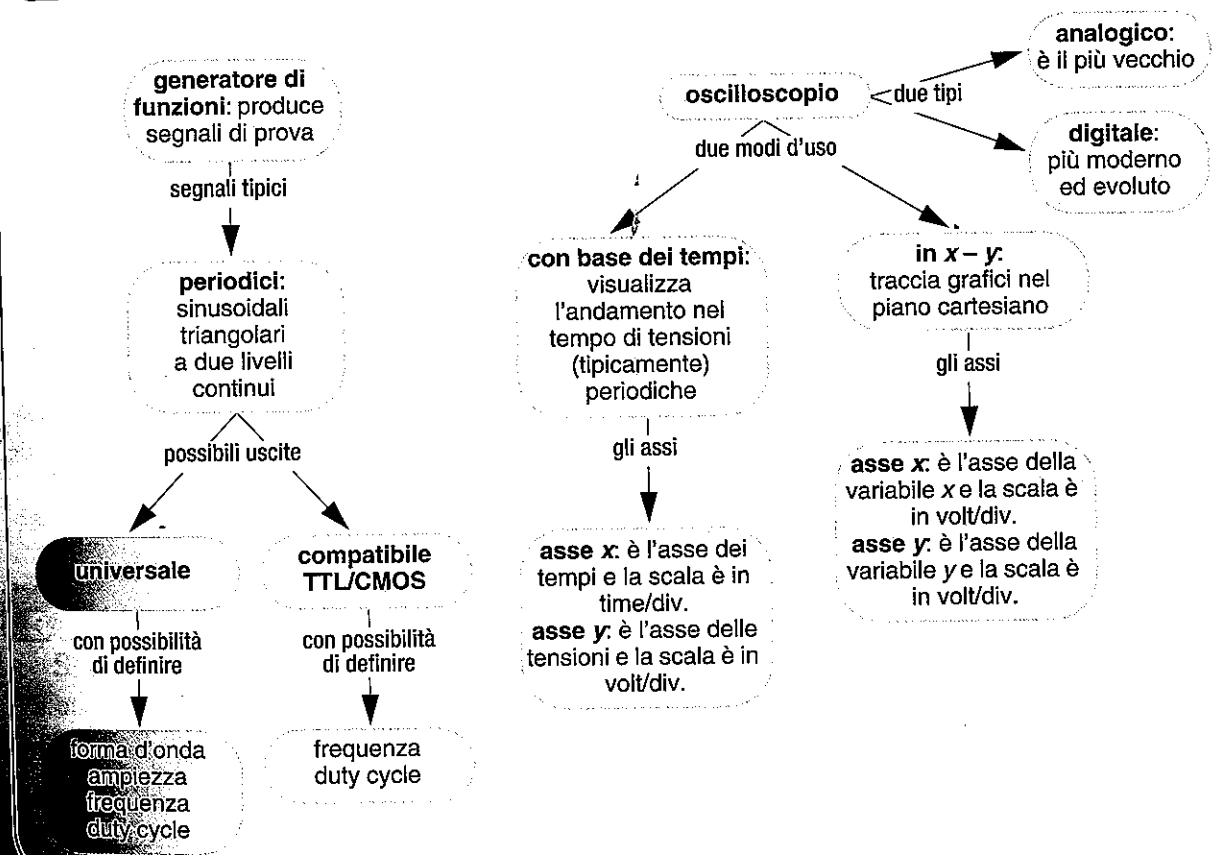
La sonda Come il G.d.F., anche l'oscilloscopio presenta gli ingressi di tipo BNC, il collegamento al circuito avviene poi normalmente tramite un'apposita **sonda** (fig. 6c). Questa sonda, nei casi più semplici, prevede due modalità di funzionamento, selezionabili tramite apposito selettore a due posizioni ($\times 1$ e $\times 10$): nella prima la sonda non introduce alcuna attenuazione del segnale e l'oscilloscopio mantiene la sua impedenza tipica (normalmente 1 MΩ); nella seconda la sonda introduce un'attenuazione pari a 10 (e quindi il valore misurato dall'oscilloscopio deve essere moltiplicato per 10) e l'oscilloscopio, comprensivo di sonda, presenta una impedenza di ingresso più elevata (tipicamente 10 MΩ); in questo modo costituisce un carico meno critico nei confronti della precisione della misura (essendo l'oscilloscopio un voltmetro, più elevata è la sua resistenza interna e meglio è).

Banda passante

Un'ultima caratteristica importante dell'oscilloscopio è la **banda passante**, che con segnali sinusoidali esprime l'intervallo di frequenze in cui lo strumento funziona correttamente. Il limite inferiore di tale intervallo di frequenze, in un buon oscilloscopio, corrisponde alla componente continua (frequenza zero); un tipico valore del limite superiore di uno strumento di costo contenuto era, fino a pochi anni fa, pari a 20 MHz; attualmente anche i modelli più economici possono raggiungere i 50÷100 MHz. Il costo di un oscilloscopio cresce rapidamente all'aumentare della banda passante.

Facciamo il punto

Generatore di funzioni e oscilloscopio



unità di apprendimento

Sistemi digitali

4

obiettivo di competenza finale

possedere una visione d'insieme dei sistemi digitali cablati e programmati e una padronanza essenziale sugli elementi logici fondamentali sia combinatori che sequenziali

Sezione 4A

Introduzione

obiettivo di competenza intermedio

comprendere l'universalità dell'approccio digitale in un modo sostanzialmente analogico per natura

Sezione 4B

Numerazione binaria

obiettivo di competenza intermedio

comprendere le caratteristiche fondamentali del sistema di numerazione binario e saper convertire da decimale a binario e viceversa

Sezione 4C

Sistemi combinatori

obiettivo di competenza intermedio

conoscere gli assiomi booleani e gli elementi combinatori fondamentali e sapere descrivere o valutare il comportamento di semplici circuiti combinatori tramite tabelle della verità

Sezione 4D

Sistemi sequenziali

sezione 4A **Introduzione**



PAROLE CHIAVE ►

1. Universalità dell'elettronica digitale

Classificazione dei circuiti

I circuiti elettronici vengono normalmente distinti in due categorie:

- 1) circuiti analogici;
- 2) circuiti digitali.

La distinzione deriva dalle caratteristiche dei segnali con cui lavorano questi circuiti.

In particolare si ha un **segnale analogico** quando questo può variare con continuità, assumendo nel tempo tutti i valori compresi in un certo intervallo.

Si ha invece un **segnale digitale** quando questo non varia con continuità, ma può assumere solo valori ben determinati.

Esempi di segnali analogici sono il sinusoidale e il triangolare, mentre i segnali a due livelli sono digitali. I segnali digitali sono anche detti **numerici** (digit: cifra) perché sono facilmente interpretabili in forma numerica.

Un segnale analogico può assumere infiniti valori; uno digitale solo un numero finito.

Segnale binario

Il caso classico di segnale digitale è quello binario.

Più precisamente, il segnale digitale classico è quello **binario**: ai due possibili valori si associano convenzionalmente i numeri 0 e 1 e, in conseguenza, il segnale può essere interpretato in forma numerica tramite un sistema di numerazione binario.

Per comprendere l'importanza dell'elettronica digitale è utile osservare che i segnali elettrici di tipo analogico possono essere convertiti in digitale senza che venga persa l'informazione che contengono e che quindi è possibile elaborare in modo digitale anche segnali originariamente analogici.

Si pensi a un'operazione di trattamento dei segnali del tipo di quella in figura 1. Più segnali analogici vengono applicati in ingresso a un sistema di **conversione analogico-digitale** che fornisce in uscita dei segnali digitali di tipo binario, contenenti però la stessa informazione dei segnali analogici originari (si può pensare che il numero binario che esprime in ogni istante il singolo segnale analogico corrisponda, o comunque sia proporzionale, all'ampiezza del corrispondente segnale analogico).

Grazie alla possibilità di effettuare conversioni AD e DA è possibile utilizzare l'elettronica digitale anche con segnali originariamente analogici.

co nello stesso istante; questo concetto sarà meglio chiarito più oltre). I segnali digitali vengono poi inviati a un sistema elettronico digitale e opportunamente trattati, in relazione al processo desiderato; i segnali digitali, così ottenuti, possono poi essere inviati a un sistema di **conversione digitale-analogico** per essere convertiti in segnali analogici che contengono la stessa informazione.

Una struttura di questo tipo presenta il vantaggio di permettere il trattamento dei segnali analogici in modo digitale con tutti i vantaggi che questo comporta, ottenendo però alla fine, dei segnali ancora analogici, come d'altronde normalmente serve.

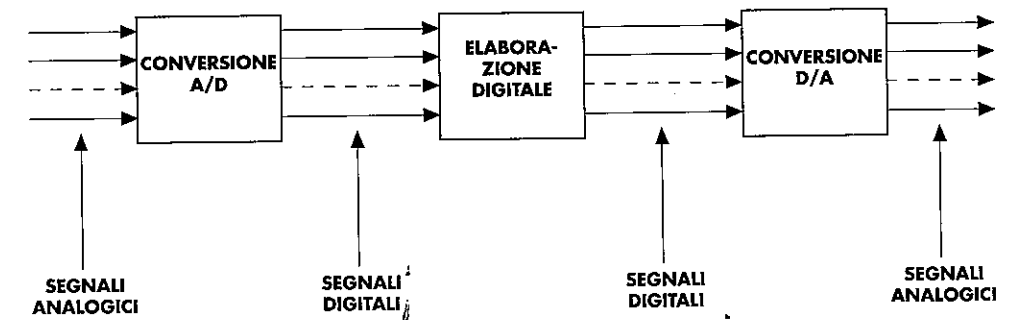


Figura 1 Conversione A/D e D/A.

Esempio 1

Si pensi a un sistema industriale per il controllo di un processo produttivo: i segnali analogici in ingresso possono essere delle tensioni direttamente proporzionali a delle grandezze fisiche la cui misura serve per controllare correttamente il processo (queste tensioni saranno ottenute con opportuni **trasduttori**, per esempio con un trasduttore di temperatura si può ottenere una tensione direttamente proporzionale alla temperatura di un certo ambiente). Dopo la conversione analogico-digitale (A/D) i segnali possono essere inviati a un calcolatore, che, in relazione alle informazioni ottenute dai segnali dei trasduttori, "decide" come intervenire sul processo.

La decisione del calcolatore si traduce in una sequenza di segnali digitali in uscita dallo stesso che, dopo essere stati trasformati in analogici (se necessario), possono agire sugli elementi che compongono il sistema per far evolvere nel modo desiderato il processo produttivo (per esempio se la temperatura deve rimanere costante e l'informazione in ingresso al calcolatore dice che è in aumento, il calcolatore modifica il segnale digitale in uscita in modo che questo, convertito in analogico, si traduca in una tensione in diminuzione ai capi dell'elemento riscaldante, supponendo appunto che questa diminuzione provochi la riduzione dell'effetto riscaldante).

Il più evidente vantaggio di un sistema di questo tipo consiste nel fatto che il processo è controllato da un calcolatore, ovvero da un'apparecchiatura molto potente e versatile che permette di controllare processi anche molto complessi, con in più la possibilità di potere modificare il processo semplicemente modificando il programma che gestisce lo stesso.

Esempio 2

Un moderno sistema di registrazione e riproduzione musicale può essere pensato come formato da un gruppo di microfoni (i trasduttori) che forniscono i segnali analogici che contengono l'informazione musicale delle voci e degli strumenti. A questo punto i segnali convertiti in digitali vengono inviati in un sistema digitale di missaggio (vengono cioè trattati in modo da assumere le ampiezze e le caratteristiche di tonalità desiderate e poi miscelati); il segnale digitale risultante può poi essere trasferito su un disco digitale (CD: Compact Disc) o conservato su file (ad esempio MP3).

In riproduzione si procederà poi alla conversione del segnale in analogico, che, opportunamente amplificato, verrà inviato agli altoparlanti.

Il più evidente vantaggio di un sistema di questo tipo consiste nella sua notevole **immunità al rumore**, ovvero nella sua forte insensibilità ai disturbi, che invece si sovrappongono facilmente al segnale musicale in un sistema di registrazione e riproduzione totalmente analogico.

Il campionamento

La conversione AD di un segnale analogico richiede il suo campionamento.

Per comprendere come sia possibile convertire un segnale analogico in uno digitale contenente la stessa informazione, si può pensare di **campionare** il segnale analogico a una opportuna frequenza di campionamento f_c , ovvero di prelevare l'ampiezza del segnale a istanti stabiliti e con periodicità fissa, ottenendo, in sostituzione del segnale analogico originario (fig. 2a), un segnale che agli istanti di campionamento presenta la stessa ampiezza del segnale originario, ma che in istanti diversi assume valore nullo (fig. 2b).

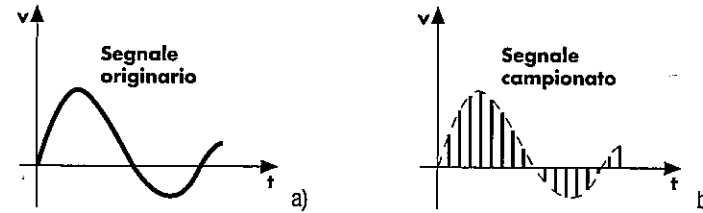


Figura 2
Segnale analogico originario (a) e corrispondente segnale campionato (b).

Se la frequenza di campionamento f_c è sufficientemente elevata da potere ritenere i campioni abbastanza vicini da garantire la ricostruzione del segnale originario, il segnale campionato così ottenuto contiene la stessa informazione di quello iniziale. Se tutto questo si verifica, si può allora pensare di esprimere le ampiezze del segnale agli istanti di campionamento in forma numerica e in particolare in forma binaria: quanto ottenuto è la conversione analogico-digitale del segnale originario (al momento non ci si preoccupa di spiegare come questa conversione venga fisicamente ottenuta); il numero di bit usato per esprimere in binario i campioni sarà scelto in funzione della precisione desiderata nella conversione.

Per non perdere informazione si deve campionare a una frequenza almeno doppia della massima presente nel segnale.

Pare evidente come sia poi possibile, procedendo in modo inverso, ottenere una sequenza di campioni a frequenza fissa corrispondenti alle ampiezze del segnale analogico espresso in forma digitale: per passare dal segnale inteso come successione di campioni al segnale analogico effettivo si fa passare il segnale in un opportuno filtro che elimina le discontinuità del segnale, riportandolo all'aspetto analogico originale. Rimane da spiegare sotto quali condizioni il segnale analogico può essere campionato senza perdere informazione; ciò è quanto esprime il **teorema del campionamento di Shannon** il quale afferma che, detta f_{MAX} la massima frequenza presente nel segnale da campionare, se:

$$f_c \geq 2f_{MAX}$$

allora la successione di campioni che si ottiene contiene tutta l'informazione del segnale originario.

Per massima frequenza presente si intende la massima (in frequenza) componente sinusoidale del segnale la cui ampiezza risulta non trascurabile (si ricordi il teorema di Fourier che, in termini "spiccioli", afferma che un qualsiasi segnale può sempre essere interpretato come somma di più sinusoidi di frequenza multipla una dell'altra e che la frequenza più bassa coincide, nel caso di segnale periodico, con la frequenza del segnale stesso).

Esempio 3

L'orecchio umano, mediamente, sente solo le frequenze sinusoidali comprese tra i 20 Hz e i 20 kHz, pertanto, visto che il segnale audio, come tutti i segnali, può essere pensato come somma di sinusoidi, nel realizzare un compact disc (CD) si deve considerare come frequenza massima f_{MAX} la frequenza di 20 kHz; il campionamento, quindi, deve avvenire per la **1**, a una frequenza f_c non inferiore a 40 kHz.

All'ingegnere e matematico statunitense Claude Elwood Shannon (1916-2001) non si deve solo il teorema del campionamento; infatti per i suoi studi può essere considerato il padre della **teoria dell'informazione**, che è alla base delle moderne telecomunicazioni. A lui si deve anche la dimostrazione che i segnali elettrici binari seguono le regole dell'algebra di Boole, che vedremo nella sezione 4C e che è fondamentale per l'elettronica digitale.

Da quanto sin qui esposto si possono trarre alcune prime conclusioni:

- ▶ il mondo in cui viviamo è sostanzialmente analogico (per convincersene basta provare a cercare delle grandezze fisiche presenti in natura che siano di tipo digitale... Ne avete trovate?);
- ▶ i sistemi elettronici che sono sostanzialmente del tipo ingresso/uscita (a ogni sollecitazione in ingresso il sistema fornisce una risposta in uscita in qualche modo dipendente dalla sollecitazione) possono essere realizzati sia in forma analogica che in forma digitale;
- ▶ se il sistema è di tipo digitale ma le grandezze di ingresso e di uscita sono analogiche, il sistema inizierà e si concluderà con delle sezioni analogiche (convertitori A/D e D/A più eventuali altre parti analogiche per adattare il segnale alle esigenze del sistema).

2. Sistemi digitali

I sistemi digitali possono essere così classificati:

- ▶ sistemi a **logica cablata**;
- ▶ sistemi a **logica programmata con RAM, ROM, PROM, EPROM, EEPROM, PLD ecc.**;
- ▶ sistemi a **logica programmata con microprocessori o microcontrollori**.

■ I sistemi a **logica cablata** sono realizzati con un insieme di dispositivi elettronici opportunamente collegati tra loro in modo da ottenere un determinato funzionamento.

Rientrano in questa categoria i sistemi più semplici. Il principale inconveniente di questi sistemi è legato all'**assenza di flessibilità**: una volta realizzati, sono difficilmente modificabili.

■ I sistemi a **logica programmata del primo tipo** utilizzano dispositivi elettronici il cui funzionamento può essere definito o in sede costruttiva, o dall'utente con appositi programmatori, e in alcuni casi sono anche riprogrammabili.

Si tratta di sistemi che presentano sicuramente una più elevata flessibilità e vengono normalmente preferiti ai primi per realizzazioni di una certa complessità.

■ I sistemi a **logica programmata del secondo tipo** permettono di utilizzare sempre lo stesso dispositivo (il microprocessore o il microcontrollore) in realizzazioni anche a elevata complessità: la funzione svolta dal sistema dipende dal programma inserito nella memoria del sistema stesso (è il caso dei computer).

Flessibilità

La loro elevata flessibilità li rende dei **sistemi quasi universali**. L'unico inconveniente è che sono più lenti (e costano di più).

Test

- Par. 2 **1** Un segnale digitale:
- a può assumere infiniti valori;
 - b è sempre binario;
 - c può assumere solo determinati valori;
 - d non si può usare per elaborare informazioni di origine analogica.
- Par. 2 **2** La conversione A/D permette di:
- a convertire un segnale analogico in uno digitale senza perdere informazione;
 - b convertire un segnale digitale in uno analogico senza perdere informazione;
 - c elaborare in forma numerica un segnale analogico;
 - d recuperare informazione da un segnale analogico.
- Par. 2 **3** Il teorema di Shannon sul campionamento afferma che:
- a la frequenza di campionamento deve essere pari alla massima frequenza sinusoidale presente nel segnale;
 - b il campionamento deve avvenire a una frequenza superiore alla massima contenuta nel segnale;
 - c la massima frequenza contenuta nel segnale deve essere almeno doppia di quella di campionamento;
 - d la massima frequenza sinusoidale contenuta nel segnale deve essere al massimo la metà di quella di campionamento.
- Par. 2 **4** Se un oscilloscopio digitale visualizza correttamente un segnale sinusoidale di 100 MHz vuole dire che:
- a il campionamento avviene a 50 MHz;
 - b il campionamento avviene a 100 MHz;
 - c il campionamento avviene a 200 MHz;
 - d il campionamento avviene a non meno di 200 MHz.

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

- Par. 2 **1** ●●● Un oscilloscopio digitale deve operare correttamente con segnali sinusoidali fino alla frequenza di 60 MHz. Quale deve essere la minima frequenza di campionamento?

Soluzione

Siccome la massima frequenza è di 60 MHz, si deve campionare una frequenza almeno doppia, ovvero di 120 MHz.

Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).

sezione **4B** **Numerazione binaria**

forma byte numerazione polinomiale bit forma byte numerazione polinomiale bit sistema binario base sistema

PAROLE CHIAVE ►

1. Sistemi di numerazione

Nel sistema decimale si usano *dieci* simboli per rappresentare tutti i numeri; questi simboli sono: 0-1-2-3-4-5-6-7-8-9.

Un qualsiasi numero decimale è sempre scrivibile in *forma polinomiale*, ad esempio:

$$135 = 1 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$$

In pratica la cifra più a destra è quella *meno significativa*, perché di *minore peso* (unità nel nostro esempio), quella più a sinistra è quella *più significativa*, perché di *maggiore peso* (centinaia nel nostro esempio).

Analogo discorso può essere fatto per un numero decimale frazionario:

$$212,13 = 2 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0 + 1 \cdot 10^{-1} + 3 \cdot 10^{-2}$$

Per quanto detto, il sistema di numerazione decimale è un sistema di tipo **posizionale** (detto anche *ponderato* o *pesato*) ovvero *le singole cifre del numero assumono un ben determinato valore non solo in relazione al simbolo scelto ma anche alla loro posizione*; in particolare nel sistema decimale il valore numerico corrispondente alla singola cifra si ottiene moltiplicando la stessa per 10^p , dove p dipende dalla posizione della cifra stessa.

La base ■ Un sistema di numerazione di questo tipo si dice a **base 10** ovvero *la base rappresenta il numero di simboli disponibili per scrivere le singole cifre del numero*.

Forma polinomiale Generalizzando quanto detto per il sistema decimale, e limitatamente ai sistemi di numerazione che presentano la stessa impostazione strutturale, si può dire che detta B la base di un numero N di n cifre che formano la parte intera e m cifre che compongono la parte frazionaria, il numero N può essere scritto nella seguente **forma polinomiale**:

$$N_{(B)} = \sum_{i=-m}^{n-1} C_i B^i$$

con C_i = generica cifra del numero.

I simboli usati nell'attuale sistema di numerazione decimale sono quelli dei cosiddetti **numeri arabi**. In effetti, questi numeri nacquero in India nel 200 a.C. e raggiunsero l'Europa attraverso matematici e astronomi arabi e ciò spiega il nome.

In un sistema posizionale le cifre hanno un valore che dipende dalla loro posizione.

Lo sviluppo numerico della forma polinomiale porta quindi facilmente alla conversione dal numero in base B al corrispondente in base 10, visto che siamo abituati a quest'ultimo sistema di numerazione: basta esprimere nella B^n i termini C_i e B^i in base 10.

Esempio 1

Il numero $241,32_{(5)}$ (cioè in base 5) espresso in forma polinomiale e quindi interpretato in decimale risulta (tenendo presente che $B=5$, $n=3$ e $m=2$):

$$241,32_{(5)} = (2 \cdot 5^2 + 4 \cdot 5^1 + 1 \cdot 5^0 + 3 \cdot 5^{-1} + 2 \cdot 5^{-2})_{(10)} = (50 + 20 + 1 + 0,6 + 0,08)_{(10)} = 71,68_{(10)}$$

Sistema binario

Il sistema binario fu introdotto nel 1679 dallo scienziato e filosofo tedesco Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716). L'idea gli venne vedendo i diagrammi presenti in un testo antico cinese, che erano costruiti usando solo due simboli, ripetuti secondo sequenze che rispondevano a una logica matematica. Questo libro (le cui origini si fanno risalire a più di 4000 anni fa) è detto I-Ching (La Legge) o anche Oracolo delle Mutazioni. Questo volume, considerato da Confucio (pensatore e filosofo cinese che visse tra il 551 a.C. e il 479 a.C.) libro di saggezza, è usato a scopo divinatorio (ovvero per la ricerca di informazioni da fonti soprannaturali) e fu fatto conoscere a Leibniz da un suo amico missionario in Cina.

Numero massimo scrivibile

Nel sistema binario (particolarmente usato in elettronica) la base è il numero 2 e quindi, le cifre disponibili sono 0 e 1.

Ad esempio si può scrivere:

$$1011_{(2)} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{base}}}{1} \cdot 2^3 + \underset{\substack{\uparrow \\ 8}}{0} \cdot 2^2 + \underset{\substack{\uparrow \\ 0}}{1} \cdot 2^1 + \underset{\substack{\uparrow \\ 2}}{1} \cdot 2^0 = 11_{(10)}$$

oppure:

$$11,01_{(2)} = \underset{\substack{\uparrow \\ 2}}{1} \cdot 2^1 + \underset{\substack{\uparrow \\ 1}}{1} \cdot 2^0 + \underset{\substack{\uparrow \\ 0}}{0} \cdot 2^{-1} + \underset{\substack{\uparrow \\ 0,25}}{1} \cdot 2^{-2} = 3,25_{(10)}$$

Una cifra binaria è detta **bit** (abbreviazione di *binary digit*), un raggruppamento di otto bit è detto **byte**.

Altri sistemi di numerazione di un certo interesse per l'elettronica sono quello **ottale** (base 8) e quello **esadecimale** (base 16).

È evidente che **maggiore è il valore della base del sistema, minore risulta il numero di cifre necessarie per rappresentare uno stesso numero** (perché maggiore è il numero di simboli disponibili).

In generale se si indica con B la base del sistema di numerazione, con n il numero delle cifre usate e si considerano solo numeri interi, il numero massimo scrivibile in base 10 risulta:

$$N_{MAX(10)} = B^n - 1$$

Ad esempio, con 4 bit in binario si possono scrivere tutti i numeri da 0 a 15.

Esempio 2

Con quattro cifre decimali si possono rappresentare tutti i numeri interi da 0 a $9999_{(10)}$, ovvero da 0 a $(10^4 - 1)_{(10)}$. Sempre con quattro cifre, ma in base 8, si possono scrivere tutti i numeri da 0 a $7777_{(8)} = 4095_{(10)} = (8^4 - 1)_{(10)}$. Infine con quattro cifre binarie si possono scrivere tutti i numeri da 0 a $1111_{(2)} = 15_{(10)}$.

Si consideri ora il numero $326_{(10)}$ e si effettui uno spostamento verso sinistra di tutte le cifre di una posizione inserendo uno zero sulla destra: si ottiene il numero $3260_{(10)}$, pari a $326 \cdot 10$. Al contrario, si effettui uno spostamento a destra eliminando la cifra meno significativa: si ottiene il numero $32_{(10)}$, che rappresenta la divisione intera per 10 di 326 (la parte persa è il resto). Si può pertanto dire che una traslazione a sinistra o a destra delle cifre di un numero decimale equivale a una moltiplicazione o ad una divisione per 10 del numero.

Analogamente, una traslazione a sinistra o a destra delle cifre di un numero binario equivale a una moltiplicazione o ad una divisione per due.

Nel sistema binario uno shift a sinistra equivale a una moltiplicazione per due del numero, quello a destra a una divisione per due.

Più in generale, la traslazione a sinistra di tutte le cifre di un numero in base B (con l'aggiunta di uno 0 a destra) equivale a moltiplicare il numero per la base, mentre una traslazione a destra di tutte le cifre (con perdita di quella meno significativa) corrisponde alla divisione intera per la base (la cifra persa è il resto). L'operazione di traslazione viene normalmente detta **shift**.

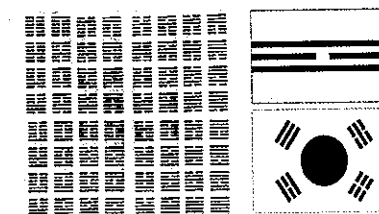
Lo shift

non solo teoria 1

Le origini della numerazione binaria

Partendo da sinistra si vede uno degli esagrammi (grafici ottenuti dal raggruppamento ripetuto di sei elementi) del libro dei Mutamenti dell'antica Cina che ispirò Leibniz per definire il sistema di numerazione binaria: se si considerano le singole coppie di trattini brevi come degli 0 e i trattini lunghi come degli 1, il primo esagramma in alto a sinistra corrisponde a 0, il secondo a 1 fino ad arrivare all'ultimo in basso a destra che corrisponde a $1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 63$.

Più a destra sono riportate due bandiere che contengono trigrammi (questa volta gli elementi raggruppati sono solo tre): più in alto quella dell'Impero Vietnamita (stato fantoccio durante l'occupazione giapponese che durò solo dall'11 marzo al 23 agosto del 1945); più in basso la bandiera della Corea del sud. Queste bandiere confermano che il libro in questione ancora oggi ha influenza sulla cultura asiatica.



2. Conversioni

Conversione da binario a decimale

La conversione da binario a decimale è stata già esposta, attraverso gli esempi del precedente paragrafo: si rappresenta il numero binario in forma polinomiale e si sommano i valori decimali dei singoli termini del polinomio.

Conversione da decimale a binario

La conversione da decimale a binario, nel caso di un numero intero, può essere fatta con il **metodo delle successive divisioni per due**: si effettua la divisione intera del numero per 2, il resto della divisione costituisce la cifra meno significativa; si procede così sul quoziente fino a quando quest'ultimo non si annulla, ottenendo la cifra più significativa.

Esempio 3

$$13_{(10)} = 1101_{(2)} \text{ infatti:}$$

13	1	← cifra meno significativa
6	1	
3	0	
1	1	
0	1	← cifra più significativa
0		

↑ ↑
quozienti resti

LSB e MSB

Si tenga presente che il bit meno significativo viene normalmente indicato con la sigla **LSB** (*least significant bit*); analogamente quello più significativo viene indicato con la sigla **MSB** (*most significant bit*).

Esempio 4

$$9_{(10)} = 1001_{(2)} \text{ infatti:}$$

9		
4	1	← LSB
2	0	
1	0	
0	1	← MSB

Metodo delle successive moltiplicazioni per due

Come detto, il metodo appena esposto è valido solo con numeri interi; se il numero è frazionario, si può usare il **metodo delle successive moltiplicazioni per due** che si applica solo ai numeri frazionari con parte intera nulla; se questo non si verifica il numero va scomposto nella sua parte intera e in quella frazionaria.

Il metodo consiste nel moltiplicare per due il numero decimale a parte intera nulla poiché il numero è minore di 1, moltiplicandolo per 2 si ottiene un numero compreso tra 0 e 2 (escluso): la parte intera (0 o 1) rappresenta il bit più significativo del numero binario. Si procede ora a moltiplicare per 2 la parte frazionaria del numero precedentemente ottenuto e si ottiene un numero la cui parte intera rappresenta un altro bit del numero binario, mentre la parte frazionaria viene ancora moltiplicata per 2. Il metodo prosegue fino all'annullamento della parte frazionaria o fino a quando la precisione della conversione risulta sufficiente.

Esempio 5

Si consideri un numero a parte intera nulla:

$0,3125_{(10)} = 0,0101_{(2)}$ infatti:

↓ parte frazionaria	↓ parte intera
$0,3125 \cdot 2 = 0,625$	0 ← MSB
$0,625 \cdot 2 = 1,25$	1
$0,25 \cdot 2 = 0,5$	0
$0,5 \cdot 2 = 1$	1 ← LSB

Il procedimento si è concluso quando la parte frazionaria si è annullata (in questo caso la conversione è esatta).

Esempio 6

$0,15_{(10)} \approx 0,00101_{(2)}$ infatti:

$0,15 \cdot 2 = 0,3$	0 ← MSB
$0,3 \cdot 2 = 0,6$	0
$0,6 \cdot 2 = 1,2$	1
$0,2 \cdot 2 = 0,4$	0
$0,4 \cdot 2 = 0,8$	1 ← LSB

approssimato a 1

Poiché si è posto $0,8 \approx 1$ il risultato è approssimato in eccesso, infatti:

$0,00101_{(2)} = 2^{-3} + 2^{-5} = 0,156_{(10)}$

Se si desidera una migliore approssimazione, si può ulteriormente proseguire nelle moltiplicazioni.

Se il numero frazionario è maggiore di 1, lo si scompone, come già detto, nella sua parte intera e in quella frazionaria.

Esempio 7

$11,25_{(10)} = 1011,01_{(2)}$ infatti:

$11,25_{(10)} = 11_{(10)} + 0,25_{(2)}$ e quindi:

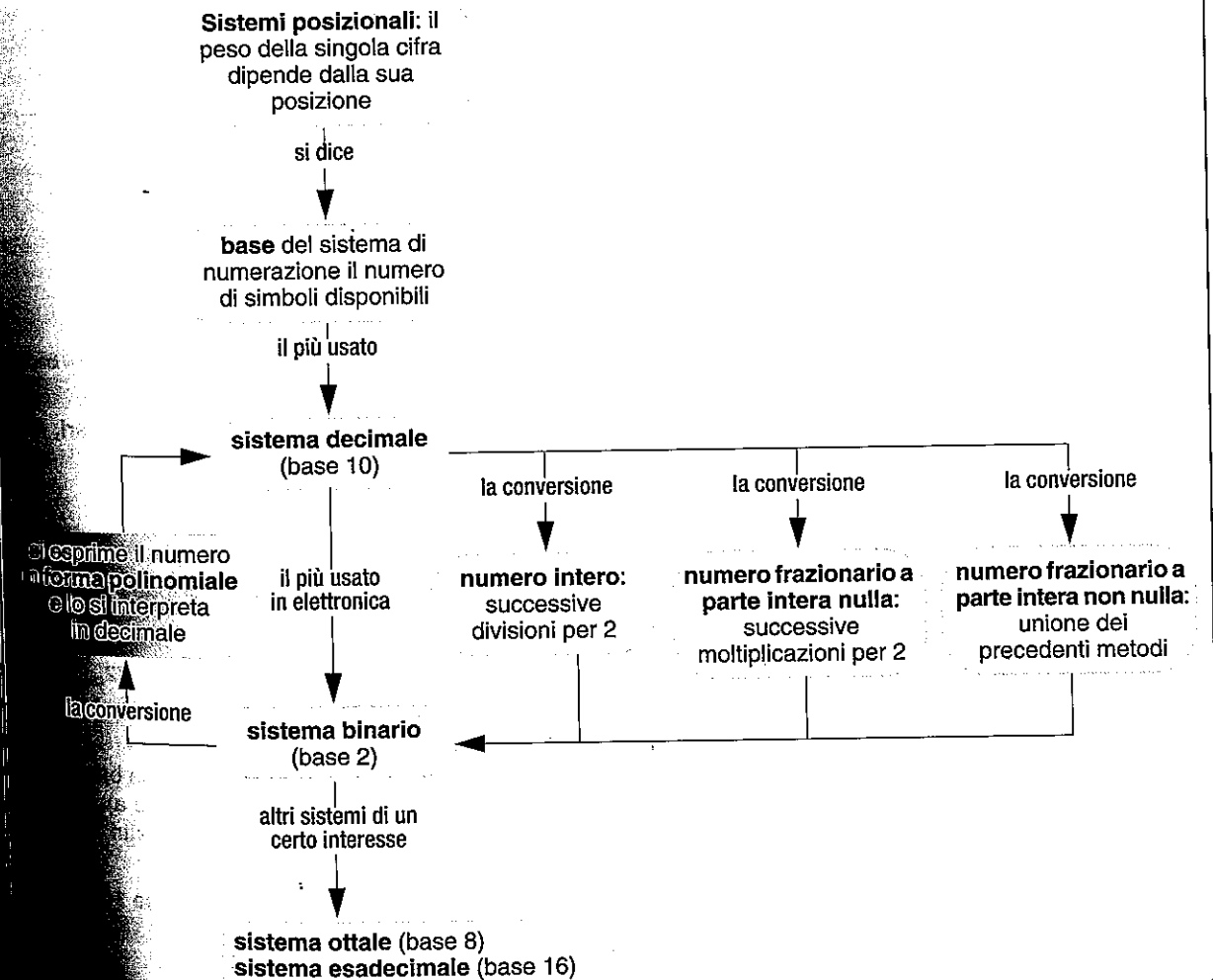
11		
5	1 ← LSB	$0,25 \cdot 2 = 0,5$ ← 0 MSB
2	1	$0,5 \cdot 2 = 1$ ← 1 LSB
1	0	
0	1 ← MSB	

Tabella 1
Tabella di conversione da decimale a binario per i numeri da 0 a 31.

Decimale	Binario	Decimale	Binario
0	0	16	10000
1	01	17	10001
2	10	18	10010
3	11	19	10011
4	100	20	10100
5	101	21	10101
6	110	22	10110
7	111	23	10111
8	1000	24	11000
9	1001	25	11001
10	1010	26	11010
11	1011	27	11011
12	1100	28	11100
13	1101	29	11101
14	1110	30	11110
15	1111	31	11111

Facciamo il punto

Sistemi di numerazione posizionali



Test

- Par. 1 ① Un sistema di numerazione è detto posizionale perché:
 a il peso della singola cifra dipende dalla sua posizione;
 b il peso del singolo numero dipende dalla sua posizione;
 c ogni cifra può assumere solo una determinata posizione;
 d la posizione delle cifre è sempre potenza del 2.
- Par. 1 ② In un sistema di posizionale la base rappresenta il numero di a disposizione.
- Par. 1 ③ La parola byte significa:
 a sinonimo di bit;
 b parola di 8 bit;
 c parola di 4 bit;
 d numero binario.
- Par. 1 ④ Il numero 11,02 può rappresentare:
 a un numero frazionario in base 10;
 b un numero frazionario in base 3;
 c un numero frazionario con base pari o superiore a 3.
- Par. 1 ⑤ Indicare tra le seguenti operazioni, senza effettuare calcoli scritti, quali portano a un risultato pari.
 a $1101 + 1000$
 b $011 - 010$
 c $1100 + 1010$
- Par. 1 ⑥ Se la base è il 5, il massimo numero scrivibile con una cifra è il
- Par. 1 ⑦ Per esprimere il numero 38 in base 2 serve un numero di cifre pari a
- Parr. 1 e 2 ⑧ In italiano e in inglese, a che cosa corrispondono le sigle: bit, LSB e MSB?

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.



Problemi integrativi

- Par. 1 ① Senza effettuare la conversione in decimale dire, dei seguenti numeri binari, quali sono pari e quali sono dispari.
 a 1101; b 10011;
 c 0110; d 011001.
- Soluzione**
 Ricordando la 1, posto $B = 2$, si vede che solo se $LSB = 1$ il numero è dispari.
- Par. 1 ② Quali dei seguenti numeri hanno una base errata?
 a $103_{(2)}$; b $112_{(3)}$; c $815_{(9)}$; d $172_{(8)}$;
 e $159_{(8)}$; f $156_{(10)}$; g $1105_{(4)}$.
- Soluzione**
 Il numero di cifre disponibili in un sistema di numerazione è pari al valore della base; se, ad esempio, la base è 5 le cifre disponibili sono 0, 1, 2, 3, 4. Pertanto nel caso a), poiché la base è il 2, non è possibile la presenza del 3; analogamente si procede negli altri casi (i casi corretti sono b, c, d, f).
- Par. 1 ③ Convertire i seguenti numeri, in base diversa, nei corrispondenti in base 10.
 a $1011_{(2)}$; b $325_{(8)}$; c $235_{(6)}$;
 d $4731_{(8)}$; e $312_{(5)}$.
- Soluzione**
 a) 11; b) $3 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8^1 + 5 \cdot 8^0 = 213$; c) 95; d) 2521; e) 82.

- Par. 1 ④ Convertire in decimale i seguenti numeri binari.
 a 1100;
 b 10110;
 c 0110;
 d 11011,0101;
 e 10111,0101.

Soluzione
 Per risolvere il problema basta ricorrere alla forma polinomiale.
 a) $1100_{(2)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 12_{(10)}$; b) 22;
 c) 6; d) 27,3125; e) 23,3125.

- Par. 2 ⑤ Convertire i seguenti numeri decimali nei corrispondenti binari.
 a 171;
 b 132;
 c 202;
 d 0,75;
 e 12,31;
 f 19,65.

Soluzione
 Per i casi a), b) e c) si usa il metodo delle successive divisioni per 2:
 a) $171_{(10)}$ b) $10000100_{(2)}$ c) $11001010_{(2)}$

85 1 LSB
 42 1
 21 0
 10 1
 5 0
 2 1
 1 0
 0 1 MSB

quindi $171_{(10)} = 10101011_{(2)}$

Per il caso d) si ricorre al metodo delle successive moltiplicazioni per 2:

d) $0,75 \cdot 2 = 1,5$ 1 MSB
 $0,5 \cdot 2 = 1$ 1 LSB quindi $0,75_{(10)} = 0,11_{(2)}$

Nei casi e) ed f) si ricorre a tutti e due i precedenti metodi.

e) $1100,01001111_{(2)}$ (approssimato in difetto); f) $10011,10101_{(2)}$ (approssimato in eccesso).

Problemi da svolgere



Problemi integrativi

- Par. 1 ⑥ Convertire i seguenti numeri in base diversa nei corrispondenti in base 10.
 a $23,51_{(7)}$;
 b $11,08_{(9)}$;
 c $1101_{(2)}$;
 d $152_{(8)}$;
 e $10,11_{(2)}$;
 f $42,47_{(9)}$.
- Par. 2 ⑦ Convertire i seguenti numeri in base 10 nei corrispondenti in base 2.
 a 19;
 b 101;
 c 125;
 d 0,19;
 e 10,5;
 f 13,7.

Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).