

A09

Giovanni Saggio

Elettronica Analogica

Dai dispositivi ai progetti





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it

info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXIX

Gioacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.gioacchinoonoratieditore.it

info@gioacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20

00020 Canterano (RM)

(06) 45551463

ISBN 978-88-255-2754-4

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: settembre 2019

Viviamo in un mondo
che non tollera il minimo errore grammaticale,
ma è indulgente verso la completa ignoranza delle cose scientifiche.
Questa strana disparità è forse per il tumultuoso sviluppo
che la scienza ha avuto in così pochi ultimi decenni?
Fortunatamente, c'è il rovescio della medaglia:
chi conosce la scienza ha potenzialmente le chiavi in mano del successo.

Chi conosce l'elettronica può progettare nuove idee.

PREFAZIONE

Questo libro tratta dei fondamenti della Elettronica Analogica. È la versione corretta, aggiornata ed ampliata di Elettronica Analogica Fondamentale, IV edizione, ed. Universitalia.

Per utilità del lettore, i primi capitoli sono dedicati agli strumenti strettamente necessari ad introdurre l'Elettronica, e che sono relativi alla matematica (capitolo 1), alla fisica (capitolo 2), ed alla chimica (capitolo 3).

Sono descritti ed analizzati i dispositivi basati su conduttori (capitolo 4), mattoni fondamentali con cui costruire i circuiti elettronici.

Attenzione viene dedicata al modo in cui i dispositivi vengono connessi (capitoli 4 e 5) ed a quali leggi e teoremi sono necessari per il progetto e l'analisi di circuiti (capitoli 6 e 7).

Oltre ai dispositivi basati su conduttori, vengono descritti ed analizzati quelli basati sui semiconduttori (capitolo 8), grazie ai quali è nata l'Elettronica moderna.

I dispositivi a semiconduttore sono quindi utilizzati per progettare ed analizzare circuiti elettronici come, raddrizzatori, alimentatori, moltiplicatori, agganciatori, limitatori (capitolo 9).

Il blocco funzionale più importante dell'Elettronica, l'amplificatore, viene descritto ed analizzato nei suoi fondamenti (capitoli 10, 11, 12) ed in alcune sue varianti importanti (capitoli 13 e 14).

Vengono riportate alcune applicazioni elettroniche di interesse (capitolo 15).

La penultima parte del libro è dedicata all'amplificatore operazionale (capitolo 16), blocco funzionale assolutamente fondamentale dell'Elettronica.

Si conclude con un capitolo dedicato ai sensori, interfaccia indispensabile dei circuiti elettronici col mondo esterno (capitolo 17).

Alla fine dei capitoli sono proposti degli esercizi, con relativa soluzione, utili ad approfondire meglio le tematiche trattate.

Di alcuni grafici viene riportato il codice Matlab® in modo che il lettore interessato possa replicarlo sul proprio computer e vedere come tali grafici possano cambiare al variare dei parametri di interesse.

L'intera trattazione dell'Elettronica Analogica è alleggerita da curiosità relative agli argomenti trattati, e divagazioni in altri campi (musica, biologia, fisica, ...).

Sono usate icone che evidenziano argomenti:



di cui è importante la lettura



di cui è consigliata la lettura



che riportano argomenti utili a sapersi



che trattano esempi

con note bibliografiche su scienziati



[con link a video online](#)



e routine scritte in Codice Matlab

Code

Prof. Giovanni Saggio

SOMMARIO

1 	MATEMATICA PER L'ELETTRONICA	19
1.1	<i>Onde e Segnali</i>	19
1.2	<i>Segnali Periodici</i>	20
1.2.1	Onda Sinusoidale	25
1.2.2	Serie di Fourier	30
1.2.3	Onda Triangolare	33
1.2.4	Onda a Dente di Sega	35
1.2.5	Onda Sinusoidale Raddrizzata	36
1.2.6	Onda Quadra	37
1.2.7	Parametri Descrittivi	38
1.3	<i>Segnali Aperiodici</i>	40
1.3.1	Onda Esponenziale	40
1.3.2	Onda Sinusoidale Smorzata	42
1.3.3	Onda Discontinua	42
1.4	<i>Formule Trigonometriche Fondamentali</i>	44
1.4.1	Relazione Pitagorica	44
1.4.2	Addizione e Sottrazione	45
1.4.3	Formule di Werner	46
1.4.4	Formule di Duplicazione	46
1.4.5	Formule di Prostaferesi	46
1.5	<i>Numeri Complessi</i>	47
1.6	<i>Fasori</i>	48
1.7	<i>Trasformata di Laplace</i>	49
1.8	<i>Serie di Taylor</i>	49
1.9	<i>Modulazione</i>	51
1.10	<i>Multipli e Sottomultipli</i>	52
1.11	<i>Esercizi</i>	55
2 	FISICA PER L'ELETTRONICA	57
2.1	<i>Carica Elettrica, Forza, Campo</i>	57
2.2	<i>Lavoro Elettrico, Energia, Potenza</i>	64
2.3	<i>Corrente Elettrica</i>	68
2.4	<i>Tensione Elettrica</i>	72
2.5	<i>Campo Elettrico Uniforme</i>	76
2.6	<i>Mobilità Elettrica</i>	77
2.7	<i>Potenza Elettrica Attiva</i>	78

2.8	<i>Calore e Temperatura</i>	79
2.8.1	Grado Celsius o Centigrado (°C)	79
2.8.2	Grado Fahrenheit (°F)	79
2.8.3	Kelvin (K)	80
2.9	<i>Energia e Potenza di un Segnale</i>	82
2.10	<i>Notazioni Convenzionali</i>	82
2.11	<i>Campo Magnetico</i>	83
2.11.1	Legge di Ampere	84
2.11.2	Proprietà Magnetiche della Materia	86
2.12	<i>Induzione Magnetica</i>	86
2.13	<i>Fenomeni Ondulatori</i>	88
2.13.1	Onde Elettromagnetiche	88
2.13.2	Onde Meccaniche	91
2.14	<i>Esercizi</i>	94
3 	NATURA DELLA MATERIA	97
3.1	<i>Modello Atomico</i>	97
3.1.1	Livelli e sotto livelli energetici, Orbitali	100
3.1.2	Notazione Spettroscopica	102
3.1.3	Regola dell'Ottetto	103
3.2	<i>Reticolo</i>	104
3.3	<i>Dualismo Onda-Particella</i>	106
3.4	<i>Bande di Energia</i>	108
3.5	<i>Conduttori</i>	112
3.6	<i>Isolanti</i>	113
3.7	<i>Semiconduttori</i>	113
3.7.1	Germanio	115
3.7.2	Silicio	115
3.7.3	Arseniuro di Gallio	117
3.7.4	Semiconduttori Organici	117
3.7.5	Altri	117
3.8	<i>Resistenza Elettrica e Effetto Joule</i>	118
3.9	<i>Coefficiente di Temperatura</i>	119
4 	COMPONENTI BASATI SU CONDUTTORI	121
4.1	<i>Definizioni</i>	121
4.2	<i>Connessioni tra Bipoli</i>	123
4.2.1	Serie (Partitore di Tensione)	123
4.2.2	Parallelo (Partitore di Corrente)	124

4.2.3	Ponte	125
4.2.4	Stella e Triangolo	125
4.3	<i>Resistori</i>	125
4.3.1	Resistenza, Resistività, Conduttanza, Conducibilità	125
4.3.2	Identificazione	128
4.3.3	Tipologie	131
4.3.4	Legge di Ohm	133
4.3.5	Potenza e Energia	135
4.4	<i>Connessioni tra Resistori</i>	137
4.4.1	Resistori in Serie (Partitore di Tensione con Resistori)	137
4.4.2	Resistori in Parallelo (Partitore di Corrente con Resistori)	138
4.4.3	Resistori a Ponte	140
4.4.4	Resistori a Stella e Triangolo	140
4.5	<i>Generatori</i>	142
4.5.1	Generatore Ideale di Tensione	142
4.5.2	Generatore Ideale di Corrente	143
4.5.3	Generatori Reali di Tensione e Corrente	144
4.6	<i>Condensatori</i>	146
4.6.1	Capacità	147
4.6.2	Legge del Condensatore	149
4.6.3	Tipologie	152
4.6.4	Identificazione	152
4.6.4.1		152
4.6.4.2	Condensatori Ceramici	153
4.6.4.3	Condensatori in Poliestere	154
4.6.4.4	Condensatori Elettrolitici	155
4.6.4.5	Codice dei Colori	155
4.6.4.6	Condensatori tipo SMD	155
4.6.5	Carica-Scarica, Sfasamento V-I	156
4.7	<i>Connessioni tra Condensatori</i>	158
4.7.1	Condensatori in Serie	158
4.7.2	Condensatori in Parallelo	159
4.8	<i>Energia e Potenza nei Condensatori</i>	160
4.8.1	Energia Immagazzinata	160
4.8.2	Potenza Reattiva	161
4.9	<i>Induttori</i>	162
4.9.1	Induttanza	162
4.9.2	Flusso	163
4.9.3	Induzione Elettromagnetica	164
4.9.4	Legge dell'Induttore (Auto-Induttanza)	166
4.9.5	Tipologie	167
4.10	<i>Connessioni tra Induttori</i>	168
4.10.1	Induttori in Serie	168

4.10.2	Induttori in Parallelo	169
4.11	<i>Energia e Potenza negli Induttori</i>	170
4.11.1	Energia Immagazzinata	170
4.11.2	Potenza Reattiva	170
4.12	<i>Dualità e Differenze Condensatore-Induttore</i>	171
4.13	<i>Tempo Vs Frequenza</i>	172
4.13.1	Reattanza Capacitiva	172
4.13.2	Reattanza Induttiva	173
4.14	<i>Summa di Relazioni tensione-corrente per Componenti</i>	174
5 	RETI DUE-PORTE	175
5.1	<i>Definizioni</i>	175
5.2	<i>Transformatori</i>	177
5.3	<i>Generatori Controllati</i>	179
5.4	<i>Modelli per le Reti Due-Porte</i>	181
5.4.1	Modelli Matematici	181
5.4.2	Modelli Circuitali	183
5.5	<i>Connessioni tra Reti Due-Porte</i>	184
5.5.1	Serie-serie	184
5.5.2	Parallelo-parallelo	185
5.5.3	Serie-Parallelo e Parallelo-Serie	186
5.5.4	Cascata	187
5.6	<i>Esercizi</i>	188
6 	LEGGI E TEOREMI CIRCUITALI	201
6.1	<i>Circuito e suoi Elementi</i>	201
6.2	<i>Circuito Equivalente</i>	203
6.3	<i>Nodo, Ramo, Maglia, Massa, Terra</i>	203
6.4	<i>Tempo-Invarianza e Parametri-Concentrati</i>	204
6.5	<i>Decibel</i>	205
6.6	<i>Kirchhoff</i>	207
6.6.1	Legge di Kirchhoff delle Correnti (KCL)	208
6.6.2	Legge di Kirchhoff delle Tensioni (KVL)	208
6.7	<i>Thévenin</i>	209
6.8	<i>Norton</i>	211
6.9	<i>Sovrapposizione degli Effetti</i>	212
6.10	<i>Miller</i>	213

6.11	<i>Sostituzione</i>	216
6.12	<i>Adattamento di Impedenza</i>	217
6.12.1	Massimo Trasferimento di Potenza	217
6.12.2	Massimo Trasferimento di Tensione e di Corrente	220
6.12.3	Efficienza e Fattore di Smorzamento	221
6.12.4	Reti di Adattamento	222
6.12.5	Accoppiamento in AC e in DC	222
6.13	<i>Chi Decide Cosa</i>	223
6.14	<i>Potenza Complessa</i>	224
6.15	<i>Significato Fisico del Valore Efficace</i>	227
6.16	<i>Esercizi</i>	228
7 	ANALISI CIRCUITALE	235
7.1	<i>Analisi nel Tempo</i>	236
7.1.1	Segnali di Test	236
7.1.2	Ordine del Circuito	240
7.1.3	Risposta Libera e Risposta Forzata	240
7.1.4	Risposta Transitoria e Risposta Permanente	241
7.1.5	Risposta nel Tempo di un Circuito RC	242
7.1.5.1	Sorgente Nulla	244
7.1.5.2	Sorgente Gradino	245
7.1.5.3	Sorgente Rettangolare	248
7.1.5.4	Sorgente Impulsiva	249
7.1.5.5	Sorgente Sinosoidale	250
7.1.5.6	Sorgente Arbitraria	254
7.1.6	Risposta nel Tempo di un Circuito RL	254
7.2	<i>Analisi in Frequenza</i>	255
7.2.1	Filtri Elettronici	256
7.2.2	RC Passa-Basso	257
7.2.2.1	Risposta di Ampiezza	258
7.2.2.2	Risposta di Fase	261
7.2.3	RC Passa-Alto	263
7.2.3.1	Risposta di Ampiezza	263
7.2.3.2	Risposta di Fase	264
7.2.4	LC Passa-Basso Risonante	266
7.2.5	RLC Passa-Banda	267
7.2.6	Filtri Ideali	269
7.2.7	Cause di Sfasamento	271
7.3	<i>Esercizi</i>	273
8 	COMPONENTI BASATI SU SEMICONDUITORI	277
8.1	<i>Drogaggio</i>	277
8.1.1	Silicio di Tipo-N	279

8.1.2	Silicio di Tipo-P	281
8.2	<i>Portatori</i>	282
8.2.1	Elettroni e Lacune	282
8.2.2	Maggioranza e Minoranza	283
8.2.3	Legge di Azione di Massa	285
8.3	<i>Correnti nei Semiconduttori</i>	286
8.3.1	Corrente di deriva	286
8.3.2	Corrente di Diffusione	287
8.3.3	Corrente Totale	290
8.3.4	Corrente di Dispersione	290
8.4	<i>Giunzione P-N</i>	290
8.4.1	Campo Elettrico di Built-In	291
8.4.2	Potenziale di Built-In	293
8.5	<i>Diode</i>	296
8.5.1	Polarizzazione	297
8.5.1.1	Diretta	298
8.5.1.2	Inversa	299
8.5.2	Caratteristica I-V	299
8.5.3	Resistenza	304
8.5.3.1	Statica	305
8.5.3.2	Dinamica	305
8.5.4	Capacità	306
8.5.4.1	Giunzione	306
8.5.4.2	Diffusione	306
8.5.5	Zener	307
8.5.6	LED	309
8.6	<i>BJT</i>	313
8.6.1	Introduzione	313
8.6.2	Modi di Funzionamento	314
8.6.2.1	Attivo	315
8.6.2.2	Interdizione	319
8.6.2.3	Saturazione	319
8.6.3	Modelli	319
8.6.4	Caratteristiche I-V	320
8.6.4.1	Configurazione C.B.	321
8.6.4.2	Configurazione C.E.	323
8.6.4.3	Configurazione C.C.	326
8.7	<i>MOSFET</i>	327
8.7.1	Introduzione	327
8.7.2	Modi Funzionamento	328
8.7.2.1	Ohmico	331
8.7.2.2	Pinch-Off	332
8.7.2.3	Saturazione	332
8.7.3	Caratteristiche I-V	333

8.7.4	Corrente di Dispersione	334
8.7.5	Arricchimento-Svuotamento, Canale n-canale p	336
8.7.6	Floating Gate MOS	337
8.8	<i>BJT versus MOSFET</i>	338
8.9	<i>Identificazione</i>	338
8.9.1	JEDEC	339
8.9.2	Pro Electron	339
8.9.3	JIS	340
8.9.4	Altri	341
8.10	<i>Esercizi</i>	342
9 	CIRCUITI CON DIODI	344
9.1	<i>Raddrizzatori</i>	344
9.1.1	Singola Semionda	344
9.1.2	Singola Semionda con Filtro	345
9.1.2.1	Scelta del Condensatore	347
9.1.2.2	Scelta del Diodo	347
9.1.2.3	Osservazioni sul Contenuto Armonico	349
9.1.3	Doppia semionda di Graetz	350
9.1.4	Doppia Semionda di Graetz con Filtro	351
9.2	<i>Alimentatore</i>	353
9.3	<i>Modellatori</i>	356
9.3.1	Moltiplicatore	356
9.3.2	Agganciato	357
9.3.3	Limitatore	358
9.4	<i>Esercizi</i>	360
10 	AMPLIFICATORI	366
10.1	<i>Definizione e Classificazione</i>	366
10.2	<i>Parametri Fondamentali</i>	368
10.2.1	Guadagno	369
10.2.2	Impedenza	370
10.2.3	Efficienza	372
10.2.4	Classe	372
10.2.5	Stabilità DC	376
10.2.6	Larghezza di Banda	376
10.2.7	Velocità di Risposta	380
10.2.8	Distorsione	380
10.2.9	Rumore	384
10.2.9.1	Tipi	385
10.2.9.2	Misure	387
10.3	<i>Tipi di Amplificatori e Adattamento</i>	389

10.3.1	Amplificatore di Tensione	389
10.3.2	Amplificatore di Corrente	392
10.3.3	Amplificatore di Transresistenza	393
10.3.4	Amplificatore di Transconduttanza	395
10.3.5	Confronto tra i tipi di Amplificatori	398
10.3.6	Amplificatore di Potenza	398
10.4	<i>Effetto di Carico e Pilotaggio</i>	399
10.5	<i>Analisi dell'Amplificatore</i>	401
10.6	<i>Esercizi</i>	402
11 	AMPLIFICATORI: CON BJT	404
11.1	<i>Notazioni Convenzionali</i>	404
11.2	<i>Primo Progetto Passo-per-Passo</i>	404
11.2.1	Resistore di Polarizzazione	404
11.2.2	Sorgente AC e Carico	405
11.2.3	Condensatori di Blocco DC	406
11.2.4	Resistore di Svincolo AC	407
11.3	<i>DC versus AC</i>	408
11.4	<i>Analisi DC</i>	409
11.4.1	Polarizzazione Fissa	409
11.4.2	Retta di Carico Statica	411
11.4.3	Stabilità della Polarizzazione	412
11.4.4	Polarizzazione Fissa con Stabilizzazione Termica	414
11.4.5	Polarizzazione a Retroazione di Collettore	416
11.4.6	Polarizzazione Automatica	418
11.4.7	Polarizzazione a doppia batteria	423
11.5	<i>Analisi AC</i>	424
11.5.1	BJT come Rete 2-Porte	424
11.5.2	Modello a Piccolo Segnale	424
11.5.2.1	Significato Matematico dei Parametri Ibridi	425
11.5.2.2	Significato Fisico dei Parametri Ibridi	426
11.5.3	Modello a Piccolo Segnale in Alta Frequenza	431
11.5.4	Guadagni in Corrente DC e AC	432
11.5.5	Valori Tipici di Parametri-H	433
11.5.6	Conversioni tra Parametri-H	436
11.6	<i>Amplificatore CE</i>	437
11.6.1	CE: Retta di Carico Dinamica	439
11.6.2	CE: Resistenza di Ingresso	442
11.6.3	CE: Guadagno in Corrente	443
11.6.4	CE: Guadagno in Tensione	445
11.6.5	CE: Resistenza di Uscita	447
11.6.6	CE: Riduzione per modello semplificato	448

11.7	<i>Amplificatore CE con Degenerazione</i>	449
11.7.1	CE con Degenerazione: Guadagno in Corrente	450
11.7.2	CE con Degenerazione: Resistenza di Ingresso	450
11.7.3	CE con Degenerazione: Guadagno in Tensione	452
11.7.4	CE con Degenerazione: Resistenza di uscita	453
11.7.5	CE con Degenerazione: Riduzione per modello semplificato	454
11.8	<i>Amplificatore CC (Inseguitore di Emittitore)</i>	454
11.8.1	CC, Parametri-h CE: Guadagno in Corrente	457
11.8.2	CC, Parametri-h CE: Resistenza di Ingresso	458
11.8.3	CC, Parametri-h CE: Guadagno in Tensione	458
11.8.4	CC, Parametri-h CE: Resistenza di Uscita	460
11.8.5	CC, Parametri-h CE: Riduzione per Modello Semplificato	460
11.8.6	CC, Parametri-h CC: Resistenza di Ingresso	461
11.8.1	CC, Parametri-h CC: Guadagno in Corrente	461
11.8.2	CC, Parametri-h CC: Guadagno in Tensione	463
11.8.3	CC, Parametri-h CC: Resistenza di Uscita	463
11.9	<i>Amplificatore CB</i>	464
11.9.1	CB: Resistenza di Ingresso	466
11.9.2	CB: Guadagno in Corrente	467
11.9.3	CB: Guadagno in Tensione	469
11.9.4	CB: Resistenza di Uscita	470
11.10	<i>Confronto CE, CC, CB</i>	471
11.11	<i>Modello a Parametri Ibridi Semplificato</i>	472
11.12	<i>Esercizi</i>	474
12 	AMPLIFICATORI: CON MOSFET	484
12.1	<i>MOSFET PER AMPLIFICARE</i>	484
12.1.1	Analisi DC	486
12.1.1.1	Retroazione di Drain	487
12.1.1.2	Partitore di Tensione	487
12.1.2	Modello a Piccoli Segnali	488
12.2	<i>AMPLIFICATORE CS</i>	488
12.2.1	Analisi DC	489
12.2.2	Analisi AC	491
12.2.2.1	CS: Resistenza di Ingresso	492
12.2.2.2	CS: Resistenza di Uscita	492
12.2.2.3	CS: Guadagno in Tensione	493
12.3	<i>AMPLIFICATORE CD (INSEGUITORE DI SOURCE)</i>	494
12.3.1	Analisi DC	494
12.3.2	Analisi AC	495
12.3.2.1	CD: Resistenza di Ingresso	495
12.3.2.2	CD: Resistenza di Uscita	496
12.3.2.3	CD: Guadagno in Tensione	497

12.4	<i>AMPLIFICATORE CG</i>	498
12.4.1	Analisi DC	499
12.4.2	Analisi AC	499
12.4.2.1	CG: Resistenza di Ingresso	500
12.4.2.2	CG: Resistenza di Uscita	500
12.4.2.3	CG: Guadagni di Tensione e Corrente	501
12.5	<i>CONFRONTO CS, CD, CG</i>	502
12.6	<i>STABILITÀ DC</i>	502
12.7	<i>MOSFET COME INTERRUTTORE</i>	503
12.8	<i>ESERCIZI</i>	505
13 	AMPLIFICATORI: MIGLIORAMENTI	508
13.1	<i>Introduzione</i>	508
13.2	<i>Resistenza di Ingresso Aumentata</i>	508
13.2.1	Darlington	509
13.2.2	Polarizzazione in Corrente	512
13.2.3	Boostrap	514
13.3	<i>Accoppiamento a Trasformatore</i>	516
13.4	<i>Cascode</i>	518
13.5	<i>Amplificatore Differenziale</i>	519
13.5.1	Introduzione	519
13.5.2	Teoria	520
13.5.3	Realizzazione Circuitale	522
14 	AMPLIFICATORI: STADI IN CASCATA	526
14.1	<i>Accoppiamento</i>	527
14.1.1	RC, LC	528
14.1.2	A Trasformatore	529
14.1.3	Ad Impedenza	530
14.1.4	Diretto	530
14.2	<i>Analisi DC</i>	531
14.2.1	Multistadio Accoppiamento AC	531
14.2.2	Multistadio Accoppiamento DC	532
14.3	<i>Analisi AC</i>	532
14.3.1	Stadi Uni-laterali	533
14.3.2	Stadi Bi-Direzionali	533
14.4	<i>Doppio Stadio CE-CE</i>	534
14.4.1	Resistenza di Ingresso	535
14.4.2	Guadagno in Corrente	535
14.4.3	Guadagno in Tensione	536
14.4.4	Resistenza di Uscita	537

14.5	<i>Doppio Stadio CE-CC</i>	537
14.5.1	Analisi DC	538
14.5.2	Analisi AC	539
14.6	<i>Doppio-Stadio CC-CE</i>	541
14.7	<i>Doppio-Stadio CS-CE</i>	543
14.7.1	Resistenze di Ingresso e Uscita	543
14.7.2	Guadagno in Tensione	543
14.8	<i>Larghezza di Banda</i>	544
14.9	<i>Esercizi</i>	545
15 	ALCUNE APPLICAZIONI	548
15.1	<i>Amplificatore Audio</i>	548
15.1.1	Adattamento di impedenza	550
15.1.2	Impedenza dell'altoparlante	550
15.2	<i>Radio FM</i>	550
15.2.1	Trasmittitore	551
15.2.2	Ricevitore	552
15.3	<i>Carica Batteria</i>	553
15.3.1	Tramite porta USB	554
15.3.2	Tramite Rete Elettrica	554
15.4	<i>Pacemaker</i>	555
15.5	<i>Indicatori, Attivatori, Timer, Generatori</i>	557
15.5.1	Indicatore di Livello	558
15.5.2	Indicatore di Carica Batteria	558
15.5.3	Timer	559
15.5.4	Generatore Ciclico di Beep	559
16 	AMPLIFICATORI OPERAZIONALI	560
16.1	<i>Modello Equivalente</i>	564
16.2	<i>Caratteristiche Ideali</i>	567
16.3	<i>Retroazione</i>	568
16.4	<i>Convertitore I-V</i>	570
16.5	<i>Convertitore V-I</i>	571
16.6	<i>Configurazione Invertente</i>	572
16.7	<i>Configurazione Non-Invertente</i>	576
16.8	<i>Convertitore di Impedenza</i>	577
16.9	<i>Configurazione Differenziale</i>	577
16.10	<i>Inseguitore di Tensione</i>	579

16.11	<i>Filtri Attivi</i>	579
17 	SENSORI	582
17.1	<i>Definizioni e Proprietà</i>	582
17.1.1	Sensore, passivo e attivo	582
17.1.2	Funzione di trasferimento	585
17.1.3	Sensibilità	586
17.1.1	Ripetibilità, Riproducibilità	586
17.1.2	Accuratezza e Precisione	587
17.1.1	Calibrazione	588
17.1.2	Intervalli di Misura, di Frequenze	588
17.1.3	Risoluzione	589
17.1.4	Tempo di risposta	589
17.1.5	Saturazione, Fondo scala	589
17.1.6	Affidabilità	590
17.1.7	Stabilità	590
17.2	<i>Temperatura</i>	591
17.2.1	Termistore	591
17.2.2	Termocoppia	592
17.3	<i>Luce</i>	595
17.3.1	LDR	595
17.3.2	Fotodiodo	597
17.4	<i>Forza, Deformazione</i>	598
17.4.1	Sensore resistivo di flessione	598
17.4.2	Estensimetro	599
17.5	<i>Cinematica</i>	599
17.5.1	Accelerometro	600
17.5.2	Giroscopio	602
17.6	<i>Circuiti per Sensori</i>	603
17.6.1	Partitore di tensione	603
17.6.1.1	Linearità	604
17.6.1.2	Intervallo	605
17.6.1.3	Sensibilità	607
17.6.2	Ponte di Wheatstone	608
17.6.2.1	Linearità	609
17.6.2.2	Sensibilità	609
17.6.3	Amplificatori	610

