

Acustica

Fondamenti e applicazioni

a cura di
Renato Spagnolo





www.utetuniversita.it

Proprietà letteraria riservata
© 2015 De Agostini Scuola SpA – Novara
1ª edizione: marzo 2015
Printed in Italy

Tutti i diritti riservati. Nessuna parte del materiale protetto da questo copyright potrà essere riprodotta in alcuna forma senza l'autorizzazione scritta dell'Editore.

Fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, comma 4, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni ad uso differente da quello personale potranno avvenire, per un numero di pagine non superiore al 15% del presente volume/fascicolo, solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali, Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano – e-mail: autorizzazioni@clearedi.org.

Stampa: Grafiche Battaia – Zibido San Giacomo (MI)

Ristampe:	0 1	2 3	4 5	6 7	8 9
Anno:	2015	2016	2017	2018	2019

INDICE

Gli Autori	XXI
Introduzione	XXV
Capitolo 1 Una breve introduzione storica	
<i>Adriano Alippi, Renato Spagnolo</i>	
1.1 Alle origini	3
1.2 I metodi della scienza moderna	5
1.3 L'acustica e gli scienziati dei secoli XVIII - XIX	9
1.3.1 D'Alembert, Eulero, Lagrange e Chladni: vibrazioni in mezzi elastici	9
1.3.2 Helmholtz, Weber, Fechner e la percezione uditiva	11
1.3.3 Daniel Colladon e la misura della velocità del suono nell'acqua	13
1.3.4 Un divulgatore dell'Ottocento: John Tyndall	13
1.3.5 Lord Rayleigh: verso l'acustica del Novecento	15
1.4 Gli straordinari progressi del secolo XX	17
1.4.1 L'apporto dell'elettronica	17
1.4.2 Linee di sviluppo nei temi del suono udibile	17
1.4.3 L'acustica fisica	22
Bibliografia	27
Capitolo 2 Acustica generale lineare	
<i>Giuliana Benedetto, Roberto M. Gavioso, Alberto Giuliano Albo, Renato Spagnolo</i>	
2.1 Onde acustiche in mezzi elastici continui	31
2.2 Equazione di propagazione delle onde acustiche nei fluidi ideali	35
2.2.1 Equazione di Eulero	36
2.2.2 Equazione di continuità	38
2.2.3 Equilibrio termodinamico: l'equazione di stato	39
2.2.4 Equazione lineare delle onde	40
2.3 Velocità di propagazione delle onde acustiche	42
2.3.1 Velocità nei gas	42
2.3.2 Velocità nei liquidi	44
2.3.3 Velocità nei solidi elastici	45

2.4	Onde piane, sferiche e cilindriche nei fluidi	48
2.4.1	Onde piane	48
2.4.2	Onde sferiche	53
2.4.3	Onde cilindriche	55
2.5	Impedenza acustica caratteristica e impedenza acustica specifica	56
2.6	Grandezze acustiche fondamentali e unità di misura	59
2.6.1	Densità di energia acustica	59
2.6.2	Intensità acustica	61
2.6.3	Potenza acustica di una sorgente	62
2.7	Riflessione, trasmissione e diffrazione delle onde	63
2.7.1	Riflessione, trasmissione e rifrazione	64
2.7.2	Trasmissione attraverso uno strato fluido di dimensioni finite	70
2.7.3	Diffrazione delle onde	72
2.8	Sovrapposizione degli effetti: battimenti, onde stazionarie . .	75
2.8.1	Il fenomeno dei battimenti	76
2.8.2	Onde stazionarie	78
2.9	Effetti dissipativi: assorbimento del suono nei fluidi	80
2.9.1	Dissipazione per effetti viscosi e per effetti termici	83
2.9.2	Processi di rilassamento termico	84
2.9.3	Rilassamento traslazionale	90
2.9.4	Assorbimento e dispersione in miscele	92
2.10	Onde elastiche nei solidi	93
2.10.1	Il tensore di deformazione	94
2.10.2	Il tensore degli sforzi	95
2.10.3	Legge di Hooke generalizzata e il potenziale elastico	96
2.10.4	Parametri elastici di solidi isotropi e omogenei: modulo di Young e coefficiente di Poisson	98
2.10.5	Onde elastiche in mezzi solidi isotropi di estensione infinita	100
2.10.6	Onde di superficie	102
2.10.7	Superfici di separazione e conversione dei modi	103
2.11	Grandezze in scala logaritmica, decibel e livelli sonori	103
2.12	Sorgenti acustiche	110
2.12.1	Sorgenti monopolo e dipolo	110
2.12.2	Sorgenti lineari	114
2.12.3	Il pistone piano circolare	115
2.12.4	Fattore di direttività e indice di direttività	116
2.12.5	Indice di direttività e livelli di pressione e di potenza sonora	117
2.13	L'effetto Doppler	120
2.14	Composizione in frequenza	123
2.14.1	Scomposizione di suoni periodici in serie di Fourier	123
2.14.2	La trasformata di Fourier	126

Bibliografia	129
Capitolo 3 Acustica non lineare	
<i>Adriano Alippi, Lucilla Di Marcoberardino</i>	
3.1 Introduzione	133
3.2 L'oscillatore armonico	135
3.3 L'oscillatore non lineare	137
3.3.1 Le frequenze armoniche dell'oscillatore non lineare	139
3.3.2 Generazione di frequenze armoniche: il metodo del bilancio armonico	143
3.3.3 Generazione di frequenze subarmoniche	144
3.3.4 Comportamento caotico dell'oscillatore	147
3.4 Le non linearità in acustica	153
3.4.1 Equazioni di stato dei mezzi materiali: aeriformi, liquidi, solidi	155
3.4.2 L'equazione non lineare della propagazione	157
3.4.3 Generazione di onde armoniche	157
3.4.4 Il mescolamento di frequenze	163
3.5 Onde stazionarie in strutture di dimensioni finite	165
3.5.1 Generazione di armoniche	166
3.5.2 Generazione di subarmoniche e comportamento caotico	167
3.6 Effetti di non linearità: pressione di radiazione e streaming	170
3.6.1 Pressione di radiazione	170
3.6.2 Lo streaming acustico	171
3.7 Due esempi applicativi: array parametrici e SONAR multi-frequenza	172
3.7.1 Array parametrici	173
3.7.2 SONAR multi-frequenza	176
Bibliografia	177
Capitolo 4 Propagazione del suono in atmosfera e infrasuoni	
<i>Giuliana Benedetto, Renato Spagnolo</i>	
4.1 Propagazione del suono all'esterno su grandi distanze	179
4.2 Assorbimento in atmosfera	180
4.3 Effetto del suolo	182
4.4 Gradienti di temperatura e di velocità del vento	185
4.5 Presenza di barriere	188
4.6 Attenuazione attraverso la vegetazione	189
4.7 Calcolo dell'attenuazione secondo la norma UNI ISO 9613	189
4.8 Gli infrasuoni e le loro proprietà specifiche	192
4.9 Sorgenti naturali e artificiali di infrasuoni	194
4.10 Canali di propagazione	199
4.11 Trasduttori per infrasuoni	201
4.12 Effetti degli infrasuoni sull'uomo	203

Bibliografia	205
Capitolo 5 Acustica subacquea	
<i>Silvano Buogo, Lucilla Di Marcoberardino</i>	
5.1 Campi applicativi dell'acustica subacquea	207
5.2 Velocità del suono nel mare	210
5.3 Propagazione del suono nel mare	214
5.3.1 Riflessione dalla superficie libera	218
5.3.2 Riflessione dal fondale	219
5.3.3 Diffusione (scattering)	220
5.4 Modelli di propagazione	221
5.5 Assorbimento e attenuazione	224
5.6 Rumore nell'ambiente marino	228
5.7 Equazioni SONAR	230
5.8 Trasduttori per l'acustica subacquea	233
5.8.1 Schiere di trasduttori (Array)	237
5.8.2 Taratura di idrofoni	238
5.8.3 Riepilogo delle caratteristiche dei trasduttori	239
5.9 Sistemi SONAR	240
5.9.1 Sonar monofascio	240
5.9.2 Sonar a scansione laterale	243
5.9.3 Sonar multifascio	245
5.10 Sistemi di comunicazione subacquea	246
5.11 Sistemi di monitoraggio e di navigazione	247
5.12 Sistemi acustici per la sismica offshore	249
5.13 Effetti del rumore subacqueo sulle specie marine	251
Bibliografia	253
Capitolo 6 Ultrasuoni: principi e applicazioni	
<i>Rugiada Cuccaro, Caterina Guiot, Renato Spagnolo</i>	
6.1 Introduzione agli ultrasuoni	255
6.2 Interazione degli ultrasuoni con i mezzi materiali	257
6.2.1 Assorbimento per effetti dissipativi	259
6.2.2 Scattering	260
6.2.3 Attenuazione	266
6.2.4 Generazione di calore per assorbimento	270
6.3 Struttura del campo acustico a ultrasuoni	272
6.3.1 Sorgenti piane circolari	273
6.3.2 Campi focalizzati	281
6.4 Meccanismi di trasduzione e trasduttori	285
6.4.1 I principali meccanismi di trasduzione	287
6.4.2 Effetto piezoelettrico e materiali piezoelettrici	289
6.4.3 Realizzazione di un trasduttore piezoelettrico elementare	292
6.4.4 Trasduttori a schiera	297

6.5	Effetti di propagazione non lineare	300
6.5.1	Fenomeno della saturazione acustica	301
6.5.2	Altri effetti di non linearità	303
6.6	Effetti biologici degli ultrasuoni	304
6.7	Principali applicazioni in campo medico	307
6.7.1	Applicazioni diagnostiche	308
6.7.2	Applicazioni terapeutiche	310
6.8	Applicazioni in campo industriale	314
6.8.1	Applicazioni macrosoniche	314
6.8.2	Applicazioni a bassa intensità	320
	Bibliografia	324

Capitolo 7 Onde superficiali nei solidi e dispositivi micro-acustici

Enrico Verona

7.1	Mezzi anisotropi, mezzi piezoelettrici	331
7.1.1	Relazioni costitutive dei mezzi piezoelettrici	331
7.1.2	Onde elastiche in mezzi anisotropi e piezoelettrici	333
7.2	Onde superficiali	335
7.2.1	Mezzi semi-infiniti	335
7.2.2	Piastre, modi di Lamb e modi di Love	339
7.2.3	Mezzi stratificati	341
7.3	Trasduttori di onde superficiali	344
7.3.1	Il trasduttore interdigitale	347
7.4	Dispositivi elettroacustici a onde superficiali	353
7.4.1	Linee di ritardo	354
7.4.2	Risonatori	355
7.4.3	Filtri passa-banda	357
7.4.4	Filtri a codice di fase	359
7.4.5	Sorgenti stabili di frequenza	361
7.4.6	Dispositivi non lineari: convolutori	362
7.5	Sensori a onde acustiche superficiali	363
7.5.1	Sensori di grandezze chimiche, biochimiche e biologiche	364
7.5.2	Sensori di grandezze fisiche	366
7.5.3	«Smart tags» e sensori «wireless»	369
	Bibliografia	370

Capitolo 8 Cavitazione acustica e sonochimica

Daniele Madonna Ripa, Adriano Troia

8.1	Pressioni negative e cavitazione	373
8.1.1	Pressioni negative	374
8.1.2	Cavitazione	378
8.2	Cavitazione acustica: interazione suono-bolle	381
8.3	Effetti fisici	392
8.3.1	Emissioni acustiche	393

8.3.2	Sonoluminescenza	396
8.4	Sonochimica	404
8.4.1	Effetti della cavitazione acustica nelle reazioni chimiche	405
8.4.2	Applicazioni sonochimiche per la sintesi di materiali	412
8.4.3	Applicazioni in campo ambientale: dalla degradazione di inquinanti allo scale-up	415
8.4.4	Applicazioni in chimica organica: il sonochemical switch	416
	Bibliografia	417
Capitolo 9 Termoacustica		
<i>Adriano Alippi, Chiara Alippi, Annunziata D'Orazio</i>		
9.1	Introduzione	421
9.2	Le basi storiche dello sviluppo della termoacustica	422
9.3	I dispositivi a onde acustiche	425
9.3.1	Il dispositivo a onda stazionaria	426
9.3.2	Il refrigeratore di Stirling	431
9.3.3	Il dispositivo a onda progressiva	433
9.4	Risultati e applicazioni dei refrigeratori termoacustici	437
	Bibliografia	439
Capitolo 10 Velocità del suono e proprietà termodinamiche dei fluidi		
<i>Roberto M. Gavioso, Alberto Giuliano Albo, Simona Lago</i>		
10.1	Introduzione	441
10.2	Relazioni termodinamiche fondamentali	443
10.3	Determinazione acustica di proprietà termodinamiche in fase gassosa	447
10.3.1	Equazione di stato viriale	447
10.3.2	Determinazione della densità dei gas da misure di ve- locità del suono utilizzando potenziali intermolecolari semplificati	452
10.3.3	Equazioni di stato empiriche per la fase gassosa	457
10.3.4	Metodi di misura della velocità del suono nei gas	459
10.4	Determinazione acustica di proprietà termodinamiche in fase liquida	471
10.4.1	Metodi di integrazione numerica dell'equazione di stato	472
10.4.2	Metodi di misura della velocità del suono nei liquidi	476
10.4.3	Applicazioni	485
	Bibliografia	486
Capitolo 11 Termometria acustica		
<i>Roberto M. Gavioso</i>		
11.1	Introduzione	491
11.2	Termometria acustica primaria	493
11.3	Applicazioni della termometria acustica	500

Bibliografia	511
Capitolo 12 Fotoacustica	
<i>Andrea Bettucci</i>	
12.1 Introduzione	513
12.2 Fotoacustica: una storia recente	514
12.2.1 Primi studi sperimentali e teorici sull'effetto fotoacustico	515
12.2.2 1938: la rinascita della fotoacustica	515
12.2.3 La moderna fotoacustica e le sue principali applicazioni	516
12.3 Principi generali della fotoacustica	517
12.3.1 Effetti fototermici	521
12.4 Generazione di onde elastiche per effetto fototermico	522
12.4.1 Generazione fotoacustica diretta prodotta da un fascio laser di piccolo raggio	524
12.4.2 Generazione fotoacustica diretta prodotta da un fascio laser di grande raggio	525
12.4.3 Generazione fotoacustica indiretta	527
12.5 Impiego della fotoacustica per la realizzazione di immagini in campo biomedico	529
Bibliografia	533
Capitolo 13 Trasduttori, strumenti, tecniche di misurazione	
<i>Alberto Armani, Massimo Garai</i>	
13.1 Trasduttori di segnali acustici: microfoni	535
13.1.1 Il microfono a condensatore	536
13.1.2 Risposta in frequenza e range dinamico	538
13.1.3 Microfoni a pressione	541
13.1.4 Microfoni per campo libero	542
13.1.5 Microfoni per campo diffuso	542
13.1.6 Microfoni prepolarizzati	543
13.1.7 Preamplificatori microfonici	543
13.1.8 Rumore di microfono e preamplificatore	545
13.2 Calibratori acustici	546
13.2.1 Il pistonofono	546
13.3 Taratura dei microfoni campione	548
13.3.1 Il metodo primario della reciprocità	548
13.3.2 Accoppiamento in pressione	549
13.4 Trasduttori per vibrazioni	550
13.4.1 Accelerometro piezoelettrico	550
13.4.2 Accelerometro con elettronica integrata	552
13.4.3 Sensibilità e linearità della risposta in frequenza	553
13.4.4 Accelerometri MEMS	555
13.5 Calibratori per trasduttori di vibrazioni e verifiche periodiche degli strumenti	556

13.6	Misuratori di livello sonoro: Fonometri	557
13.6.1	Le norme di riferimento	557
13.6.2	Dal fonometro analogico a quello digitale	558
13.6.3	Conversione A/D	560
13.6.4	I processi di analisi	560
13.6.5	Time history: profilo storico dei livelli sonori	561
13.6.6	Identificazione degli eventi sonori	562
13.6.7	Analisi in frequenza per bande di ottava e di 1/3 di ottava	563
13.6.8	La misura del tempo di riverberazione	564
13.6.9	Analisi statistica dei livelli sonori	565
13.6.10	Registrazione audio	567
13.6.11	La memoria dati	568
13.6.12	Interfaccia con PC	569
13.7	Misuratori di esposizione alle vibrazioni	570
13.7.1	Strumenti di misura a tre canali	570
13.8	Sistemi di monitoraggio del rumore	571
13.8.1	Le funzioni dei sistemi di monitoraggio	573
13.9	Analizzatori multicanale	575
13.9.1	Cenni storici	575
13.9.2	Gli attuali sistemi di misura multicanale	576
13.9.3	L'analisi FFT	577
13.9.4	Finestre temporali e overlap	579
13.9.5	Media lineare e media esponenziale	580
13.9.6	Analisi per bande di ottava e di frazioni di ottava	582
13.9.7	Cross-spettro, funzione di trasferimento, funzione di coerenza	583
13.9.8	Multi-analisi	584
13.9.9	Analisi tempo-frequenza	586
13.9.10	Analisi degli ordini armonici	587
13.10	Incertezza di misura	589
13.10.1	Generalità	589
13.10.2	Metodologia basata sugli errori di misura	590
13.10.3	Metodologia basata sull'incertezza	591
13.10.4	Incertezze di categoria A e B	592
13.10.5	Approccio analitico. Modello della misurazione	593
13.10.6	Valutazione dell'incertezza di categoria A	593
13.10.7	Valutazione dell'incertezza di categoria B	594
13.10.8	Determinazione dell'incertezza tipo composta	594
13.10.9	Determinazione dell'incertezza estesa	595
13.10.10	Incertezza strumentale	597
13.10.11	Incertezza delle misurazioni in ambiente esterno	598
13.10.12	Approccio sperimentale. Prove inter-laboratorio	600
13.10.13	Incertezza delle misurazioni di acustica edilizia	600

13.10.14	Incertezza delle misurazioni di tempo di riverberazione	603
13.10.15	Incertezza delle misurazioni di esposizione a rumore	604
	Bibliografia	606
Capitolo 14 Principi di analisi numerica dei segnali		
<i>Angelo Farina</i>		
14.1	Dai segnali analogici ai segnali digitali	609
14.2	Tecniche di filtraggio applicate a segnali audio digitali	613
14.3	Dai segnali campionati ai livelli sonori in decibel	616
14.4	La trasformata veloce di Fourier (FFT)	623
14.5	Tecniche di analisi spettrale mediante filtri digitali IIR	632
14.6	Misura della risposta all'impulso di un sistema elettroacustico. Le tecniche MLS e ESS	638
14.6.1	I segnali MLS	639
14.6.2	Segnali sine sweep	641
14.7	Calcolo numerico di alcuni parametri acustici	645
14.7.1	Ricostruzione del decadimento sonoro a partire dalla risposta all'impulso	646
14.7.2	Calcolo dei parametri descrittivi della qualità acustica di ambienti	650
14.8	Esempio di misurazione: lo Speech Transmission Index (STI)	652
	Bibliografia	660
Capitolo 15 L'intensità acustica e la sua misura		
<i>Eleonora Carletti</i>		
15.1	Energia acustica e intensità	663
15.2	Misura dell'intensità acustica	669
15.2.1	Il metodo di misura $p-p$	669
15.2.2	Il metodo di misura $p-u$	671
15.3	Errori nella misura di intensità	673
15.3.1	Errori associati al metodo di misura $p-p$	673
15.3.2	Errori associati al metodo di misura $p-u$	676
15.4	Determinazione della potenza sonora	679
15.4.1	La norma di riferimento	680
15.5	Altri campi applicativi	682
	Bibliografia	689
Capitolo 16 Funzione uditiva, psicoacustica, effetti del rumore sull'uomo		
<i>Giuliana Benedetto, Arturo Moletti, Renata Sisto</i>		
16.1	Alcune considerazioni preliminari	693
16.2	Anatomia e fisiologia dell'apparato uditivo	694
16.2.1	Sensibilità, dinamica e risoluzione in frequenza	694
16.2.2	Orecchio esterno	695
16.2.3	Orecchio medio	695

	16.2.4	Orecchio interno - Coclea	697
	16.2.5	Dalla vibrazione della membrana basilare alla percezione uditiva	704
16.3		La risposta soggettiva	705
	16.3.1	Caratteristiche generali della percezione uditiva	705
	16.3.2	Soglia uditiva	707
	16.3.3	La sensazione sonora	708
	16.3.4	Curve di ponderazione in frequenza per la misura della pressione sonora	714
	16.3.5	Elaborazione soggettiva delle caratteristiche temporali del suono	714
	16.3.6	Riflesso aurale	718
	16.3.7	Analisi in frequenza e mascheramento	719
	16.3.8	Percezione del tono	723
	16.3.9	Percezione del timbro	725
	16.3.10	La localizzazione dei suoni	725
16.4		Tecniche diagnostiche della funzione uditiva	727
	16.4.1	Cenni alle principali patologie della funzione uditiva	728
	16.4.2	Tecniche diagnostiche soggettive	729
	16.4.3	Audiometria	730
	16.4.4	Tecniche diagnostiche obiettive	734
	16.4.5	Impedenziometria, timpanometria, misura del riflesso stapediale	734
	16.4.6	Tecniche elettrofisiologiche	735
	16.4.7	Emissioni otoacustiche	737
	16.4.8	Uso di stimoli complessi. Stimolazione controlaterale	740
16.5		Alterazioni della funzione uditiva, agenti ototossici	741
	16.5.1	Presbiacusia e Socioacusia	741
	16.5.2	Effetti dell'esposizione a rumore	741
	16.5.3	Effetti dell'esposizione ad altri agenti ototossici	749
	16.5.4	Principali riferimenti normativi	750
		Bibliografia	750

Capitolo 17 La voce

Andrea Paoloni

17.1		Premessa: Cos'è la voce? Cos'è la qualità della voce?	755
	17.1.1	Qualità della voce	757
	17.1.2	Origine delle variazioni della voce	760
17.2		La fonetica	761
	17.2.1	Il segnale vocale	762
	17.2.2	Generazione del linguaggio articolato	763
	17.2.3	Luogo e modo di articolazione	766
	17.2.4	Le vocali	768
	17.2.5	Le consonanti	772

17.2.6	La coarticolazione	777
17.3	La voce cantata	778
17.3.1	L'organizzazione ritmica	782
17.3.2	I registri vocali	783
17.3.3	Intensità	784
17.3.4	Il vibrato	784
17.3.5	Differenza tra parlato e canto	786
17.4	Voce: fondamenti neurolinguistici	786
17.4.1	Elettroencefalografia negli studi di neurolinguistica	790
17.4.2	Potenziali evento-correlati (ERP) nello studio della lingua	791
17.4.3	I risultati più recenti	792
17.5	Caratterizzazione del parlante (voice profiling)	793
17.5.1	Identificazione di genere	794
17.5.2	Stima delle caratteristiche fisiche (altezza, peso)	795
17.5.3	Identificazione dell'età	795
17.5.4	Variabili diastratiche e diatopiche: lo status sociolinguistico del parlante	798
17.5.5	Fattori extralinguistici alteranti la voce	799
17.5.6	In conclusione	799
	Bibliografia	800

Capitolo 18 Bioacustica e ecologia acustica

Gianni Pavan

18.1	Premessa	803
18.2	Cenni storici	804
18.3	La bioacustica	805
18.4	Il paesaggio sonoro	808
18.5	Ecologia acustica	810
18.6	Ecolocalizzazione	811
18.7	Bioacustica subacquea	812
18.8	Metodi e strumenti per la registrazione e l'analisi dei suoni	815
18.9	Impatto del rumore sull'ambiente terrestre	819
18.10	Impatto del rumore sull'ambiente marino	820
	Bibliografia	824

Capitolo 19 Acustica musicale

Sergio Cingolani, Silvia Lanzalone

19.1	Alcune considerazioni preliminari	829
19.2	Gli strumenti a corda sfregata	831
19.2.1	Le oscillazioni con smorzamento	831
19.2.2	Come vibra la corda di un violino	832
19.2.3	Il ponticello	837
19.2.4	Il corpo dello strumento	838

	19.2.5	Emissione sonora	842
19.3		Il pianoforte	843
	19.3.1	Principi di funzionamento	843
	19.3.2	Dinamica della corda percossa	846
	19.3.3	La tavola armonica	850
19.4		Aerofoni: generalità	851
	19.4.1	Camerature nei legni e negli ottoni	851
	19.4.2	Fori tonali e di registro	853
	19.4.3	L'imboccatura	856
	19.4.4	Diagrammi di impedenza del caneggio	857
	19.4.5	Suono degli aerofoni e temperatura	859
19.5		Il clarinetto	860
	19.5.1	Risonanze del caneggio di un clarinetto	862
	19.5.2	Emissione di un clarinetto	862
19.6		Ottoni	863
	19.6.1	Caneggio e risonanze	863
	19.6.2	Campana e irradiazione sonora	864
	19.6.3	Influenza del bocchino	866
	19.6.4	La tromba moderna con valvole	868
19.7		Il flauto traverso	869
19.8		Il ruolo dei materiali ai fini dell'emissione acustica degli aerofoni	870
19.9		Percussioni, membrane e risuonatori	871
19.10		Il timpano	872
	19.10.1	Effetti dell'aria nel timpano	873
19.11		Gli idiofoni	875
19.12		Strumenti aumentati	877
	19.12.1	Il gesto «esteso»	878
	19.12.2	Il suono «incarnato»	882
		Bibliografia	888
Capitolo 20 Acustica architettonica: spazi per la musica			
<i>Sergio Cingolani, Carmine Ianniello, Renato Spagnolo</i>			
20.1		Acustica degli spazi chiusi	895
	20.1.1	Modi propri di uno spazio parallelepipedo	896
	20.1.2	Campo acustico in condizioni stazionarie e in condi- zioni transitorie	903
	20.1.3	Principi dell'acustica geometrica	907
	20.1.4	Teoria statistica e ipotesi del campo perfettamente diffuso	912
	20.1.5	Decadimento del suono e tempo di riverberazione . .	915
	20.1.6	Densità di energia sonora in condizioni stazionarie .	918
	20.1.7	Diffusione del suono e diffusori	921
20.2		Attributi percettivi e parametri oggettivi in sale per la musica	926
	20.2.1	Considerazioni preliminari	926

20.2.2	L'importanza della risposta all'impulso	929
20.2.3	Tempi di riverberazione e attributi collegati	931
20.2.4	Rapporti tra energie e chiarezza	935
20.2.5	Indice della robustezza del suono e intensità percepita	937
20.2.6	Intervallo di ritardo iniziale, presenza (intimità) e tessitura	939
20.2.7	Parametri collegati alla Spazialità	941
20.2.8	Una sintesi dei parametri utilizzati	950
20.3	Sale da concerto e teatri d'opera	951
20.3.1	Sale da concerto	952
20.3.2	Specificità dell'opera e dei teatri d'opera	958
20.4	Gli strumenti musicali e lo spazio architettonico	972
	Bibliografia	977

**Capitolo 21 Acustica architettonica: ambienti per la parola,
studi di registrazione, modelli di simulazione, ri-
produzione di campi acustici**

Arianna Astolfi, Filippo M. Fazi, Marco Fringuellino, Massimo Garai

21.1	Qualità degli ambienti dedicati all'ascolto della parola	983
21.1.1	La buona ricezione	985
21.1.2	L'intelligibilità del parlato	986
21.1.3	L'assenza di disturbo	998
21.2	Ambienti scolastici	1005
21.2.1	Il rumore e la riverberazione	1006
21.2.2	I requisiti acustici per gli ambienti scolastici	1008
21.2.3	Documenti normativi sull'acustica degli ambienti sco- lastici	1010
21.2.4	Linee guida per la progettazione acustica di ambienti scolastici	1013
21.3	Open-space	1017
21.3.1	I requisiti acustici per elevate prestazioni in uffici open-space	1018
21.3.2	I requisiti per la privacy	1019
21.3.3	Linee guida per la progettazione acustica	1024
21.4	Studi di registrazione	1029
21.4.1	Requisiti fondamentali di uno studio di registrazione	1030
21.4.2	Regie: aspetti generali	1032
21.4.3	Modelli di regia	1043
21.4.4	Le sale di presa	1045
21.5	Modelli di simulazione e auralizzazione	1048
21.5.1	Considerazioni generali	1048
21.5.2	Metodo delle sorgenti virtuali	1050
21.5.3	Metodo del ray tracing	1053
21.5.4	Confronto tra sorgenti virtuali e ray tracing	1057

21.5.5	Metodo della radiosità	1060
21.5.6	Modelli ibridi	1063
21.5.7	Linee guida per l'utilizzo	1068
21.5.8	Auralizzazione e acustica virtuale	1073
21.6	La riproduzione di campi acustici con array di altoparlanti . .	1077
21.6.1	Considerazioni preliminari	1077
21.6.2	Wave Field Synthesis	1079
21.6.3	Ambisonics	1085
	Bibliografia	1093

Capitolo 22 Acustica dei materiali e dei sistemi edilizi

Giuliana Benedetto, Marco Fringuellino, Gino Iannace, Alessandro Schiavi, Renato Spagnolo

22.1	Potere fonoisolante di divisori semplici, doppi, stratificati . . .	1103
22.1.1	Principi generali	1103
22.1.2	Teoria della trasmissione per il divisorio singolo . . .	1106
22.1.3	L'effetto coincidenza	1113
22.1.4	Teoria della trasmissione per il divisorio doppio . . .	1115
22.1.5	Divisori multistrato	1118
22.2	Modelli matematici per lo studio dell'isolamento acustico . . .	1122
22.2.1	Analisi classica e metodo delle impedenze progressive	1123
22.2.2	Statistical Energy Analysis (SEA)	1127
22.2.3	Metodo degli elementi finiti (FEM)	1129
22.3	Assorbimento acustico di materiali e strutture	1133
22.3.1	Proprietà fondamentali	1133
22.3.2	Assorbimento per porosità	1136
22.3.3	Assorbimento per risonanza di cavità. Pannelli forati	1142
22.3.4	Assorbimento per risonanza di membrana	1146
22.3.5	Elementi e corpi assorbenti	1148
22.4	Resistenza e resistività al flusso in materiali porosi e fibrosi .	1152
22.4.1	Definizioni	1152
22.4.2	Determinazione della resistività al flusso	1153
22.4.3	Applicazioni	1154
22.4.4	Grandezze d'influenza sulla resistività al flusso . . .	1156
22.5	Proprietà elastiche dei materiali	1158
22.5.1	Modulo elastico statico e quasi-statico	1160
22.5.2	Modulo elastico dinamico di un sistema massa-molla reale	1162
22.5.3	Il coefficiente di smorzamento	1163
22.5.4	Applicazioni	1165
22.5.5	Cenni sui materiali viscoelastici	1172
22.6	Trasmissione del suono per via strutturale	1173
22.6.1	La radiazione sonora generata da strutture in vibrazione	1174
22.6.2	Trasmissione attraverso le strutture laterali	1175

22.6.3	Trasmissione di suoni impattivi e isolamento del rumore di calpestio	1178
22.6.4	Il rumore degli impianti. La potenza sonora strutturale	1181
22.7	Proprietà acustiche di materiali di nuova generazione	1185
22.7.1	Materiali eco-sostenibili	1187
22.7.2	Teli acustici perforati	1194
22.7.3	Pneumatici triturati	1195
22.7.4	Le schiume poliuretaniche	1197
22.7.5	Nanomateriali	1197
22.8	Tecniche e procedure normalizzate di misurazione	1198
22.8.1	La normativa ISO EN UNI	1198
22.8.2	Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea secondo la norma UNI EN ISO 10140-2	1201
22.8.3	Misurazione in laboratorio dell'isolamento del rumore di calpestio secondo la norma UNI EN ISO 10140-3	1203
22.8.4	Misurazione in opera del potere fonoisolante secondo la norma UNI EN ISO 140-4	1206
22.8.5	Misurazione in opera dell'isolamento del rumore di calpestio secondo la norma UNI EN ISO 140-7	1207
22.8.6	Il calcolo degli indici di valutazione secondo le norme UNI EN ISO 717-1 e UNI EN ISO 717-2	1208
22.8.7	Introduzione all'incertezza di misurazione nell'acustica in edilizia secondo la norma UNI EN ISO 12999-1	1211
22.8.8	Determinazione del coefficiente d'assorbimento acustico per incidenza diffusa a norma UNI EN ISO 354	1212
22.8.9	Il calcolo degli indici di valutazione secondo la norma UNI EN ISO 11654	1214
22.8.10	Cenni alle problematiche relative alle misurazioni a bassa frequenza	1215
	Bibliografia	1216

Capitolo 23 Vibrazioni meccaniche e sistemi vibranti

Alessandro Fasana, Stefano Marchesiello

23.1	Introduzione	1225
23.2	Risposta libera del sistema a un grado di libertà	1226
23.3	Risposta forzata del sistema a un grado di libertà	1229
23.3.1	Risposta al gradino	1229
23.3.2	Risposta all'armonica	1230
23.3.3	Smorzamento isteretico	1232
23.4	Trasmissibilità	1233
23.5	Il decremento logaritmico	1234
23.6	I punti di metà potenza	1236
23.7	Introduzione all'analisi modale	1237

23.8	Problema agli autovalori	1240
23.9	Sistemi con smorzamento viscoso proporzionale: risposta libera	1241
23.10	Risposta alla forzante armonica	1242
23.11	Vibrazioni di sistemi a parametri distribuiti	1246
	Bibliografia	1249

Capitolo 24 Vibrazioni nei luoghi di lavoro

Alessandro Peretti

24.1	Considerazioni preliminari	1251
24.2	Sorgenti delle vibrazioni	1252
24.3	Superficie di trasmissione delle vibrazioni e postura degli addetti	1253
24.4	Effetti delle vibrazioni sull'uomo	1254
24.5	Norme e disposizioni di legge	1255
24.6	Misura delle vibrazioni	1256
24.6.1	Accelerazione, unità di misura, valore quadratico medio	1256
24.6.2	Sistemi di coordinate	1256
24.6.3	Intervalli di frequenza, curve di ponderazione, accelerazione ponderata	1257
24.6.4	Catena di misura e calibrazione	1258
24.6.5	Accelerometri e loro fissaggio	1258
24.6.6	Caratteristiche dello strumento di misura	1262
24.7	Causa delle vibrazioni e caratteristiche	1263
24.7.1	Mezzi di trasporto e macchine operatrici e agricole .	1263
24.7.2	Macchine fisse e impianti	1265
24.7.3	Macchine utensili portatili	1265
24.8	Indagini sul campo	1267
24.8.1	Mezzi di trasporto e macchine operatrici e agricole .	1267
24.8.2	Macchine fisse e impianti	1268
24.8.3	Macchine utensili portatili	1270
24.9	Elaborazioni dei dati acquisiti	1271
24.9.1	Esposizione giornaliera	1271
24.9.2	Vibrazioni impulsive e fattore di cresta	1273
24.9.3	SEAT, curva di trasmissibilità e frequenza di risonanza	1273
24.9.4	Vibrazioni associate a singoli interventi e SEL	1274
24.10	Aspetti particolari	1276
24.10.1	Sospensioni dei sedili di guida	1276
24.10.2	Attrezzi manuali impiegati in edilizia	1277
24.10.3	Vibrazioni negli edifici	1277
24.11	Interventi di riduzione del rischio	1279
24.11.1	Produttori	1279
24.11.2	Utenti	1281
24.11.3	Consulenti	1283
	Bibliografia	1284

Capitolo 25 Rumore nei luoghi di lavoro

Alessandro Peretti

25.1	Premessa	1287
25.2	Norme e disposizioni di legge	1288
25.3	Indagini riguardanti la valutazione del rischio	1289
25.3.1	Considerazioni preliminari	1289
25.3.2	Acquisizione dei dati informativi	1290
25.3.3	Misurazioni	1294
25.3.4	Elaborazioni e valutazioni	1299
25.3.5	Altre valutazioni	1303
25.3.6	Effetti extrauditivi del rumore in ambiente di lavoro	1305
25.3.7	Criticità delle norme tecniche	1307
25.4	Riduzione del rumore negli stabilimenti industriali	1309
25.4.1	Tipologie degli interventi	1309
25.4.2	Tempi di intervento	1310
25.4.3	Struttura dello stabilimento	1318
25.4.4	Rumore emesso dalle sorgenti	1319
25.4.5	Disposizione delle macchine	1324
25.4.6	Cabinatura delle macchine	1325
25.4.7	Cappottatura delle macchine	1327
25.4.8	Schermi acustici	1329
25.4.9	Trattamenti fonoassorbenti	1330
25.4.10	Impianti di riscaldamento, condizionamento e ventilazione	1333
25.4.11	Silenziatori	1335
25.4.12	Cabinatura delle postazioni di lavoro	1338
25.4.13	Condizioni operative e manutenzione	1339
25.5	Dispositivi individuali di protezione uditiva	1340
25.5.1	Considerazioni preliminari	1340
25.5.2	Caratteristiche e impiego	1341
25.5.3	Stima del livello di esposizione a dispositivi indossati	1345
25.5.4	Criticità dei valori di attenuazione a corredo dei dispositivi	1346
25.5.5	Valutazione dell'attenuazione dei dispositivi tramite la procedura subject-fit	1348
25.5.6	Problemi associati alla variabilità dei valori di attenuazione	1349
25.5.7	Valutazione dell'attenuazione del dispositivo sul singolo lavoratore	1349
25.5.8	Criticità delle disposizioni di legge	1350
25.6	Ultrasuoni negli ambienti di lavoro	1352
25.6.1	Macchine e dispositivi	1352
25.6.2	Percezione ed effetti sull'uomo	1353
25.6.3	Valori limite	1355

25.6.4	Indagini e esperienze	1356
	Bibliografia	1358

Capitolo 26 Rumore negli ambienti urbani ed extraurbani

Giovanni Brambilla, Massimo Garai

26.1	Introduzione	1367
26.2	Sorgenti di rumore nell'ambiente di vita	1368
26.2.1	Campionamento del rumore ambientale	1369
26.2.2	Campionamento spaziale	1370
26.2.3	Campionamento temporale	1374
26.2.4	Rumore delle infrastrutture di trasporto	1377
26.2.5	Sorgenti sonore specifiche	1391
26.3	Modelli numerici della propagazione sonora in ambiente esterno	1398
26.3.1	Aspetti generali	1398
26.3.2	Classificazione dei modelli	1399
26.3.3	Campo di applicazione dei modelli	1401
26.3.4	Struttura generale dei modelli	1402
26.3.5	Aspetti applicativi	1404
26.3.6	Incertezza dei modelli	1407
26.4	Mappatura acustica	1408
26.4.1	Aspetti generali	1408
26.4.2	Tipologie di mappe acustiche e modalità di rappresentazione	1409
26.4.3	Modelli «ad interim» per l'elaborazione delle mappe acustiche	1412
26.5	Esposizione sonora della popolazione	1413
26.5.1	Metodo END (Environmental Noise Directive)	1415
26.5.2	Metodo VBEB (legislazione tedesca)	1416
26.5.3	Metodo ALE (Average Level of Exposure)	1416
26.5.4	Confronto tra i metodi	1417
26.6	Effetti extrauditivi dell'esposizione al rumore nell'ambiente di vita	1418
26.7	Aspetti socio-economici dell'esposizione al rumore nell'ambiente di vita	1425
26.7.1	La valutazione monetaria dei beni ambientali	1425
26.7.2	Metodologie per la valutazione economica del rumore	1427
26.8	Classificazione acustica del territorio	1430
26.8.1	Generalità sui criteri per la classificazione acustica del territorio	1433
26.9	Quadro di riferimento legislativo comunitario e nazionale	1439
26.9.1	Disposizioni comunitarie	1439
26.9.2	Disposizioni nazionali	1446
26.10	La valutazione di impatto ambientale per il rumore	1455
26.10.1	Lo studio di impatto acustico	1456

26.10.2	Il clima acustico	1462
26.11	Tecniche per il risanamento acustico	1464
26.11.1	Generalità	1464
26.11.2	Criteri per l'individuazione delle soluzioni praticabili	1465
26.11.3	Interventi diretti sulla sorgente	1467
26.11.4	Interventi sulla propagazione – Barriere	1476
26.11.5	Interventi sul ricettore	1480
26.11.6	Pianificazione territoriale e urbanistica	1482
26.11.7	Progettazione edilizia	1484
26.11.8	Valutazione dei costi e dei benefici	1485
	Bibliografia	1494
 Capitolo 27 Il soundscape: paesaggio sonoro		
	<i>Giovanni Brambilla</i>	
27.1	Introduzione	1507
27.2	Caratteristiche del paesaggio sonoro	1509
27.3	Caratterizzazione del paesaggio sonoro	1513
27.3.1	Acquisizione dei parametri fisici	1514
27.3.2	Acquisizione dei dati percettivi	1517
27.4	Modelli del paesaggio sonoro	1521
27.5	Classificazione del paesaggio sonoro	1525
27.6	Le aree di particolare fruizione	1527
27.7	La progettazione del paesaggio sonoro	1529
	Bibliografia	1531
	Appendici	1537
	Elenco dei simboli	1553
	Indice analitico	1567

Acustica

Acustica, curato da Renato Spagnolo, anche grazie al contributo dei più apprezzati esperti della disciplina è la più completa ed esaustiva opera mai pubblicata sull'acustica. Non solo, tutto il libro è ricco di puntuali e sistematici richiami alle norme tecniche, alle prescrizioni di legge, alle modalità e prassi operative della specifica situazione italiana. Per questo è uno strumento irrinunciabile per i professionisti, oltretutto per i ricercatori, i docenti e gli studenti.

Guardando all'autorevole fonte *Physics and Astronomy Classification Scheme (PACS)* dell'American Institute of Physics (AIP), l'acustica risulta ordinata in dodici aree, che vanno, per citare solo le più note, dall'acustica generale lineare a quella non lineare, all'acustica musicale e alla bioacustica, passando per l'acustica subacquea, gli ultrasuoni e i loro effetti fisici e biologici, le misurazioni acustiche e la strumentazione, l'acustica strutturale e le vibrazioni, gli effetti e il controllo del rumore, l'acustica architettonica, la psicoacustica.

In questo libro tutti questi campi sono esplorati e analizzati approfonditamente: dalla propagazione lineare e non lineare delle onde fino ai temi più specialistici come le tecniche di misura e di analisi numerica del segnale, dall'acustica subacquea alla bioacustica, dalla funzione uditiva alla voce, fino alle applicazioni degli ultrasuoni in campo medico e alle complesse problematiche del rumore e delle vibrazioni nei luoghi di lavoro e di vita.

Renato Spagnolo è stato Dirigente di ricerca dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale «Galileo Ferraris», oggi Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, dove è tuttora ricercatore associato. Insegna Acustica nel corso di Laurea Magistrale in Fisica dell'Università di Torino. Con UTET Università ha già pubblicato, insieme a Caterina Guiot, *Ultrasuoni in medicina* (2010), mentre altri suoi precedenti volumi, *Manuale di acustica applicata* (2001, 2008) e, in collaborazione con Sergio Cingolani, *Acustica musicale e architettonica* (2004, 2008), sono stati pubblicati con i marchi UTET Libreria e CittàStudi Edizioni.

Immagine di copertina: Oria © Shutterstock
Grafico: Maura Santini
Art Director: Nadia Maestri

www.utetuniversita.it

Alla pagina web www.utetuniversita.it sono disponibili materiali didattici di supporto per docenti e studenti.

€ 89,00

ISBN 978-88-6008-446-0



9 788860 084460