



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Motori aeronautici ed emissioni acustiche:
analisi della correlazione tra la propulsione
e l'impatto acustico del traffico aereo**

Il caso dell'Aeroporto di Torino-Caselle

Relatore

Prof. Maggiore Paolo

Relatori aziendali

Ing. Di Cara Adriano

Ing. Ricci Matteo

Candidata

Convertini Silvia

Anno Accademico 2024/2025 - Sessione di laurea Ottobre 2025

*Alle persone che hanno reso
più bella la mia vita e che
mi hanno aiutata a diventare
la versione migliore di me.*

Ringraziamenti

Ogni qualvolta che mi capita di leggere la tesi di qualcuno, due sono le parti che catturano il mio interesse: il sommario, per avere una vaga idea di che cosa si sta parlando, e i ringraziamenti, il momento più intimo di una persona, un'occasione di introspezione in cui ci si guarda dentro e si fa un bilancio di questi anni.

Cinque anni sono tanti, perciò è inverosimile credere di poterli tradurre a parole in una paginetta, ma anche a me è toccato il momento di riflettere su ciò che è stato, apprezzare quel che è e sperare per quel che verrà.

Un grazie incommensurabile ai miei genitori, Mimmo e Stefania, che hanno conosciuto le mie versioni migliori ma anche le peggiori, che mi sono sempre stati accanto durante questi anni, che mi hanno dato la carica quando studiavo cose nuove e consolato quando li chiamavo dopo un esame andato storto. Ci vuole tanta pazienza con me, e tanta pazienza anche con voi, ma in qualche modo l'abbiamo fatta funzionare e credo che questi 1279 km che ci distanziano, in realtà, ci abbiano unito ancora di più: grazie per essere ora e per sempre i miei pilastri, questa laurea è anche merito vostro.

Grazie a mia sorella Elisa per la leggerezza che ha sempre portato nella mia vita, per essere così diversa e al contempo simile a me nonostante siamo cresciute insieme. È un dono avere una persona che ti capisce al volo ad ogni sguardo, ad ogni inside joke, che ti ha visto evolvere in ogni versione della tua vita: sappi che anche se ormai sei grande e sei più imponente di me, per me rimarrai sempre la mia piccola sorellina che mi chiamava "Sita".

Grazie a tutti i miei parenti dispersi per l'Italia, l'Europa e ultimamente anche il mondo: grazie alle mie nonne e nonni, alle mie zie e zii, alle mie cugine e cugini, grazie del calore che mi avete dato e dei ricordi che abbiamo costruito, sarà mia premura conservarli sempre con me, ovunque sarò e saremo.

Grazie alla mia cara amica Valeria per essere stata la mia voce della coscienza per tutti questi anni e aver avuto sempre fiducia e stima in me, anche quando le mie scelte erano discutibili. Un'amicizia nata per caso più di un decennio fa e che è sopravvissuta a tutti gli alti e bassi: grazie per scegliere ogni giorno di esserci e di condividere questa vita con me.

Grazie a Marco e a tutti i miei amici di giù per essere rimasti nonostante gli anni e la distanza, per farmi sentire "ogni volta che scendo giù" come se il tempo non fosse mai passato, come se fossimo ancora solo dei ragazzini in quel piccolo angolo di mondo che è Cisternino.

Grazie ad Aurora e Giovanna, mie compagne di corso, amiche ma soprattutto confidenti, per aver reso questi cinque anni un lavoro di squadra, per aver condiviso insieme ben 8 sessioni di esami e di scleri, per avermi spronato a tirare fuori il meglio che potessi dare: è stato un onore essere al vostro fianco in questo viaggio e un sollievo aver condiviso le difficoltà di questo percorso di studi con voi, ora e per sempre saremo "Le tre moschettiere".

Grazie a tutte le mie amiche di Torino e ai miei compagni di corso, per avermi affiancato in questi anni e per aver condiviso con me gioie e dolori dello scegliere una laurea come quella in ingegneria aerospaziale e la vita da fuorisede.

Grazie al mio relatore il professore Paolo Maggiore, per essersi fidato delle mie scelte e del mio lavoro e per aver creduto nella mia tesi da quando, mesi fa, sono corsa da lui dicendo che l'Aeroporto di Torino mi aveva preso a lavorare con loro.

Grazie al mio correlatore l'ingegnere Matteo Ricci, per essere stato dal giorno 1 una fonte di ispirazione e di ammirazione e di essersi rivelato una guida salda e sicura. Come primo ingresso nel mondo del lavoro sono certa non potessi chiedere un responsabile (non capo, perché sennò si arrabbia) competente, brillante e che tira fuori il meglio dalle persone che gli stanno attorno come lui.

Grazie anche al mio correlatore l'ingegnere Adriano Di Cara per la sua competenza e pazienza e per non avermi bloccato nonostante l'abbia tartassato per mesi: che la tua calma sia una fonte di ispirazione anche per me, assieme al tuo essere sempre più che sul pezzo.

Grazie a Manuela e Francesca per essere state non solo delle colleghe, ma soprattutto delle amiche: grazie per allietare le mie giornate e rendere divertenti anche i momenti più tristi, è raro trovare persone solari come voi. (P.S. Come promesso, grazie Manuela per l'aiuto con il database!)

Grazie a tutti i colleghi dell'aeroporto che ho avuto il piacere di conoscere, dal Landside all'Airside, e un grazie speciale all'Aeroporto di Torino-Caselle, per aver creduto nelle mie competenze e capacità e per avermi dato l'occasione di dimostrarlo: senza di voi questa tesi non sarebbe stata possibile.

Grazie a chiunque non abbia citato per nome, alle persone che ci sono state e che ora non ci sono più, alle persone che per mille motivi sono andate per strade diverse dalla mia: sarete anche state delle comete nella lunghezza della mia vita ma ognuno di voi ha avuto un impatto su di me, mi reputo fortunata a considerarmi un mosaico di tutte le vite che ho avuto il piacere di incontrare.

E infine, grazie alla mia bellissima Torino, per avermi visto crescere e avermi fatto sentire, anche se fuorisede, sempre a casa.

Sommario

Negli ultimi decenni, il traffico aereo ha conosciuto un costante incremento a livello globale, con una conseguente espansione delle infrastrutture aeroportuali e una maggiore frequenza di movimenti aerei anche in prossimità di aree urbane. Sebbene l'aviazione civile rappresenti un asset strategico per l'economia e la mobilità internazionale, essa comporta significativi impatti ambientali, tra cui l'emissione di sostanze inquinanti, le emissioni di CO_2 e, in modo particolarmente rilevante, il rumore generato dagli aeromobili in fase di decollo, atterraggio e rullaggio.

Il rumore aeroportuale, definito come l'insieme delle emissioni acustiche prodotte durante le operazioni aeree, rappresenta una delle principali cause di disagio percepito dalla popolazione residente nelle aree limitrofe agli scali. Diversi studi internazionali hanno evidenziato correlazioni tra l'esposizione prolungata al rumore e l'insorgenza di effetti negativi sulla salute umana, incidendo sul benessere fisico ma anche mentale dell'individuo. Per tali motivi, le autorità aeronautiche, sia a livello nazionale che internazionale, hanno introdotto una serie di normative e linee guida finalizzate al contenimento e al monitoraggio del rumore.

La presente tesi ha l'obiettivo di analizzare i livelli di rumore rilevati presso l'Aeroporto di Torino-Caselle, con particolare attenzione alla correlazione tra i valori registrati dalle centraline acustiche e i motori aeronautici che equipaggiano i velivoli coinvolti. Lo studio ha interessato le operazioni aeroportuali effettivamente svolte, come risultano dai dati radar, e l'analisi si è estesa anche all'influenza delle condizioni meteorologiche sulla propagazione del rumore verso le postazioni di monitoraggio.

Indice

Elenco delle figure	VII
Elenco delle tabelle	X
1 Introduzione	1
2 Quadro normativo e tecnico	5
2.1 La normativa internazionale ICAO	5
2.1.1 <i>Balanced Approach</i> dell'ICAO	6
2.1.2 <i>Annex 16</i> Volume I e certificazione acustica degli aeromobili	7
2.1.3 Altre iniziative ICAO e tecnologie emergenti	12
2.2 La normativa europea e il ruolo dell'EASA	12
2.2.1 Prime direttive europee sull'inquinamento acustico	12
2.2.2 Direttive 2002/30/CE e 2002/49/CE sulla valutazione del rumore aeroportuale	13
2.2.3 Normativa attuale e ruolo dell'EASA	14
2.2.4 Impatto del rumore secondo l'EAER 2025	17
2.3 Il quadro normativo nazionale in Italia	18
2.3.1 Struttura della normativa: principi, obblighi e strumenti tecnici	18
2.3.2 Criticità applicative, giurisprudenza e allineamento europeo	20
2.3.3 Parametri acustici per la valutazione del rumore aeroportuale	21
2.4 La dimensione tecnica della gestione del rumore aeroportuale	24
2.4.1 Standard internazionali: ISO e IEC	25
2.4.2 Quadro europeo: Direttiva 2015/996	27
2.4.3 Quadro nazionale: D.M. 16 marzo 1998	28
2.4.4 Taratura e verifica metrologica degli strumenti di misura	29
2.4.5 Applicazioni pratiche della tecnologia di monitoraggio	29
3 Emissioni acustiche e sviluppo tecnologico dei motori aeronautici	31
3.1 I meccanismi di generazione del rumore aeronautico	31
3.1.1 <i>Engine noise</i>	33
3.1.2 <i>Airframe noise</i>	34
3.1.3 Distinzione tra rumore esterno e interno	34
3.2 Il rumore emesso dai motori aeronautici	35
3.2.1 Motori turbojet	35
3.2.2 Motori turbofan	36
3.2.3 Motori propeller	37
3.3 L'evoluzione storica della riduzione del rumore nei motori aeronautici	37
3.3.1 Anni '40-'50: introduzione del turbojet ed origine del <i>jet noise</i>	38
3.3.2 Anni '60-'70: nascita del turbofan e del concetto di bypass ratio	38

3.3.3	Anni '80-'90: affermazione degli high-bypass turbofan, delle tecnologie fonoassorbenti e dei primi standard ICAO	39
3.3.4	Anni 2000-2010: <i>chevrans, geared</i> turbofan e ricerca USA-UE	40
3.3.5	Anni 2010-oggi: <i>ultra-high</i> bypass, nuovi materiali e ottimizzazione digitale	41
3.4	Le tecnologie e le procedure operative per la mitigazione del rumore aeronautico	42
3.4.1	Riduzione del <i>jet noise</i>	42
3.4.2	Riduzione del rumore del fan	43
3.4.3	Riduzione dell'airframe noise	44
3.4.4	Smorzamento acustico tramite rivestimenti e materiali	45
3.4.5	Soluzioni retrofit e tecnologie ibride	46
3.4.6	Prospettive future: <i>open rotor</i> , motori ibridi e tecnologie acustiche avanzate	47
3.4.7	Mitigazione operativa del rumore grazie alle procedure di volo	48
3.5	I principali modelli di motori aeronautici in uso e il loro profilo acustico	49
3.5.1	Motori per aeromobili <i>narrow-body</i>	49
3.5.2	Motori per aeromobili <i>wide-body</i>	53
3.5.3	Motori per l'aviazione regionale, business e generale	58
3.5.4	Motori per elicotteri	58
3.5.5	Motori del futuro: droni, VTOL e UAS	61
4	Impronta e impatto acustico	66
4.1	I concetti fondamentali di acustica	66
4.1.1	Suono come fenomeno fisico	66
4.1.2	Unità di misura e scala logaritmica	69
4.1.3	Campo di udibilità	71
4.1.4	Differenza tra suono e rumore	77
4.2	Dall'anatomia dell'orecchio agli effetti del rumore	80
4.2.1	Apparato uditivo umano	80
4.2.2	Effetti del rumore sulla salute umana	82
4.3	La propagazione del suono nell'ambiente	84
4.3.1	Meccanismi fisici di propagazione del suono	85
4.3.2	Fattori meteorologici	87
4.3.3	Effetti del terreno	90
4.3.4	Ostacoli e schermature	91
5	Caso di studio: l'Aeroporto di Torino-Caselle	93
5.1	La storia dell'aeroporto e della società di gestione aeroportuale	93
5.2	I dati AIP (<i>Aeronautical Information Publication</i>) Italy	98
5.2.1	Caratteristiche generali	98
5.2.2	Caratteristiche infrastrutturali	100
5.2.3	Caratteristiche operative	102
5.2.4	Servizi di supporto operativo	103
5.2.5	Vincoli ambientali	104
5.3	Il traffico aereo, i movimenti e le rotte commerciali	105
5.3.1	Tipologia di traffico	105
5.3.2	Andamento dei movimenti	106
5.3.3	Compagnie aeree e principali rotte nazionali e internazionali	109
5.4	Il monitoraggio del rumore e la zonizzazione acustica	111
5.4.1	Sistema di monitoraggio acustico	111
5.4.2	Piani di classificazione acustica comunale	113
5.4.3	Zonizzazione acustica aeroportuale	114
5.4.4	Livelli di rumorosità aeroportuale in real-time	116

5.4.5	Procedure antirumore e restrizioni operative	116
6	Dati a disposizione e analisi dei risultati	118
6.1	L'origine e le caratteristiche dei dataset	118
6.1.1	Dati acustici	119
6.1.2	Dati radar	121
6.1.3	Dati meteo	124
6.1.4	Dati velivoli	125
6.2	La costruzione del database	127
6.2.1	Approccio e software utilizzati	127
6.2.2	Importazione dei dati e strategie di integrazione	128
6.2.3	Descrizione delle entità principali e dello script Python	129
6.2.4	Struttura del database MySQL	132
6.3	I risultati dell'analisi	133
6.3.1	Evoluzione della <i>fleet mix</i>	133
6.3.2	Andamento dei dB rilevati nel tempo	137
6.3.3	Confronto tra velivoli appartenenti alla classe ICAO C	155
6.3.4	Confronto tra velivoli appartenenti a classi ICAO differenti	162
6.3.5	Effetto vento	166
7	Conclusioni e sviluppi futuri	168
	Bibliografia	170

Elenco delle figure

1.1	<i>Global total passengers 2019-2024</i> ^[1]	1
1.2	<i>Monthly global domestic and international passenger</i> ^[1]	2
1.3	<i>Global passenger market long-term forecast 2010-2050</i> ^[1]	2
2.1	Approccio bilanciato per la gestione del rumore ^[2]	7
2.2	<i>Aircraft noise certification reference measurement points</i> ^[3]	8
2.3	Punti di riferimento per le misurazioni ^[4]	9
2.4	<i>CAEP Working Group 1 milestones</i> ^[5]	10
2.5	<i>The progression of the ICAO Noise Standards for aeroplanes</i> ^[3]	10
2.6	Confronto tra un'area circolare di 14 km ² e una di 1.5 km ²	11
2.7	<i>Total number of people in the Lden 55 dB noise contours at 98 major airports</i> ^[6]	17
2.8	Differenza tra LVA e LAeq,Tr ^[7]	24
3.1	<i>Aircraft noise sources</i> ^[10]	32
3.2	<i>Jet noise mixing regions</i> ^[11]	33
3.3	Sorgenti del rumore prodotto da un aereo ^[12]	34
3.4	<i>The contributions of the noise emission for a turbojet engine</i> ^[13]	35
3.5	<i>Dominant engine noise sources</i> ^[14]	35
3.6	<i>Noise sources for a high BPR turbofan engine</i> ^[15]	37
3.7	<i>A close-up view of the GE90, with its 22 four-foot-long swept fan blades</i> ^[16]	39
3.8	<i>Close-up view of the Rolls-Royce Trent 1000, with its distinctive chevrons on the nacelle</i> ^[17]	40
3.9	<i>GTF Engine allows step change in efficiency</i> ^[18]	41
3.10	Diametro in centimetri dei fan dei motori aeronautici <i>narrow-body</i> e <i>wide-body</i> più diffusi	43
3.11	<i>Hamilton Sundstrand A400M 17,5 ft diameter propeller system</i> ^[19]	44
3.12	<i>A320 Sharklet close-up</i> ^[20]	45
3.13	<i>Split Scimitar Winglet in BBJ</i> ^[21]	45
3.14	<i>The acoustic liners are composed of a metal plate perforated with tiny holes and, underneath, a honeycomb pattern core</i> ^[22]	46
3.15	<i>Open Fan architecture of the CFM RISE program</i> ^[23]	47
3.16	CFM CFM56	50
3.17	IAE V2500	50
3.18	CFM LEAP	50
3.19	PW1000G <i>geared</i> Turbofan	50
3.20	GE CF6	53
3.21	GEnx	53
3.22	GE90/GE9X	54
3.23	Trent 700/Trent 7000	54

3.24	Trent 1000/Trent XWB	54
3.25	<i>Helicopter noise propagates from numerous sources</i> ^[25]	59
3.26	<i>The quietest range of helicopters</i> ^[26]	61
3.27	<i>Innovative Air Services and Mobility</i> ^[27]	62
3.28	Schema drone SKYHAWK DRC442-BLK Foldable Video GPS ^[28]	63
4.1	<i>Sound is an energy wave that travels by compressing and rarefying the air molecules</i> ^[12]	67
4.2	Rappresentazione di un'onda sinusoidale ^[31]	68
4.3	<i>The intensity of sound and noise is quantified using the decibel (dB) scale</i> ^[12]	71
4.4	<i>The human ear's frequency response is nonlinear and most sensitive to sounds between 1,000 Hz and 4,000 Hz</i> ^[12]	72
4.5	<i>Spectre audible de l'oreille humaine</i> ^[33]	73
4.6	Campo dell'udibile in funzione della frequenza ^[34]	73
4.7	<i>Normal equal-loudness-level contours for pure tones</i> ^[35]	75
4.8	Curve di ponderazione ^[34]	76
4.9	Rappresentazione temporale di un suono puro (A) e di un suono complesso (B) ^[36]	79
4.10	Spettri sonori ^[37]	79
4.11	Anatomia dell'apparato uditivo ^[39]	81
4.12	Sezione longitudinale della coclea srotolata ^[34]	82
4.13	Scala di lesività proposta da Cosa e Nicoli in relazione ai vari livelli acustici ^[40]	83
4.14	<i>A sound disturbance produces a pressure wavefront that spreads spherically in time as it propagates away from the original disturbance</i> ^[12]	85
4.15	Gradiente di temperatura ^[43]	88
4.16	Inversione termica ^[43]	88
4.17	<i>Speed of sound vs. temperature and relative humidity</i> ^[44]	89
4.18	<i>Frequency dependence of attenuation as a function of relative humidity at 20°C (left), attenuation as a function of temperature for various percentages of relative humidity (right)</i> ^[45]	89
4.19	Effetto del vento ^[46]	90
4.20	<i>Effect of environment on sound propagation</i> ^[47]	91
4.21	Influenza della superficie del suolo ^[48]	91
4.22	<i>The effect of a barrier on sound waves</i> ^[49]	92
5.1	La mappa dei primi aeroporti torinesi ^[51]	94
5.2	Pianta degli edifici dell'aeroporto militare di Caselle ^[50]	94
5.3	Documentazione per stabilire a Torino la sede del Mercato Comune Europeo ^[50]	95
5.4	Il primo logo della SAGAT ^[50]	96
5.5	Il secondo logo della SAGAT ^[50]	96
5.6	Inquadramento Territoriale su ortofoto e comuni limitrofi (Manuale di Aeroporto - Parte C - Caratteristiche dell'aeroporto)	99
5.7	Tracce radar degli atterraggi (in blu) e dei decolli (in rosso) ^[53]	99
5.8	Caratteristiche di un sistema pista ^[55]	101
5.9	Planimetria dell'aeroporto ^[53]	101
5.10	Superficie di inviluppo e superficie VFR (Manuale di Aeroporto - Parte C - Allegato PC12 - Mappe di Vincolo-PG-02 rev01.pdf)	103
5.11	Passeggeri progressivi fino a Dicembre 2024 (Su Base 2023) ^[56]	106
5.12	Movimenti progressivi fino a Dicembre 2024 (Su Base 2023) ^[56]	106
5.13	Cargo progressivi fino a Dicembre 2024 (Su Base 2023) ^[56]	107
5.14	Movimento dei passeggeri 1953-1996 ^[50]	108
5.15	Traffico passeggeri e movimenti 2013-2024 ^[57]	108
5.16	Voli stagione Winter 2025/2026 ^[58]	110

5.17 Ubicazione delle postazioni di misura ^[53]	111
5.18 Posizione centraline fonometriche al 2025	112
5.19 Valori limite di immissione DPCM 14/11/1997 ^[53]	113
5.20 Classificazione del territorio comunale DPCM 14/11/1997 ^[53]	114
5.21 Zonizzazione Aeroportuale ^[53]	115
6.1 Struttura tabella <i>dati_ncrociati</i>	132
6.2 Somma di ATM per YEAR e NOISE	134
6.3 Somma di ATM per YEAR e AIRCRAFT_MODEL_ICAO_CLASS	135
6.4 Somma di ATM per AIRCRAFT_ICAO_MODEL	136
6.5 Somma di ATM per AIRCRAFT_MODEL_ICAO_CLASS	137
6.6 Andamento dei dB rilevati da LIMF05 nel tempo per A321Neo	138
6.7 Andamento dei dB rilevati da LIMF07 nel tempo per A321Neo	139
6.8 Andamento dei dB rilevati da LIMF05 nel tempo per B737 MAX 8	140
6.9 Andamento dei dB rilevati da LIMF07 nel tempo per B737 MAX 8	141
6.10 Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF05 per A321neo	142
6.11 Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF07 per A321neo	143
6.12 Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF05 per B737 MAX 8	144
6.13 Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF07 per B737 MAX 8	145
6.14 Rilevazioni dB per volo in atterraggio A21N, Chapter 14, Engine PW1133GA-JM .	146
6.15 Rilevazioni dB per volo in atterraggio A321, Chapter 4, Engine V2533-A5	147
6.16 Rilevazioni dB per volo in atterraggio B738, Chapter 4, Engine CFM56-7B26E .	148
6.17 Rilevazioni dB per volo in atterraggio B38M, Chapter 4, Engine LEAP-1B27 . .	149
6.18 Rilevazioni dB per volo in decollo A21N, Chapter 14, Engine PW1133GA-JM . .	150
6.19 Rilevazioni dB per volo in decollo A321, Chapter 4, Engine V2533-A5	151
6.20 Rilevazioni dB per volo in decollo B738, Chapter 4, Engine CFM56-7B26E	151
6.21 Rilevazioni dB per volo in decollo B38M, Chapter 4, Engine LEAP-1B27	152
6.22 Andamento dei dB rilevati da LIMF05 per atterraggio Antonov A124 Chapter 3 .	153
6.23 Andamento dei dB rilevati da LIMF01 per decollo Antonov A124 Chapter 3	153
6.24 Andamento dei dB rilevati da LIMF05 per atterraggio A139 Chapter 3	154
6.25 Andamento dei dB rilevati da LIMF07 per decollo A139 Chapter 3	154
6.26 Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in partenza LIMF07	155
6.27 Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in partenza LIMF01	156
6.28 Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in arrivo LIMF04	157
6.29 Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in arrivo LIMF05	158
6.30 Confronto tra due velivoli A320 e A20N in partenza LIMF07	159
6.31 Confronto tra due velivoli A320 e A20N in partenza LIMF01	160
6.32 Confronto tra due velivoli A320 e A20N in arrivo LIMF04	161
6.33 Confronto tra due velivoli A320 e A20N in arrivo LIMF05	161
6.34 Confronto tra due velivoli B738 e B763 in partenza LIMF07	162
6.35 Confronto tra due velivoli A320 e A330 in partenza LIMF07	163
6.36 Confronto tra tre velivoli B748, B763 e B738 in partenza LIMF10	164
6.37 Confronto tra tre velivoli B748, B763 e B738 in partenza LIMF01	164
6.38 Confronto tra due velivoli B748 e A124 in arrivo LIMF04	165
6.39 Confronto tra due velivoli B748 e A124 in partenza LIMF01	165
6.40 Distribuzione dei livelli sonori per le tre condizioni di vento, con violin plot ottenuti dalla media complessiva del campione	166

Elenco delle tabelle

3.1	NOISE LEVELS (EPNdB) del CFM56-5B4/3 su A320-214	51
3.2	NOISE LEVELS (EPNdB) del CFM56-7B24 su B737-800	51
3.3	NOISE LEVELS (EPNdB) del V2500-A1 su A320-231	51
3.4	NOISE LEVELS (EPNdB) del LEAP-1A26E1 su A320-251N	52
3.5	NOISE LEVELS (EPNdB) del LEAP-1B27 su 737 MAX 8	52
3.6	NOISE LEVELS (EPNdB) del PW1124G1-JM su A320-272N	53
3.7	NOISE LEVELS (EPNdB) del CF6-80E1A4 su A330-202	55
3.8	NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent 772C-60 su A330-243	55
3.9	NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent 7000-72 su A330-841	55
3.10	NOISE LEVELS (EPNdB) del GE90-115B su B777-200LR	56
3.11	NOISE LEVELS (EPNdB) del GENx-1B64 su B787-8	57
3.12	NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent 1000-A/01 su B787-8	57
3.13	NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent XWB-97 su A350-1041	57
5.1	Principali interventi di ammodernamento dell'Aeroporto di Torino per il 2006 . . .	97
5.2	Passeggeri gennaio - luglio 2025 (su base 2024) ^[56]	109
5.3	Cargo gennaio - luglio 2025 (su base 2024) ^[56]	109
6.1	Caratteristiche di spinta dei principali motori aeronautici per <i>narrow-body</i>	145

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, la ripresa del trasporto aereo dopo la crisi pandemica ha assunto caratteri marcati: secondo il *Joint ACI World-ICAO Passenger Traffic Report, Trends, and Outlook*^[1], nel 2024 il traffico passeggeri globale ha registrato una forte ripresa, avvicinandosi o superando i livelli del 2019 in molte regioni del mondo. Tale incremento è principalmente trainato dal recupero delle rotte internazionali rimaste più a lungo penalizzate dalla pandemia, contribuendo a consolidare un nuovo trend di espansione in costante crescita del traffico aereo.

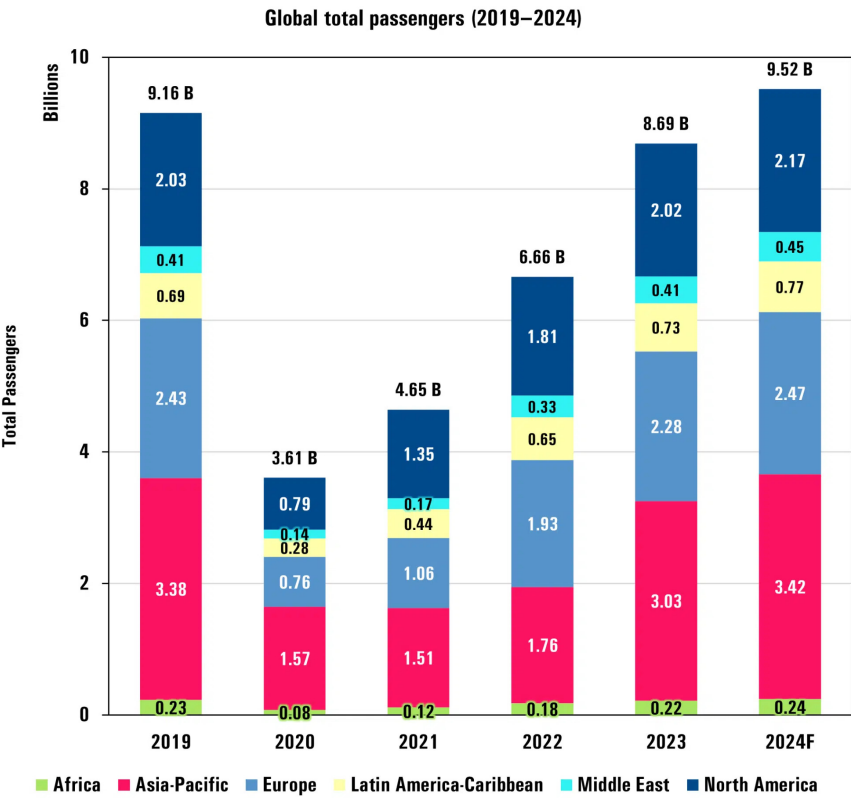


Figura 1.1: *Global total passengers 2019-2024*^[1]

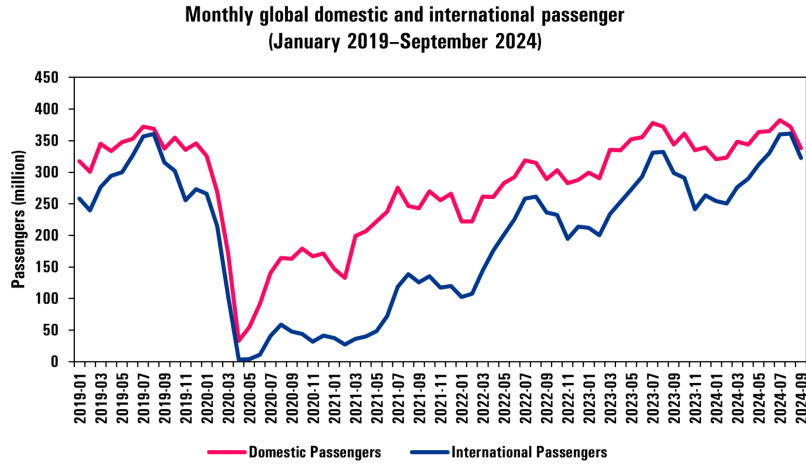


Figura 1.2: *Monthly global domestic and international passenger*^[1]

Per il 2025, il rapporto prevede valori di traffico ancora in aumento e le proiezioni sul lungo termine mostrano un trend di crescita rapido nei prossimi decenni. Nonostante un contesto macroeconomico generalmente favorevole, permangono incertezze legate a tensioni geopolitiche, carenze di manodopera e ritardi nelle consegne di nuovi aeromobili, che rendono l'output di medio-lungo periodo più prudente. Tuttavia, le proiezioni indicano tassi di crescita annui composti CAGR sostenuti, che porterebbero il traffico a raddoppiare entro il 2040 in molti scenari e quasi a triplicare entro il 2050. Questo significa che l'aumento dei movimenti non sarà un fenomeno transitorio, ma una tendenza strutturale destinata a perdurare, e questo scenario di espansione del trasporto aereo comporterà una naturale intensificazione delle operazioni aeroportuali.

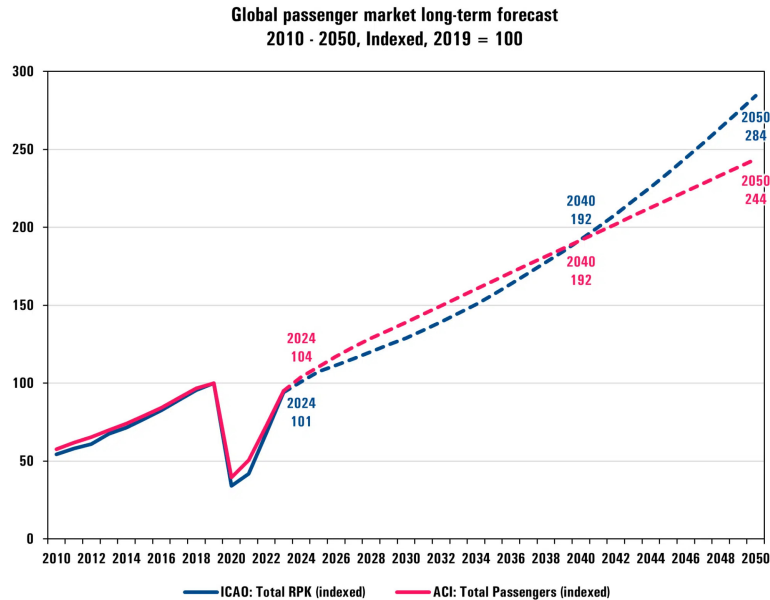


Figura 1.3: *Global passenger market long-term forecast 2010-2050*^[1]

Se da un punto di vista economico queste proiezioni di crescita sono auspicabili, un aumento considerevole del traffico aereo impone una riflessione sulle conseguenze ambientali: l'aumento del numero di movimenti e l'intensificazione delle rotte comportano un incremento delle emissioni di inquinanti, della CO₂ e dell'impatto acustico. Il rumore aeroportuale, infatti, rappresenta uno degli impatti ambientali più rilevanti generati dalle attività legate al trasporto aereo, con effetti significativi sia sulla qualità della vita delle popolazioni residenti nelle aree limitrofe sia sulla pianificazione e gestione delle infrastrutture aeroportuali, vincolando l'espansione degli aeroporti. La crescente attenzione verso la sostenibilità e la riduzione delle emissioni acustiche ha reso necessario un approccio integrato che unisca aspetti normativi, tecnici e operativi, come riconosciuto a livello internazionale dall'ICAO attraverso il *Balanced Approach*. In questo contesto si inserisce il presente lavoro di tesi, svolto presso l'Aeroporto di Torino-Caselle, con l'obiettivo di analizzare in modo integrato i dati acustici, radar, meteorologici e i dettagli dei velivoli per caratterizzare il rumore generato dal traffico aereo, così da individuare le principali correlazioni tra i livelli sonori registrati, le condizioni operative e i propulsori che equipaggiano gli aeromobili.

La ricerca nasce con lo scopo di comprendere le dinamiche fisiche e operative che determinano i livelli di rumore percepiti nell'intorno e all'interno del sedime aeroportuale, interpretando le misure acquisite dalle centraline fisse di monitoraggio in relazione alle traiettorie dei voli, alle condizioni atmosferiche e alle tipologie di velivoli. Tale approccio si distingue per la sua natura empirica, che anziché basarsi su simulazioni utilizza dati reali misurati in campo, e permette di passare da una semplice osservazione dei livelli sonori a una comprensione più profonda dei fattori che li influenzano. Per raggiungere quest'obiettivo, il lavoro si è articolato in più fasi, conducendo in primo luogo uno studio approfondito della normativa di riferimento, internazionale, comunitaria e nazionale. Ciò ha consentito di inquadrare le leggi, gli standard e le norme entro cui si muove la gestione del rumore aeroportuale, in modo da comprendere come i limiti acustici si traducano in vincoli operativi e progettuali.

Successivamente, è stata approfondita l'origine del rumore aeronautico, analizzando i meccanismi di generazione e l'evoluzione delle soluzioni tecnologiche adottate per la sua riduzione. Un'attenzione particolare è stata rivolta allo studio dei motori aeronautici più diffusi sui velivoli di aviazione commerciale, sia *narrow-body* che *wide-body*. Si è poi ritenuto necessario approfondire i principi di acustica e di generazione del suono, chiarendo i concetti necessari per interpretare correttamente le misure e comprendere l'interazione tra fenomeno fisico e percezione umana. Sono stati valutati gli effetti uditivi e extra-uditivi del rumore sulla salute umana e presentati i meccanismi fisici di propagazione del suono nell'ambiente. In seguito è stato introdotto il caso di studio dell'Aeroporto di Torino-Caselle, descrivendone le caratteristiche infrastrutturali, operative e ambientali, nonché il sistema di monitoraggio acustico e la zonizzazione aeroportuale. Infine, è stato presentato il cuore sperimentale della ricerca: la descrizione dei dataset, la costruzione del database e i risultati dell'analisi dei dati. In questa sezione vengono discussi la composizione della flotta, l'andamento dei livelli di rumore nel tempo a seconda della tipologia di motore, le correlazioni con le condizioni meteorologiche, nonché i confronti tra differenti modelli di velivoli appartenenti alla stessa o a diverse classi ICAO.

La fase di integrazione dei dati ha rappresentato l'aspetto più impegnativo dell'intero lavoro e ha visto come strumento di elaborazione il linguaggio di programmazione Python per correlare quattro fonti principali: i dati acustici provenienti dalle centraline di monitoraggio, i tracciati radar dei movimenti aerei, i dati meteorologici registrati nelle stesse finestre temporali e i dettagli dei velivoli dal database di scalo. Il processo ha previsto la gestione di centinaia di file radar, l'estrazione dei parametri più significativi, l'incrocio con i valori decibel rilevati e l'associazione con le condizioni meteorologiche e i dettagli dei velivoli. Nella fase di analisi dei risultati è stato possibile evidenziare differenze significative tra diversi modelli di aeromobili e diverse condizioni operative, non solo in termini di intensità massima del rumore, ma anche di durata complessiva del disturbo e di andamento temporale dei livelli sonori. Infine, i dati meteorologici hanno

mostrato come la direzione e la velocità del vento influenzino la propagazione delle onde sonore, confermando il ruolo determinante delle condizioni atmosferiche nel modellare la percezione del rumore a terra. L'insieme di queste analisi fornisce una visione complessiva dell'impatto acustico aeroportuale, rappresentando un contributo concreto alla comprensione dei fenomeni acustici in ambito aeronautico.

Capitolo 2

Quadro normativo e tecnico

Nel contesto della progettazione, gestione e sviluppo degli aeroporti, la tutela dall'inquinamento acustico rappresenta una componente essenziale per garantire la sostenibilità delle operazioni aeroportuali e la convivenza con le comunità locali. Il rumore generato dal traffico aereo, in particolare durante le fasi di decollo, atterraggio e rullaggio, costituisce una delle principali cause di impatto ambientale e di malcontento da parte delle popolazioni residenti in prossimità degli scali.

Per far fronte a questa criticità, l'inquinamento acustico di origine aeronautica è oggetto di una regolamentazione articolata e multilivello: internazionale, europea e nazionale. In particolare, l'inquinamento da rumore generato dal traffico aereo è oggetto di regolamentazione attraverso gli standard e le linee guida emanati dall'*Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile* (ICAO), attraverso i regolamenti e le direttive da parte dell'Unione Europea tramite l'*Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea* (EASA) e attraverso la normativa nazionale italiana. La complessità delle normative riflette l'esigenza di bilanciare due esigenze apparentemente in conflitto: da un lato, lo sviluppo del trasporto aereo come fattore economico e strategico; dall'altro, la necessità di tutelare la salute pubblica e il benessere delle persone esposte a livelli elevati di rumore.

Oltre agli aspetti regolatori e istituzionali, è fondamentale considerare anche la dimensione tecnica della gestione del rumore aeroportuale. In particolare, gli standard tecnici internazionali definiscono le modalità di certificazione acustica degli aeromobili, ma anche i requisiti che devono soddisfare gli strumenti di rilevamento e monitoraggio, come microfoni, fonometri e centraline fisse. La corretta valutazione dell'impatto acustico e l'applicazione di misure di mitigazione dipendono infatti dalla qualità e dalla standardizzazione delle metodologie di misura, anch'esse oggetto di norme e linee guida.

Il presente capitolo si propone pertanto di fornire una panoramica strutturata del quadro normativo e tecnico in materia di rumore aeroportuale. Verranno esaminate le principali fonti normative internazionali, europee e nazionali, nonché gli standard tecnici di riferimento per la misurazione acustica, allo scopo di chiarire il contesto regolamentare in cui si inseriscono le attività di monitoraggio e mitigazione acustica negli aeroporti.

2.1 La normativa internazionale ICAO

La regolamentazione del rumore aeroportuale a livello internazionale è guidata principalmente dall'*Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile* (ICAO), agenzia delle Nazioni Unite fondata con la Convenzione di Chicago del 1944, il cui obiettivo primario è promuovere uno sviluppo sicuro, ordinato e sostenibile del trasporto aereo civile internazionale, alla quale l'Italia

aderisce dal 1951. Tra gli obiettivi fondamentali dell'ICAO vi è la riduzione dell'impatto ambientale del trasporto aereo e l'ICAO ha attribuito crescente importanza alla mitigazione dell'inquinamento acustico, riconoscendo il rumore prodotto dagli aeromobili come uno dei principali fattori di conflitto tra sviluppo aeroportuale e popolazioni locali.

Il tema del rumore aeronautico emerge in ambito ICAO per la prima volta in modo strutturato nel 1966, in occasione della *London Noise Conference*. Nel 1968, in risposta alla crescente preoccupazione internazionale, l'ICAO costituì un comitato tecnico con il compito di elaborare metodi di misurazione del rumore, standard normativi e linee guida per gli Stati membri.

In risposta alla risoluzione A16-3 dell'Assemblea, è stata convocata a Montréal (novembre-dicembre 1969) una riunione speciale sul *Aircraft Noise in the Vicinity of Aerodromes* per esaminare i seguenti aspetti relativi ai problemi del rumore degli aeromobili:

- a) le procedure per la descrizione e la misurazione del rumore degli aerei;
- b) la tolleranza umana al rumore degli aerei;
- c) la certificazione del rumore degli aeromobili;
- d) criteri per la definizione di procedure operative per l'abbattimento del rumore degli aeromobili;
- e) controllo dell'uso del territorio;
- f) procedure di abbattimento del rumore al suolo.

Sulla base delle raccomandazioni della riunione speciale sul *Rumore degli Aeromobili in Prossimità degli Aeroporti*, sono stati elaborati progetti di norme internazionali e pratiche raccomandate per il rumore degli aeromobili. Già nel 1972 furono adottati i primi Standard internazionali per la certificazione acustica degli aeromobili, con un sistema "a classi" che si è successivamente evoluto nei *Chapters* dell'*Annex 16*.

2.1.1 *Balanced Approach* dell'ICAO

Il principale strumento strategico elaborato dall'ICAO per affrontare il rumore aeroportuale è il *Balanced Approach to Aircraft Noise Management*, approvato nel 2001 (33^a Assemblea) e successivamente riaffermato con la Risoluzione A41-20. Questo approccio stabilisce che le misure di mitigazione del rumore debbano essere selezionate in base alle caratteristiche specifiche del singolo aeroporto, bilanciando efficacia ambientale, sostenibilità economica e impatto operativo.

Le quattro aree d'intervento previste dal *Balanced Approach* sono:

- riduzione del rumore alla fonte, mediante l'adozione di tecnologie sempre più silenziose e l'introduzione di limiti normativi per la certificazione acustica degli aeromobili;
- pianificazione e gestione dell'uso del suolo (*land-use planning*) attorno agli aeroporti, con lo scopo di evitare l'insediamento di nuove abitazioni in aree ad alto impatto acustico;
- procedure operative di abbattimento del rumore (*noise abatement operational procedures*), come l'ottimizzazione delle traiettorie di decollo e atterraggio, le quote di sorvolo, l'uso di flap e potenza;
- restrizioni operative, da considerarsi come misura residuale e da applicarsi solo dopo un'attenta analisi costi-benefici, ad esempio limitazioni notturne, limiti di flotta o vincoli per aeromobili particolarmente rumorosi.



Figura 2.1: Approccio bilanciato per la gestione del rumore^[2]

Tali misure di mitigazione vengono adottate a livello di singolo aeroporto, con l'obiettivo di individuare la combinazione di interventi che massimizzi i benefici ambientali in modo efficace dal punto di vista economico. Per assistere gli aeroporti nell'attuazione degli interventi nell'ambito di questi elementi fondamentali è stato redatto un documento guida di supporto, ICAO Doc 9829 *Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management*. Il documento evidenzia che le restrizioni operative aeroportuali dovrebbero essere applicate solo come ultima risorsa, dopo che gli altri elementi sono stati presi in considerazione e applicati ove appropriato. In questo modo si riconosce il ruolo critico dell'aviazione nel sistema socio-economico globale e si riconosce che le riduzioni del rumore possono essere ottenute a un costo economico inferiore se ci si concentra maggiormente sugli altri elementi dell'approccio equilibrato.

2.1.2 *Annex 16* Volume I e certificazione acustica degli aeromobili

La normativa ICAO sul rumore trova attuazione tecnica alla Convenzione di Chicago nell'Annesso 16 *Environmental Protection*, Volume I - *Aircraft Noise*. Questo documento costituisce il riferimento normativo internazionale per la certificazione acustica degli aeromobili civili, stabilendo gli *Standard and Recommended Practices* (SARPs) relativi alla limitazione del rumore alla fonte. La finalità principale dell'*Annex 16* è assicurare che le nuove tecnologie per la riduzione del rumore siano effettivamente integrate nei progetti di aeromobili, in modo da ottenere benefici concreti per le aree circostanti agli aeroporti, e viene periodicamente aggiornato per tenere conto dei progressi tecnologici e delle esigenze ambientali emergenti. Nel 2025, l'ultima edizione disponibile dell'Annesso 16 *Environmental Protection* dell'ICAO, Volume I - *Aircraft Noise*, è l'ottava, pubblicata nel luglio 2017, frutto della continua evoluzione della prima edizione del 1981.

Il processo di certificazione acustica, formalizzato a partire dagli anni Settanta, si basa su misurazioni effettuate in tre punti di riferimento con prove svolte in condizioni standardizzate al fine di consentire confronti coerenti tra diversi velivoli. Le misurazioni esprimono il livello di pressione sonora corretto in unità EPNdB (*Effective Perceived Noise in decibels*), che tiene conto della durata e intensità spettrale del suono percepito.

Per quanto riguarda i *Noise Standards for jet and large propeller aeroplanes*, ovvero *Chapters 2, 3, 4 e 14*, il velivolo, sottoposto a prove in conformità alle dovute norme, non deve superare i livelli di rumore misurati nei seguenti punti:

1. punto di riferimento laterale per la misurazione del rumore a piena potenza:
 - per i velivoli a reazione: il punto su una linea parallela e distante 450 m dalla linea centrale della pista, in cui il livello di rumore è massimo durante il decollo;
 - per i velivoli ad elica: il punto sulla linea centrale estesa della pista 650 m verticalmente al di sotto della traiettoria di volo di salita a piena potenza al decollo.
2. punto di riferimento per la misurazione del rumore di sorvolo: il punto sulla linea centrale estesa della pista e ad una distanza di 6,5 km dall’inizio del rollio;
3. punto di riferimento per la misurazione del rumore di avvicinamento: il punto a terra, sulla linea centrale estesa della pista, a 2000 m dalla soglia. In piano corrisponde a una posizione di 120 m (394 ft) in verticale sotto il terzo percorso di discesa che ha origine da un punto a 300 m oltre la soglia.

Questi standard definiscono tre punti di misurazione di riferimento per la certificazione del rumore, illustrati nell’immagine seguente.

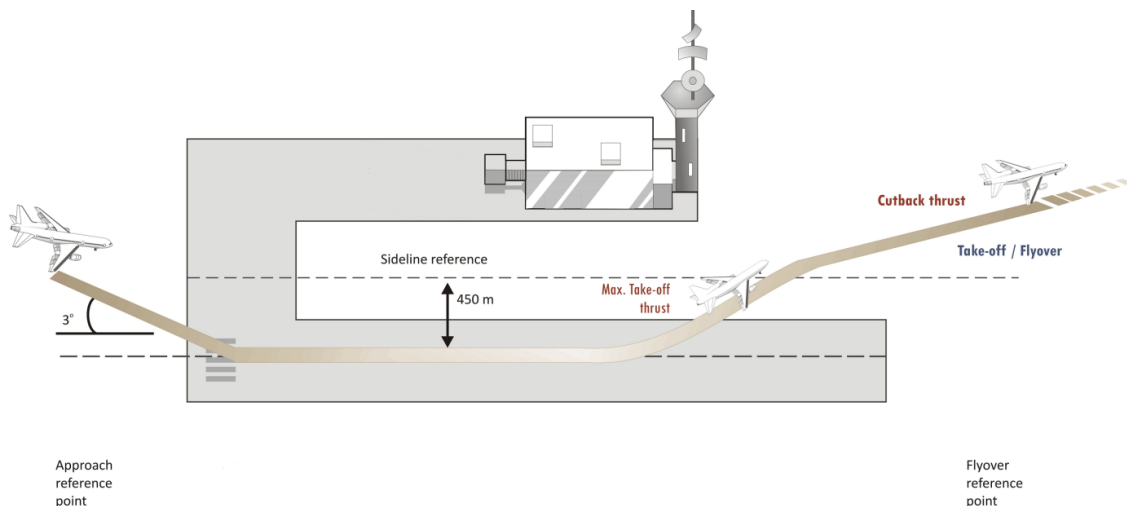


Figura 2.2: *Aircraft noise certification reference measurement points*^[3]

Le prove di certificazione prevedono quindi che le misurazioni del rumore siano effettuate a terra, per definite condizioni di riferimento, in tre punti distinti, evidenziati in rosso nella seguente immagine.

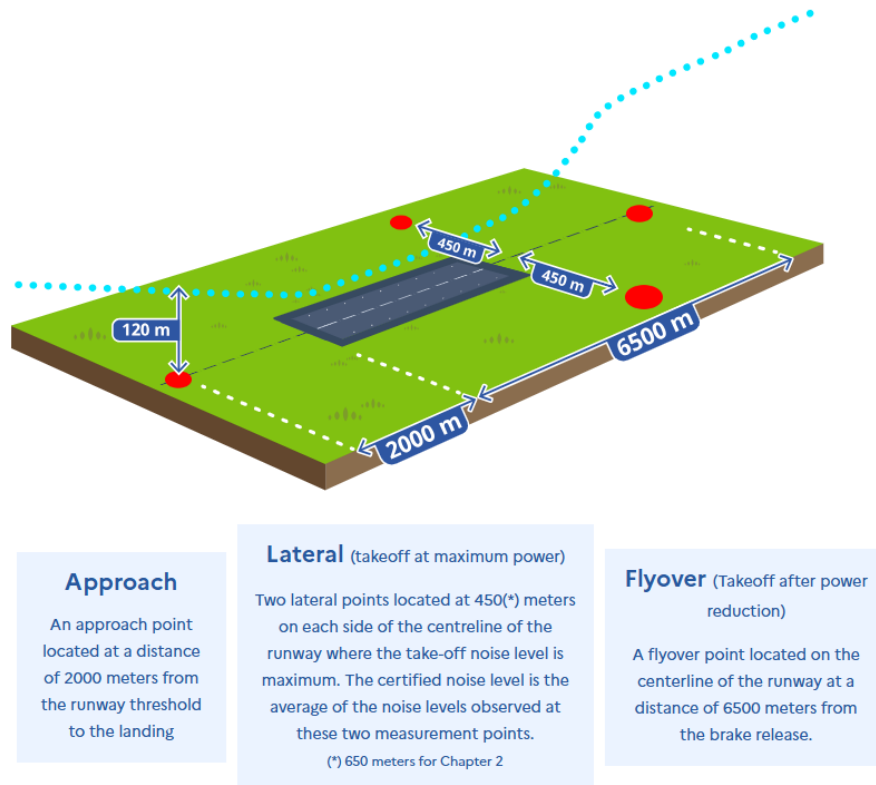


Figura 2.3: Punti di riferimento per le misurazioni^[4]

Evoluzione dei *Chapter* dell'*Annex 16* Volume I

L'*Annex 16* ha subito numerose revisioni con l'introduzione di capitoli successivi, ognuno caratterizzato da limiti più stringenti rispetto al precedente:

- *Chapter 2* (1972): introdotto nel 1972 sulla base dei lavori del *Special Meeting on Aircraft Noise in the Vicinity of Aerodromes* del 1969, ha rappresentato il primo standard formale. Includeva velivoli a getto con bassa efficienza ed elevati livelli di rumore, come il Boeing 707 o il 727. L'area di esposizione al rumore per questi aeromobili poteva superare i 14 km^2 in prossimità di aeroporti;
- *Chapter 3* (1977): ha imposto una riduzione significativa dei limiti cumulativi rispetto al *Chapter 2*, grazie all'adozione di motori turbofan a by-pass più elevato. Gli aeromobili *Chapter 3*, come l'Airbus A320 o il McDonnell Douglas MD-80, hanno introdotto importanti innovazioni tecniche che hanno permesso una riduzione dell'impronta acustica anche di un ordine di grandezza, con estensioni inferiori a 2 km^2 in molti casi;
- *Chapter 4* (2001): ha rappresentato un'ulteriore restrizione nei confronti dei nuovi progetti di aeromobili, riducendo di 10 EPNdB il limite cumulativo rispetto al *Chapter 3*. Questa nuova soglia è stata applicata ai velivoli la cui certificazione è stata richiesta dopo il 1° gennaio 2006, stimolando il miglioramento continuo delle prestazioni acustiche;
- *Chapter 14* (2013): costituisce l'attuale standard più restrittivo per i jet subsonici e i turboelica di grandi dimensioni. È obbligatorio per i nuovi progetti presentati a partire

dal 31 dicembre 2017 (o 2020 per aeromobili < 55 tonnellate). Il nuovo limite introduce una riduzione aggiuntiva di 7 EPNdB rispetto al *Chapter 4*, permettendo potenzialmente, secondo stime ICAO, la riduzione dell'esposizione per oltre un milione di persone nel periodo 2020-2036.

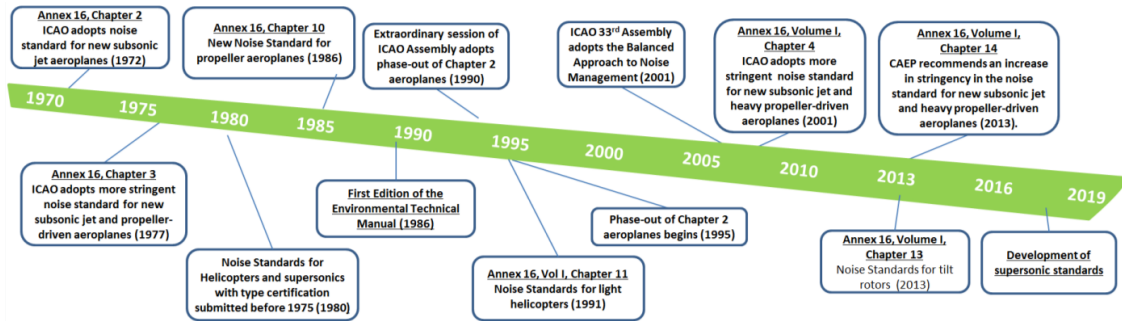


Figura 2.4: CAEP Working Group 1 milestones^[5]

Questi standard più rigorosi, assieme ai precedenti standard ICAO sul rumore per gli aeromobili, sono illustrati nell'immagine seguente, rappresentativa dell'evoluzione degli standard ICAO negli anni.

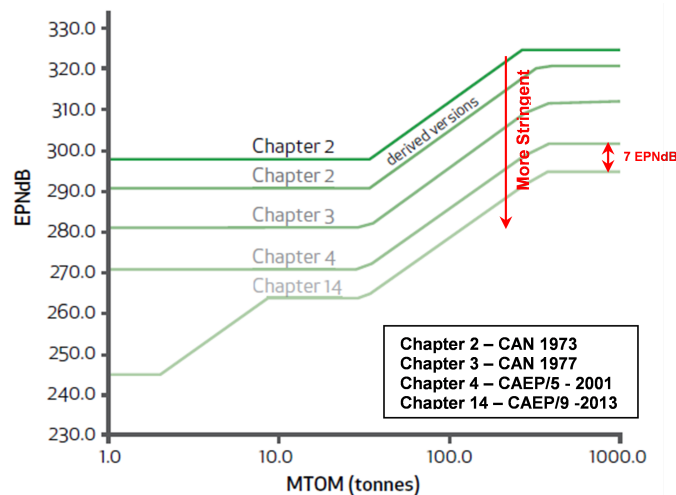


Figura 2.5: The progression of the ICAO Noise Standards for aeroplanes^[3]

Il passaggio da aeromobili *Chapter 2* a *Chapter 3* (come ad esempio da un Boeing 727 a un Airbus A320) ha prodotto una riduzione dell'area soggetta a livelli significativi di esposizione sonora **DNL** (*Day-Night Average Sound Level*), superiori a 55 dB, da oltre 14 km² a circa 1.5 km². Questo risultato non solo rappresenta un beneficio ambientale, ma testimonia anche l'evoluzione delle tecnologie propulsive e dell'aerodinamica nel corso degli ultimi decenni.

Per comprendere l'impatto che questa riduzione può avere sulla popolazione circostante il sedime aeroportuale, è stato realizzato un confronto visivo con il software QGIS che, utilizzando come riferimento l'aeroporto di Torino-Caselle, mette in evidenza la differenza tra un'area circolare di 14 km² e una di 1.5 km².

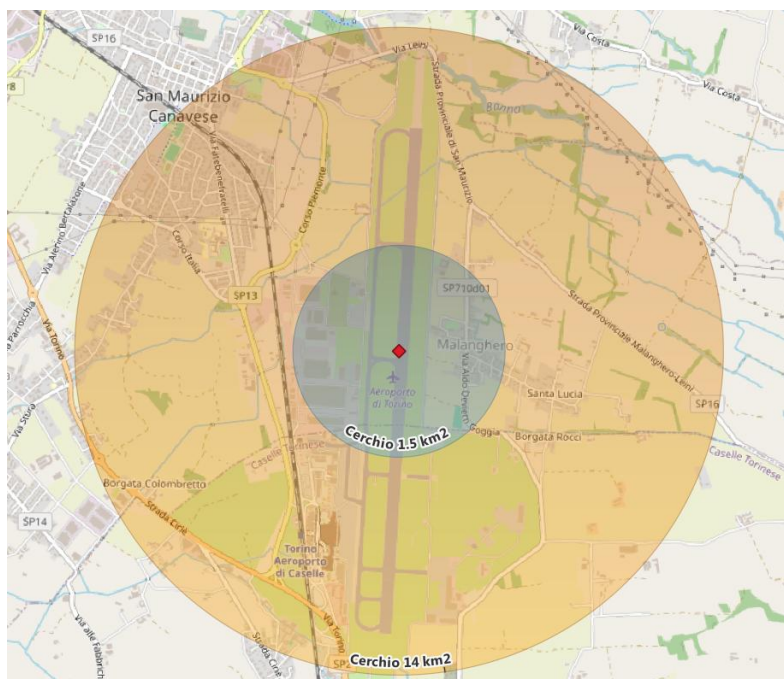


Figura 2.6: Confronto tra un'area circolare di 14 km^2 e una di 1.5 km^2

Altri *Chapter* dell'*Annex 16*

L'*Annex 16* Volume I include anche standard specifici per altre categorie di aeromobili:

- *Chapter 6* e *Chapter 10*: per i turboelica leggeri ($\text{MTOM} \leq 8618 \text{ kg}$) introdotti nel 1974 e successivamente aggiornati;
- *Chapter 8* e *Chapter 11*: per gli elicotteri, in particolare il *Chapter 8* si applica a tutti mentre il *Chapter 11* è semplificato e destinato a quelli leggeri ($< 3175 \text{ kg}$);
- *Chapter 12*: per velivoli supersonici certificati prima del 1975 (standard storico);
- *Chapter 13*: per tiltrotori (introdotta nel 2014), una tipologia ibrida elicottero-aereo.

Attualmente è in corso, in ambito ICAO, lo sviluppo di nuovi standard per aeromobili supersonici e per velivoli innovativi (UAV, VTOL), considerando le loro specificità acustiche.

Guida tecnica e implementazione

Per supportare le autorità nazionali nella corretta applicazione degli standard dell'*Annex 16*, l'ICAO ha pubblicato il Manuale Tecnico Ambientale (*Environmental Technical Manual* - Doc 9501, Volume I), che descrive le procedure da seguire per la misurazione del rumore prodotto dagli aeromobili al fine del rilascio della loro certificazione acustica, fornendo indicazioni dettagliate sulle modalità di esecuzione delle prove acustiche e sulla valutazione dei risultati.

Inoltre, è disponibile una banca dati ufficiale delle certificazioni acustiche (*NoisedB database*), accessibile al pubblico, contenente i livelli certificati di rumore per ogni tipo di aeromobile registrato. *NoisedB* è un database internazionale che raccoglie i livelli di rumore certificati degli aeromobili in base agli standard ICAO (*Annex 16, Chapters 2, 3, 4 e 14*) e FAR (*Part 36, Stage 3, 4 e 5*). È stato sviluppato dalla *Direzione Generale dell'Aviazione Civile francese DGAC*, su richiesta di ICAO

ed ECAC, per offrire una fonte ufficiale di riferimento per le autorità di controllo, aeroporti, enti locali e per la revisione degli standard di certificazione. Il database riporta, per ogni aeromobile, informazioni come livelli di rumore, peso massimo al decollo, versione, tipo di motore ed eventuali modifiche specifiche.

2.1.3 Altre iniziative ICAO e tecnologie emergenti

L'ICAO monitora costantemente l'esposizione globale al rumore e promuove obiettivi tecnologici per l'industria (*Noise Technology Goals*) con l'obiettivo di incentivare ricerca e sviluppo. Tra i temi in evoluzione figurano anche:

- la definizione di nuovi standard per velivoli supersonici;
- lo studio dell'impatto acustico dei droni e dei velivoli a decollo verticale (VTOL);
- le *best practices* per il coinvolgimento delle comunità locali.

In sintesi, il ruolo dell'ICAO in materia di rumore aeroportuale non si limita all'emanazione di standard, ma comprende una visione sistemica che integra aspetti tecnologici, operativi, urbanistici e socio-comunicativi, con l'obiettivo di una gestione sostenibile del rumore nei pressi degli aeroporti.

2.2 La normativa europea e il ruolo dell'EASA

A livello europeo, la regolamentazione in materia di rumore aeroportuale si basa sui principi stabiliti dall'ICAO ma si distingue per un livello di cogenza normativa maggiore e per un sistema istituzionale più strutturato. L'Unione Europea ha infatti adottato numerose misure legislative che recepiscono, e in alcuni casi rafforzano, le indicazioni contenute negli standard internazionali. In questo contesto, l'*Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea* (EASA) svolge un ruolo di primo piano nell'elaborazione tecnica delle normative e di certificazione in materia di aeromobili e infrastrutture aeroportuali, mentre gli atti giuridicamente vincolanti sono adottati dalle istituzioni dell'UE sotto forma di regolamenti o direttive.

L'EASA non emana direttamente leggi ma elabora:

- *Certification Specifications* (CS): specifiche tecniche per la progettazione e certificazione degli aeromobili;
- *Acceptable Means of Compliance* (AMC): soluzioni ritenute accettabili per dimostrare la conformità agli standard;
- *Guidance Material* (GM): materiale di orientamento di natura non vincolante.

Tali documenti accompagnano i regolamenti europei e ne facilitano l'applicazione tecnica da parte delle autorità competenti, degli operatori e dei costruttori.

2.2.1 Prime direttive europee sull'inquinamento acustico

Fin dagli anni Ottanta, l'Unione Europea ha intrapreso un percorso normativo finalizzato alla progressiva eliminazione degli aeromobili più rumorosi secondo le indicazioni ICAO. Le prime due direttive fondamentali in materia sono state:

- Direttiva 80/51/CEE, integrata dalla Direttiva 83/206/CEE, che ha vietato l'operatività, dal 31 dicembre 1979, degli aeromobili appartenenti al *Chapter 1* dell'*Annex 16* ICAO sul territorio comunitario;

- Direttiva 89/629/CEE, nota come direttiva “di non addizione”, che ha stabilito che tutti gli aeromobili immatricolati dopo il 1° gennaio 1990 dovessero appartenere almeno al *Chapter 3*, evitando così l'introduzione di nuovi velivoli rumorosi nel mercato europeo.

Nel 1992, con il recepimento della Risoluzione ICAO A28-3, l'Unione ha inoltre avviato il processo di eliminazione graduale degli aeromobili *Chapter 2*, fissando la scadenza definitiva per il loro utilizzo entro il 1° aprile 2002, in piena coerenza con le raccomandazioni internazionali.

Nel corso degli anni Novanta si è assistito a un diffuso tentativo da parte di alcuni operatori di estendere l'operatività di vecchi aeromobili *Chapter 2* installando silenziatori (*hush-kits*) che consentivano di raggiungere formalmente i limiti del *Chapter 3*, senza però garantire un'effettiva riduzione del rumore percepito sul territorio. Per contrastare questa pratica, l'Unione Europea ha adottato il Regolamento (CE) n. 925/1999 il quale stabiliva che, a partire dal 1° aprile 2002, gli aeromobili subsonici civili modificati e ricertificati tramite *hush-kits* non potessero più operare nei Paesi membri, con alcune limitate deroghe. L'intento della norma era duplice:

- evitare il deterioramento dell'ambiente acustico aeroportuale comunitario;
- promuovere il rinnovamento effettivo della flotta europea con aeromobili di nuova generazione.

Questa misura ha generato un contenzioso internazionale con gli Stati Uniti, dove molte compagnie facevano uso di tali tecnologie e l'industria aeronautica statunitense deteneva una posizione dominante nella produzione di *hush-kits*. Washington ha accusato l'Unione di protezionismo e ha presentato un ricorso in sede ICAO. Tuttavia, l'UE ha difeso la propria posizione sottolineando la coerenza con il principio del *Balanced Approach* e con gli obiettivi generali di tutela ambientale.

2.2.2 Direttive 2002/30/CE e 2002/49/CE sulla valutazione del rumore aeroportuale

Due ulteriori atti normativi rivestono un ruolo centrale nella regolamentazione europea del rumore aeroportuale: la Direttiva 2002/49/CE, nota come *Environmental Noise Directive* (END), e la Direttiva 2002/30/CE, dove entrambe hanno contribuito a strutturare in modo organico la politica comunitaria in materia di rumore aeroportuale.

La Direttiva 2002/49/CE ha introdotto un approccio sistematico alla valutazione, gestione e comunicazione del rumore ambientale, compreso quello generato dal traffico aeroportuale. I principali obiettivi della direttiva sono:

1. definire una metodologia comune per la valutazione del rumore ambientale e per la mappatura acustica dei territori europei;
2. determinare l'esposizione al rumore ambientale e valutarne gli effetti sulla salute a livello di singola abitazione;
3. garantire che le informazioni sul rumore ambientale e sui suoi effetti siano rese disponibili al pubblico in modo trasparente;
4. promuovere l'elaborazione di piani d'azione finalizzati a prevenire e ridurre l'esposizione nei confronti della popolazione.

La END non introduce valori limite vincolanti, ma stabilisce l'obbligo per gli Stati membri di redigere, con cadenza quinquennale, le mappe di rumore strategiche e i relativi piani di mitigazione per gli agglomerati urbani e per gli aeroporti con traffico superiore a una determinata soglia. Va a definire metodi comuni di calcolo e di rappresentazione delle curve di isolivello (isofone) attorno agli aeroporti, introducendo alcuni descrittori acustici armonizzati, in particolare:

- **Lden** (*day-evening-night level*), descrittore acustico giorno-sera-notte, per la valutazione del fastidio globale;
- **Lnight**, descrittore acustico notturno, relativo ai disturbi del sonno.

Il documento è stato integrato e aggiornato dalla Direttiva delegata (UE) 2021/1226, che ha introdotto metodi più avanzati per la valutazione del rumore, basati sui dati ANP e compatibili con le linee guida OMS.

La Direttiva 2002/30/CE disciplina l'introduzione di restrizioni operative negli aeroporti situati in zone particolarmente sensibili sotto il profilo acustico. Per la prima volta a livello europeo, il testo recepisce formalmente i principi del *Balanced Approach* ICAO, imponendo agli Stati membri di seguire un percorso decisionale strutturato che preveda:

- l'analisi delle alternative disponibili tenendo conto dell'efficacia e dell'impatto socio-economico;
- la priorità a misure meno impattanti prima di introdurre limitazioni all'operatività degli aeromobili.

La direttiva ha rappresentato un passaggio normativo essenziale in vista dell'adozione del successivo Regolamento (UE) 598/2014, che ne ha recepito e rafforzato l'impianto, armonizzando le procedure a livello comunitario.

Nel complesso, queste due direttive hanno segnato una fase di consolidamento dell'approccio normativo europeo, contribuendo a garantire una valutazione comparabile dell'impatto acustico del trasporto aereo, e fornendo agli Stati membri strumenti operativi per un'azione coerente a livello ambientale e territoriale.

2.2.3 Normativa attuale e ruolo dell'EASA

Oggi il Regolamento (UE) 598/2014 del Parlamento Europeo e del Consiglio disciplina in maniera unificata l'approccio alla gestione del rumore aeroportuale, introducendo norme e procedure per l'introduzione di restrizioni operative ai fini del contenimento del rumore negli aeroporti dell'Unione. Tale regolamento si basa esplicitamente sui principi del *Balanced Approach* ICAO e garantisce che eventuali limitazioni vengano applicate solo dopo aver valutato le alternative tecniche, gestionali e pianificatorie.

Nel quadro normativo europeo, l'EASA supporta attivamente la Commissione Europea e gli Stati membri nella valutazione tecnica delle misure e nell'aggiornamento continuo delle specifiche di certificazione (CS-36 per la rumorosità degli aeromobili). L'Agenzia contribuisce inoltre alla raccolta e diffusione di dati tecnici, alla sorveglianza post-certificazione e alla promozione di buone pratiche a livello europeo.

Obblighi normativi secondo il Regolamento (UE) 598/2014

Ai sensi dell'articolo 7 del Regolamento (UE) n. 598/2014, l'EASA è designata come ente responsabile per la gestione delle informazioni relative al rumore aeronautico. In particolare, secondo il paragrafo 2, l'EASA raccoglie e rende disponibili i dati contenuti nei certificati acustici (ANC) o nella documentazione equivalente relativi ai singoli aeromobili che operano negli aeroporti dell'Unione. Tali obblighi si applicano agli aeromobili civili ad ala fissa con massa massima certificata al decollo pari o superiore a 34.000 kg, o con una configurazione interna massima certificata di almeno 19 passeggeri, esclusi i posti dell'equipaggio. I dati raccolti devono includere:

- la nazionalità e il marchio di immatricolazione dell'aeromobile
- la documentazione sul rumore utilizzata per la certificazione

- il peso massimo al decollo
- eventuali modifiche strutturali o tecniche che influenzino le prestazioni acustiche.

I dati ANC *Aircraft Noise Certificate* sono accessibili alle autorità competenti, ai fornitori di servizi di navigazione aerea e agli operatori aeroportuali, secondo quanto stabilito dall'articolo 7, paragrafo 6, dello stesso regolamento.

Certification Specification CS-36 e Modulo 45

La *Certification Specification CS-36*, elaborata da EASA, definisce i requisiti tecnici da rispettare per la certificazione acustica degli aeromobili civili operanti negli Stati membri dell'Unione Europea. Essa costituisce il riferimento normativo europeo per dimostrare la conformità agli standard internazionali dell'*Annex 16 Volume I* dell'ICAO, relativi alla rumorosità degli aeromobili, e viene regolarmente aggiornata per recepire le evoluzioni normative internazionali.

L'ultima versione disponibile, *Amendment 6* (14 luglio 2021), incorpora le modifiche introdotte nel contesto del CAEP/11 (*Committee on Aviation Environmental Protection*), l'organismo tecnico dell'ICAO che ha approvato nuovi standard acustici e metodologie aggiornate per la misurazione del rumore aeronautico. L'adozione di CAEP/11 da parte dell'EASA garantisce un allineamento continuo tra le normative europee e quelle globali, assicurando un approccio coerente alla protezione ambientale.

La CS-36 si articola in due sezioni principali:

- *Book 1*, che specifica i requisiti obbligatori relativi al rumore nelle diverse fasi del volo (decollo, sorvolo e avvicinamento) in funzione della categoria e massa dell'aeromobile;
- *Book 2*, che contiene gli *Acceptable Means of Compliance* (AMC) e il *Guidance Material* (GM), ovvero le modalità ritenute idonee per dimostrare il rispetto dei requisiti e facilitare l'applicazione uniforme della norma da parte di progettisti, autorità e operatori.

La verifica della conformità ai criteri acustici di CS-36 costituisce la base per il rilascio del certificato acustico da parte dell'autorità competente, formalizzato tramite il Modulo 45 (EASA *Form 45*). Questo documento certifica che l'aeromobile rispetta i limiti sonori applicabili secondo la categoria ICAO corrispondente ed è pertanto idoneo all'operatività negli aeroporti dell'Unione. I dati contenuti nel Modulo 45 vengono inoltre inseriti nel database europeo del rumore aeronautico, reso accessibile per finalità regolatorie, pianificatorie e operative.

Certificazione e database acustico

Nel contesto della certificazione, l'EASA approva i livelli di rumore degli aeromobili in conformità alle norme acustiche internazionali definite nell'Annesso 16 dell'ICAO, Volume I. Questi livelli costituiscono la base per il rilascio dei certificati acustici da parte delle autorità aeronautiche nazionali degli Stati membri. A tal fine, l'EASA pubblica un database dei livelli acustici di certificazione, che comprende:

- aeromobili per i quali l'EASA ha emesso un *Type Certificate Data Sheets for Noise* (TCDSN) cioè le Schede Tecniche dei Certificati di Tipo per il Rumore (TCDSN) pubblicate sul sito web dell'EASA. Dall'Information Paper su *Issue of EASA type certificate datasheets for noise* si legge che: "La TCDSN contiene tutte le informazioni necessarie all'autorità competente dello Stato membro di registrazione per il rilascio dei certificati acustici (Modulo 45 EASA) in conformità al regolamento 1702/2003 Allegato - Parte 21, Sezione B, Capitolo I. Inoltre, la TCDSN include informazioni sul/i livello/i di rumore massimo/i consentito/i nel/i punto/i di misurazione del rumore di riferimento dal capitolo pertinente dell'Allegato 16 dell'ICAO, Volume I, e l'intervallo di confidenza del 90% associato.";

- modifiche acusticamente significative risultanti da certificati di tipo supplementare (STC);
- aeromobili e modifiche certificati in origine dagli Stati membri, prima del trasferimento di competenze all'EASA (cosiddetti “prodotti trasferiti”).

Il database è organizzato in quattro categorie: velivoli a reazione, velivoli pesanti ad elica, velivoli leggeri ad elica e aeromobili ad ala rotante ed è accessibile per finalità istituzionali e regolatorie.

Modellazione del rumore aeroportuale - dati ANP e ECAC Doc 29

Parallelamente, in base all'articolo 7, paragrafo 3, del medesimo regolamento, l'EASA ha il compito di raccogliere, verificare e rendere disponibili i dati relativi al rumore e alle prestazioni degli aeromobili ai fini della modellazione acustica. Questi dati, denominati dati ANP (*Aircraft Noise and Performance*), sono fondamentali per il calcolo delle curve di livello del rumore intorno agli aeroporti e sono utilizzati per attività di simulazione e pianificazione acustica.

Le metodologie di riferimento per la modellazione acustica sono quelle indicate nel Doc 9911 (*Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports*) dell'ICAO, nel Doc 29 dell'ECAC e nell'Allegato II della Direttiva 2002/49/CE, come aggiornato dalla Direttiva delegata (UE) 2021/1226. Quest'ultima ha introdotto metodi comuni aggiornati per la determinazione del rumore ambientale, inclusi gli aspetti legati al traffico aereo, contribuendo così a un quadro armonizzato a livello europeo. I dati ANP sono archiviati in una banca dati centralizzata gestita dall'EASA (banca dati ANP) e messi a disposizione delle autorità competenti e di altri soggetti che dimostrino una necessità documentata per fini di simulazione o pianificazione acustica aeroportuale.

L'ECAC Doc 29 *Report on standard method of computing noise contours around civil airports* rappresenta il principale riferimento europeo per la modellazione e la valutazione del rumore aeroportuale. Pubblicato dalla *European Civil Aviation Conference* (ECAC), questo documento è aggiornato regolarmente per allinearsi agli sviluppi tecnici e normativi nel settore acustico.

Il Doc 29 si compone di due volumi distinti:

- il Volume 1 fornisce una guida introduttiva e applicativa, destinata a responsabili politici, pianificatori aeroportuali e consulenti tecnici. Spiega i principi base delle mappe di rumore, i metodi di calcolo e le possibili applicazioni, mantenendo un linguaggio accessibile e pragmatico.
- il Volume 2 approfondisce gli aspetti tecnici e algoritmici, dettagliando i modelli matematici per la stima delle emissioni sonore, l'elaborazione dei dati sulle prestazioni acustiche degli aeromobili (ANP) e le procedure di validazione e verifica dei modelli.

L'obiettivo principale del documento è garantire una standardizzazione metodologica tra gli Stati membri ECAC, facilitando la comparabilità e l'affidabilità delle mappe di rumore prodotte a fini regolatori e di pianificazione territoriale. Il documento mira infatti a uniformare i metodi per calcolare il rumore aeroportuale tra i Paesi membri, assicurando mappe acustiche affidabili e confrontabili per regolamentazione e pianificazione. Stabilisce inoltre standard per modellare il rumore nelle fasi di volo, gestire dati mancanti e usare dati radar per migliorare le stime. L'applicazione pratica in Europa ha dimostrato che il Doc 29 migliora l'accuratezza delle mappe, facilitando l'analisi degli impatti e le misure di mitigazione. Infine, collega i dati tecnici raccolti alla loro applicazione concreta nel calcolo delle curve di rumore, essenziali per la tutela ambientale e la pianificazione aeroportuale.

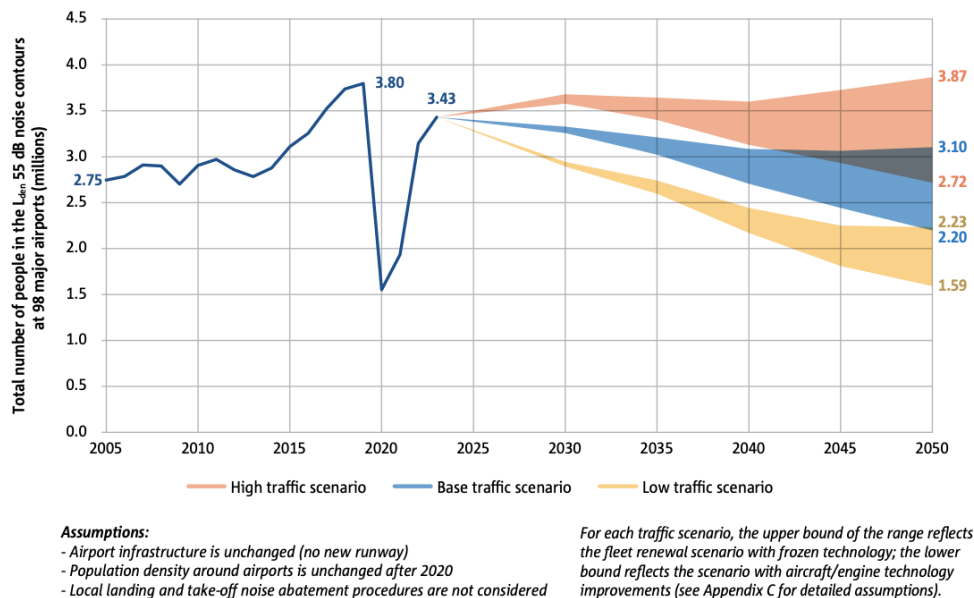
In sintesi, la normativa europea in materia di rumore aeroportuale non solo recepisce le raccomandazioni ICAO, ma le rafforza attraverso strumenti giuridicamente vincolanti, combinando approcci preventivi, tecnici e restrittivi al fine di tutelare in modo efficace l'ambiente acustico e la salute pubblica nei territori prossimi agli aeroporti.

2.2.4 Impatto del rumore secondo l'EAER 2025

L'*European Aviation Environmental Report 2025* (EAER 2025), pubblicato da EASA in collaborazione con la Commissione Europea, l'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) e EUROCONTROL, offre un quadro aggiornato dell'impatto ambientale dell'aviazione in Europa. La sezione *Noise* dedicata al rumore offre dati aggiornati sull'esposizione al rumore aeroportuale e sulle sue implicazioni sanitarie e ambientali.

Dal report si evince come, nel 2023, circa 3,4 milioni di persone che vivono nei pressi di 98 aeroporti dell'UE e dell'EFTA (*European Free Trade Association*) sono state esposte a livelli di rumore **Lden** pari o superiori a 55 dB, mentre 1,6 milioni hanno subito oltre 50 eventi sonori al giorno con picchi sopra i 70 dB **Lmax**. Sebbene tali numeri siano inferiori rispetto ai livelli pre-pandemia del 2019, in particolare -10% per **Lden**, -4% per **Lnight**, questi valori non includono le popolazioni esposte a livelli inferiori che invece possono già subire effetti negativi. L'WHO (*World Health Organization*) avverte che effetti dannosi possono verificarsi anche a soglie più basse, che ad oggi non sistematicamente monitorate.

Nel grafico seguente è rappresentata la previsione della crescita futura del traffico aereo, approssimata con 9,4, 11,8 e 13,8 milioni di voli previsti nel 2050 che corrispondono, rispettivamente, allo scenario di traffico basso, base e alto.



Indicator	Units	2005	2019	2023	2030 ⁶
Number of people inside L _{den} 55 dB airport noise contours ⁷	million	2.75	3.80	3.43	3.26
Average noise energy per operation ⁸	10 ⁹ Joules	0.76	0.68	0.63	0.55

Figura 2.7: Total number of people in the Lden 55 dB noise contours at 98 major airports^[6]

Gli scenari a lungo termine suggeriscono che, nonostante la crescita stimata del traffico entro il 2050, questo incremento non comporterà necessariamente un aumento proporzionale dell'inquinamento acustico, grazie all'introduzione progressiva di aeromobili più silenziosi. L'aggiornamento della flotta con aeromobili più silenziosi potrebbe ridurre significativamente i valori **Lden** e **Lnight**,

tuttavia i benefici non saranno equamente distribuiti: alcune aree resteranno esposte a livelli elevati di rumore, con forti disparità tra un aeroporto e l'altro.

Sul piano sanitario, inoltre, il report sottolinea che:

- l'esposizione cronica è associata a numerosi effetti negativi sulla salute quali disturbi del sonno, fastidio persistente, problemi cardiovascolari e metabolici, oltre a impatti cognitivi nei bambini;
- secondo la mappatura del 2022 prevista dall'*Environmental Noise Directive* (END), su 50 aeroporti 2,4 milioni di persone sono esposte al di sopra del valore **Lden** 55 dB e 700.000 sopra **Lnight** 50 dB. Considerando le soglie OMS, più cautelative (**Lden** > 45 dB, **Lnight** > 40 dB), il numero sale sensibilmente: 14,9 milioni di persone durante il giorno e 5,3 milioni durante la notte. Infine, le stime più recenti indicano che 649.000 persone risultano fortemente infastidite dall'esposizione a lungo termine al rumore aeronautico e 127.000 presentano disturbi del sonno clinicamente rilevanti.

Per affrontare questi problemi, il report propone un approccio integrato alla gestione del rumore aeroportuale, articolato in tre assi strategici:

1. innovazione tecnologica: introdurre aeromobili più silenziosi e anticipare standard ICAO più stringenti, con una riduzione target di almeno 6 dB entro il 2029;
2. ottimizzazione operativa: adottare rotte meno impattanti, integrare l'uso di carburanti sostenibili (SAF) e sviluppare piani d'azione acustici specifici per ciascun aeroporto per massimizzare l'effetto combinato su rumore e emissioni;
3. estensione del monitoraggio: ampliare le mappature del rumore anche sotto le soglie previste dalla Direttiva END, avvicinandosi ai limiti raccomandati dall'OMS, e rendere i dati disponibili per una pianificazione urbana più consapevole.

Queste misure, in linea con il *Balanced Approach* ICAO e con il Regolamento (UE) 598/2014, confermano l'orientamento europeo verso una gestione ambientale più sostenibile del trasporto aereo, in cui il contenimento del rumore è considerato una priorità al pari della riduzione delle emissioni climalteranti. L'obiettivo è un sistema combinato di misure preventive, tecniche e restrittive, volto a tutelare l'ambiente acustico e la salute pubblica nelle zone limitrofe agli aeroporti.

2.3 Il quadro normativo nazionale in Italia

La regolamentazione del rumore ambientale in Italia, e in particolare del rumore generato dalle attività aeroportuali, si è sviluppata in modo significativo solo a partire dalla metà degli anni '90. Prima di tale data, la normativa era frammentata e priva di un inquadramento tecnico-giuridico organico. La svolta è avvenuta con l'approvazione della Legge 26 ottobre 1995 n. 447, conosciuta come *Legge quadro sull'inquinamento acustico*, che ha introdotto una disciplina generale sul rumore ambientale applicabile a tutte le sorgenti sonore, incluse quelle aeronautiche. Questa norma ha rappresentato un punto di riferimento essenziale per l'evoluzione successiva del quadro normativo italiano, anche in funzione del progressivo allineamento con le direttive europee e le raccomandazioni dell'ICAO.

2.3.1 Struttura della normativa: principi, obblighi e strumenti tecnici

La Legge 26 ottobre 1995 n. 447 ha introdotto una distinzione concettualmente e giuridicamente fondamentale tra:

- sorgenti fisse, come le infrastrutture aeroportuali, il cui impatto acustico è legato all'organizzazione e all'operatività complessiva dello scalo;
- sorgenti mobili, rappresentate dagli aeromobili in volo, il cui contributo acustico dipende prevalentemente da caratteristiche tecnico-progettuali e operative del velivolo.

Questa differenziazione comporta l'assegnazione di competenze distinte:

- per gli aeromobili si prevede il rispetto di limiti acustici certificati a livello internazionale (secondo i livelli stabiliti dall'ICAO - *Annex 16*, Volume I) e l'eventuale imposizione di tasse sul rumore proporzionate alla loro classe acustica;
- per le infrastrutture aeroportuali, invece, la normativa impone il monitoraggio continuo delle emissioni acustiche, l'identificazione di eventuali superamenti dei limiti di legge e l'obbligo di predisporre specifici *Piani di Contenimento e Abbattimento del Rumore* (PCAR).

Tali piani, elaborati dai gestori aeroportuali in coordinamento con le amministrazioni locali e le agenzie ambientali regionali, devono includere:

- una mappatura acustica delle aree circostanti l'aeroporto, con individuazione delle principali sorgenti di disturbo;
- la pianificazione di interventi di mitigazione, sia operativi (modifica delle rotte, limitazioni notturne, ottimizzazione delle procedure di decollo e atterraggio) sia infrastrutturali (barriere antirumore, insonorizzazione di edifici sensibili);
- la destinazione obbligatoria di almeno il 5% del bilancio annuale del gestore aeroportuale ad azioni finalizzate alla riduzione dell'impatto acustico;
- una valutazione periodica dell'efficacia delle misure adottate, con aggiornamento dei piani in caso di variazioni operative significative.

A livello tecnico-operativo, la normativa è stata ulteriormente dettagliata da due provvedimenti attuativi centrali:

- il Decreto del Ministero dell'Ambiente del 31 ottobre 1997, che stabilisce le metodologie ufficiali per la misurazione del rumore aeroportuale, attraverso:
 - un particolare descrittore acustico, specifico per l'infrastruttura, ovvero il *Livello di Valutazione del rumore Aeroportuale LVA*, legato all'operatività aeroportuale;
 - il concetto di intorno aeroportuale definito come la porzione di territorio ricompresa all'interno dell'isolivello di rumore di 60 dB(A) secondo il descrittore acustico **LVA**;
 - la zonizzazione acustica aeroportuale, vero e proprio strumento urbanistico.
- il D.P.R. 11 dicembre 1997 n. 496, che detta le norme per la riduzione dell'inquinamento acustico prodotto dagli aeromobili civili e istituisce le Commissioni aeroportuali.

Le Commissioni aeroportuali, operative presso ogni scalo civile aperto al traffico commerciale, hanno il compito di:

- elaborare e aggiornare le procedure antirumore specifiche per l'aeroporto di competenza;
- definire le zone di rispetto acustico, ovvero aree soggette a differenti livelli di tutela in base al valore del descrittore **LVA**, suddivise come segue:
 - Zona A: $LVA \leq 65 \text{ dB(A)}$

- Zona B: $65 < \mathbf{LVA} \leq 75$ dB(A)
- Zona C: $\mathbf{LVA} > 75$ dB(A)
- proporre eventuali misure operative restrittive, come limitazioni notturne, rotte alternative, obblighi di utilizzo di flap ridotti;
- fornire pareri tecnici su nuove opere infrastrutturali e piani urbanistici nelle aree limitrofe allo scalo.

La composizione delle Commissioni è interdisciplinare e comprende un rappresentante del Ministero dell'Ambiente, l'ENAC in qualità di autorità aeronautica nazionale, l'ENAV per l'aspetto della navigazione aerea, le ARPA regionali per la competenza tecnica in materia di monitoraggio ambientale, i rappresentanti degli enti locali (Regione, Provincia, Comuni), i gestori aeroportuali e i vettori aerei operanti sullo scalo.

L'attività di queste commissioni è cruciale per garantire che le misure antirumore siano tecnicamente fondate, contestualizzate rispetto alle caratteristiche operative dell'aeroporto e condivise tra tutti i soggetti coinvolti.

2.3.2 Criticità applicative, giurisprudenza e allineamento europeo

Nonostante la normativa italiana sul rumore aeroportuale presenti una struttura formalmente completa e coerente, l'attuazione pratica delle misure previste risulta spesso problematica, a causa di una serie di ostacoli amministrativi, giuridici e istituzionali. Uno dei principali elementi di criticità riguarda l'operatività delle Commissioni aeroportuali, che pur essendo previste dal D.P.R. 496/1997 non risultano attive o regolarmente funzionanti in tutti gli scali. Questo ha determinato un'applicazione disomogenea delle procedure antirumore e un rallentamento nella definizione e nell'aggiornamento delle zone di rispetto acustico, nonché nella predisposizione e revisione dei *Piani di Contenimento e Abbattimento del Rumore* (PCAR).

Le principali criticità applicative emerse nel contesto nazionale includono:

- la mancata istituzione o la funzionalità discontinua delle Commissioni aeroportuali in diversi aeroporti;
- la carente integrazione tra gli strumenti urbanistici comunali e la pianificazione acustica aeroportuale;
- la scarsa disponibilità di dati aggiornati e sistemi automatici di monitoraggio in tempo reale nei piccoli e medi aeroporti;
- il mancato coordinamento tra enti locali, gestori e autorità centrali, che ostacola la coerenza delle politiche di contenimento;
- una generale assenza di controlli sanzionatori sistematici, che indebolisce l'effettività della normativa.

A tali difficoltà si aggiunge un contenzioso giurisprudenziale rilevante, che ha coinvolto in particolare:

- le limitazioni operative in fascia notturna (22:00-06:00), spesso contestate dalle compagnie aeree per motivi economici e di connettività;
- l'introduzione di procedure antirumore obbligatorie, come l'utilizzo di rotte più lunghe o profili di discesa ripidi, impugnate per presunta violazione della libertà di esercizio;
- i vincoli derivanti dalla zonizzazione acustica, che in alcuni casi hanno generato ricorsi da parte di enti territoriali o soggetti privati coinvolti nella pianificazione urbanistica.

Diversi di questi ricorsi hanno avuto esito sospensivo da parte dei *Tribunali Amministrativi Regionali* (TAR), contribuendo a creare un clima di incertezza normativa e operativa. Questo quadro, oltre a compromettere l'uniformità applicativa delle misure antirumore, ha rallentato l'effettiva implementazione delle strategie di mitigazione, in particolare negli scali di medie dimensioni con volumi di traffico crescenti.

Parallelamente, l'Italia ha operato un progressivo allineamento con il quadro normativo europeo, recependo la Direttiva 2002/49/CE attraverso il Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n. 194. Tale decreto ha introdotto obblighi per gli aeroporti civili con più di 50.000 movimenti all'anno, imponendo:

- la realizzazione di mappe acustiche strategiche, con valutazioni quantitative del numero di persone esposte a specifici livelli di rumore (indicatori **Lden** e **Lnight**);
- l'elaborazione di piani d'azione quinquennali, contenenti interventi correttivi per ridurre l'esposizione della popolazione e migliorare la qualità acustica dell'ambiente;
- la partecipazione pubblica, attraverso consultazioni aperte ai cittadini e agli enti interessati.

L'impianto è stato ulteriormente aggiornato dal D.Lgs. 17 febbraio 2017 n. 42, che ha migliorato l'integrazione tra mappature acustiche, pianificazione urbanistica e monitoraggio ambientale, rafforzando la funzione della Commissione tecnica di supporto istituita presso il Ministero dell'Ambiente.

Tuttavia, anche a livello europeo permangono difficoltà applicative a livello locale, come emerge nel *Report from the Commission to the European Parliament and the Council: On the Implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive 2002/49/EC*. Queste complicazioni sono dovute principalmente a:

1. disomogeneità tra regioni e aeroporti nella capacità tecnica e amministrativa di produrre mappe e piani secondo gli standard richiesti;
2. scarsa interoperabilità dei dati acustici, che rende difficile il confronto tra scali o tra Stati membri;
3. ritardi nell'aggiornamento dei piani d'azione, spesso dovuti a mancanza di fondi o priorità politiche.

Un ulteriore elemento di complessità è legato alla competenza concorrente tra Stato e Regioni, prevista dalla Costituzione italiana: mentre lo Stato definisce i principi fondamentali in materia ambientale, le Regioni sono chiamate a legiferare in dettaglio. Questo meccanismo ha generato difformità nella classificazione acustica dei territori, nella gestione delle reti di monitoraggio e nella capacità di attuazione dei PCAR, incidendo negativamente sull'uniformità del sistema normativo e sull'efficacia complessiva delle politiche antirumore.

2.3.3 Parametri acustici per la valutazione del rumore aeroportuale

La valutazione del rumore generato dalle attività aeroportuali si basa sull'impiego di specifici descrittori acustici, standardizzati a livello nazionale e internazionale. Questi parametri, elaborati a partire dai dati misurati tramite fonometri e centraline di monitoraggio, permettono una caratterizzazione oggettiva e confrontabile del disturbo sonoro. Il loro utilizzo è disciplinato sia dal D.M. 31 ottobre 1997 (specifico per il rumore aeroportuale) sia dal D.M. 16 marzo 1998 (di riferimento generale per le misurazioni in acustica ambientale).

Di seguito si riportano i principali parametri:

1. $L_{Aeq,T}$ Livello equivalente continuo ponderato A

Il $L_{Aeq,T}$ (*A-weighted Equivalent Continuous Sound Level*) rappresenta il livello costante di pressione sonora ponderata A che, mantenuto per un intervallo di tempo T, avrebbe la stessa energia del segnale sonoro reale e variabile nel tempo. È definito come:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (2.1)$$

dove:

- t_1 è l'istante iniziale dell'intervallo di tempo considerato mentre t_2 è l'istante finale;
- $p(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata A del segnale acustico in Pascal (Pa);
- $p_0 = 20 \mu Pa$ è la pressione sonora di riferimento.

È l'indicatore di base per:

- la quantificazione dell'esposizione sonora media;
- la valutazione della conformità ai limiti normativi;
- la base per il calcolo di altri descrittori come **SEL**, **Lden** e **LVA**.

2. **SEL** Livello di Esposizione Sonora

Il **SEL** (*Sound Exposure Level*) è il livello energetico integrato su un singolo evento sonoro, espresso come livello equivalente su un periodo di riferimento unitario (1 secondo). Ha la funzione di rappresentare, in modo normalizzato, l'impatto energetico di eventi a durata limitata ma potenzialmente intensi. Si calcola come:

$$SEL = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (2.2)$$

dove t_0 è la durata di riferimento, generalmente 1 secondo. Il **SEL** consente il confronto diretto tra eventi di diversa durata, rendendo omogenea la valutazione del loro contributo al disturbo acustico.

3. **LVA** Livello di Valutazione del Rumore Aeroportuale

Il **LVA** è il descrittore acustico, espresso in dB(A), utilizzato per determinare le curve di isolivello e definire le zone di rispetto acustico attorno agli aeroporti, secondo quanto previsto dall'allegato A del D.M. 31 ottobre 1997. Il calcolo del **LVA** segue una procedura codificata la quale si articola come segue:

- (a) l'anno di riferimento è suddiviso in tre quadrimestri:
 - I quadrimestre: dal 1° ottobre al 31 gennaio;
 - II quadrimestre: dal 1° febbraio al 31 maggio;
 - III quadrimestre: dal 1° giugno al 30 settembre;
- (b) per ciascun quadrimestre si seleziona una settimana rappresentativa, cioè quella con il maggior numero di movimenti aerei, risultando in un totale di tre settimane di osservazione (21 giorni complessivi);
- (c) ogni giorno viene suddiviso in due fasce temporali:
 - periodo diurno: dalle 06:00 alle 23:00, della durata di 61.200 secondi;
 - periodo notturno: dalle 23:00 alle 06:00, della durata di 25.200 secondi;

(d) per ciascun movimento aereo all'interno dei due periodi, il sistema di monitoraggio fornisce:

- il numero totale di movimenti diurni e notturni;
- i valori di **SEL** associati a ciascun evento sonoro.

Per ciascun giorno viene calcolato un valore giornaliero LVA_j che tiene conto del contributo energetico dei movimenti diurni e notturni, pesati in base alla fascia oraria. Infine, il LVA complessivo di legge è ottenuto come media logaritmica dei valori giornalieri LVA_j relativi ai 21 giorni osservati, secondo la formula:

$$L_{VA} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{L_{VA_j}/10} \right] \quad (2.3)$$

dove:

- $N = 21$ è il numero di giorni complessivi analizzati;
- LVA_j è il valore calcolato per ciascun giorno, tenendo conto delle penalizzazioni orarie.

Questa metodologia consente di stimare l'impatto acustico aeroportuale sulla base del periodo di massimo traffico e di costruire le curve LVA utilizzate per delimitare le zone A, B e C attorno allo scalo.

4. **Lden** Livello diurno-serale-notturno

Il **Lden** esprime l'esposizione media al rumore su 24 ore, suddividendo la giornata in tre fasce:

- 06:00-18:00 (giorno) → nessuna penalizzazione;
- 18:00-22:00 (sera) → +5 dB di penalizzazione;
- 22:00-06:00 (notte) → +10 dB di penalizzazione.

Questa ponderazione riflette la maggiore sensibilità al disturbo nelle ore serali e notturne e prevede la seguente definizione:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \right] \quad (2.4)$$

Il Lden è utilizzato per:

- la mappatura strategica del rumore negli aeroporti con oltre 50.000 movimenti annui,
- la valutazione del numero di persone esposte a specifici livelli sonori,
- la prioritizzazione delle azioni nei piani di risanamento.

Rispetto al LVA italiano (usato per la zonizzazione), il Lden è più articolato nel tempo e armonizzato a livello europeo.

5. **Lnight** Livello notturno

Il **Lnight** rappresenta il livello equivalente di rumore tra le ore 23:00 e 06:00, senza penalizzazioni aggiuntive. Viene usato per:

- valutare il disturbo al sonno e i rischi sanitari associati,
- definire le priorità d'intervento nei piani d'azione quinquennali.

Secondo le linee guida dell'OMS, è raccomandato che il **L_{night}** non superi i 40 dB(A) in aree residenziali, per evitare effetti avversi sulla salute.

Nella tabella seguente è riassunta la differenza tra i descrittori acustici LVA e LAeq,Tr.

DESCRITTORE	PERIODO TEMPORALE		VALORE NORMATO
	Diurno	Notturmo	
LAeqD	06:00 – 22:00		Valore diurno
LAeqN		22:00 – 06:00	Valore notturno
L _{vaj}	06:00 – 23:00	23:00 – 06:00	Valore calcolato su base giornaliera ma non normato
L _{va}	21 giorni individuati secondo le specifiche del DM 31/10/1997		Calcolato come somma energetica dei 21 valori di L _{vaj} – normato su 21 giorni e per specifica zona di territorio

Figura 2.8: Differenza tra LVA e LAeq,Tr^[7]

Nel complesso, il quadro normativo italiano sul rumore aeroportuale si presenta come formalmente completo e tecnicamente aggiornato, ma applicato in maniera discontinua a causa di ostacoli organizzativi, amministrativi e giurisprudenziali. La reale efficacia delle misure di contenimento acustico dipende in larga misura dalla capacità di cooperazione tra gli enti coinvolti, quali le autorità aeroportuali, gli organismi tecnici, i gestori, le amministrazioni locali, e dalla volontà politica di coniugare sviluppo del trasporto aereo e tutela ambientale. L'integrazione con le politiche europee rappresenta una leva importante per rafforzare gli strumenti di regolamentazione ambientale in ambito aeroportuale, promuovendo un approccio sostenibile e condiviso alla gestione del rumore.

Si deve evidenziare che la normativa prevede l'esclusione dei movimenti aeronautici militari dal computo delle emissioni sonore complessive. Il D.Lgs. 13/2005 (attuazione della Direttiva 2002/30/CE) stabilisce espressamente che: "Le disposizioni del presente decreto non si applicano alle emissioni acustiche dei voli di Stato e dei voli effettuati per fini di preminente interesse pubblico, di sicurezza nazionale, di emergenza, di soccorso, di protezione civile, di pubblica sicurezza e militari" (art. 2, c. 2).

2.4 La dimensione tecnica della gestione del rumore aeroportuale

Oltre agli aspetti regolatori e istituzionali, la gestione del rumore aeroportuale richiede un'attenta considerazione degli aspetti tecnici connessi alla misurazione e al monitoraggio acustico. Infatti, la valutazione dell'impatto sonoro prodotto dalle attività aeroportuali si basa su dati raccolti attraverso una rete di strumenti specifici, progettati per garantire misurazioni precise, affidabili e ripetibili. Questi strumenti includono microfoni, fonometri e centraline acustiche fisse che devono rispettare rigorosi standard tecnici internazionali, al fine di assicurare la comparabilità dei risultati sia nel tempo sia tra diversi siti di monitoraggio. L'accuratezza nella rilevazione del rumore è

fondamentale per una corretta interpretazione dei dati e per l'applicazione di efficaci misure di mitigazione, con l'obiettivo ultimo di minimizzare l'impatto acustico sugli abitanti e sull'ambiente circostante.

2.4.1 Standard internazionali: ISO e IEC

Le normative internazionali giocano un ruolo centrale nella gestione del rumore ambientale, sia come base per lo sviluppo delle normative nazionali, sia come riferimento per la standardizzazione delle procedure e degli strumenti. In particolare, due organismi internazionali forniscono i riferimenti fondamentali:

- ISO (*International Organization for Standardization*), che si occupa principalmente di metodologia di misura e valutazione;
- IEC (*International Electrotechnical Commission*), che definisce gli standard per la strumentazione, in particolare i fonometri. In Italia, il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) è il Comitato Nazionale membro della IEC.

Questi standard internazionali garantiscono la ripetibilità delle misure, la comparabilità dei dati tra Paesi e l'affidabilità tecnica delle valutazioni acustiche.

Norme tecniche ISO: metodologie per la valutazione e il calcolo

Le norme tecniche ISO forniscono le basi tecniche per misurare, analizzare e modellare il rumore ambientale e aeroportuale. Tra le più rilevanti:

- ISO 1996 - Acustica: descrizione, misurazione e valutazione del rumore ambientale
È la norma di riferimento più importante per la caratterizzazione del rumore ambientale e si articola in tre parti:
 - ISO 1996-1:2016 *Basic quantities and assessment procedures*, definisce le grandezze acustiche fondamentali;
 - ISO 1996-2:2017 *Determination of sound pressure levels*, prevede la raccolta e l'interpretazione dei dati in funzione dell'uso del territorio;
 - ISO 1996-3:1987 *Application to noise limits*, è stata ritirata e attualmente non esiste una nuova versione approvata come norma tecnica ma vi è una PAS (*Publicly Available Specification*):
 - ISO/PAS 1996-3:2022 *Objective method for the measurement of prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq*, introduce un metodo oggettivo per misurare la prominenza dei suoni impulsivi e determinare un'eventuale correzione del valore LAeq.

È in costante aggiornamento, per adattarsi all'evoluzione della strumentazione digitale e all'identificazione automatica di componenti tonali o impulsive.

- ISO 3891 - Acustica: procedura per descrivere il rumore degli aeromobili sentito a terra
Questa norma, anch'essa ritirata, tratta specificamente la misurazione e descrizione del rumore prodotto dagli aeromobili durante il volo, così come percepito a terra. Include indicazioni su:
 - acquisizione dei dati sonori in base alle condizioni operative dell'aeromobile;
 - modalità di registrazione e posizionamento dei microfoni;

- elaborazione dei risultati.
- ISO 9613 - Acustica: attenuazione del suono durante la propagazione all'aperto
Fornisce un modello previsionale per calcolare come il suono si attenua mentre si propaga in ambiente aperto, cioè tra la sorgente sonora e il punto di ricezione, ed è composta da:
 - ISO 9613-1:1993 *Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, riguarda l'assorbimento atmosferico del suono, cioè la perdita di energia sonora dovuta all'interazione con l'aria, in funzione di frequenza del suono, temperatura dell'aria, umidità relativa e pressione atmosferica;
 - ISO 9613-2:2024 *Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors*, fornisce un metodo generale per il calcolo dell'attenuazione totale del suono lungo il percorso sorgente-ricevente, includendo effetti come la divergenza geometrica, l'assorbimento del suolo, la presenza di barriere e la perdita energetica nell'atmosfera.

Norme IEC: classificazione e prestazioni dei fonometri

Le normative IEC garantiscono che gli strumenti di misura impiegati per le valutazioni acustiche siano conformi a specifiche tecniche minime, soprattutto per quanto riguarda precisione, ripetibilità e risposta in frequenza/tempo. Tra le più rilevanti:

- IEC 60651 - Misuratori di livello sonoro (fonometri)
La presente norma, ritirata, definisce le categorie di precisione dei fonometri (classi 0, 1, 2, 3) e specifica le seguenti caratteristiche dei fonometri:
 - a) caratteristiche direzionali
 - b) caratteristiche di ponderazione in frequenza
 - c) caratteristiche di ponderazione temporale, rilevatore e indicatore;
 - d) sensibilità a vari ambienti.

Pubblicata inizialmente nel 1979, è stata successivamente aggiornata fino al 2001, venendo poi ritirata nel 2002 con l'introduzione della norma IEC 61672, che ha unificato le specifiche precedenti includendo anche quelle della IEC 60804.

- IEC 60804 - Fonometri integratori mediatori
In accordo con le principali prescrizioni della IEC 60651, questa norma descrive gli strumenti per la misura dei livelli di pressione sonora ponderata in frequenza e mediata nel tempo. Si può considerare un'estensione della precedente, ma "specifica le caratteristiche supplementari necessarie per la misura del livello continuo equivalente dei rumori stazionari, intermittenti, fluttuanti e impulsivi"^[8]. Pubblicata inizialmente nel 1985, costituiva la base per le misure ambientali continuative e rappresentava lo standard tecnico più diffuso per i monitoraggi aeroportuali. È stata successivamente aggiornata fino al 2001, venendo poi ritirata nel 2002 con l'introduzione della norma IEC 61672.
- IEC 61672 - Elettroacustica: fonometri
Sostituisce le due precedenti pertanto è l'unica norma attualmente valida per la certificazione dei fonometri. È suddivisa in tre parti:
 - IEC 61672-1:2013 *Specifications*, descrive le specifiche tecniche che un fonometro deve possedere per essere conforme;
 - IEC 61672-2:2013 *Pattern evaluation tests*, illustra le prove da effettuare sui nuovi modelli di fonometro;

- IEC 61672-3:2013 *Periodic tests*, regola le procedure di taratura periodica degli strumenti già in uso.

Questa norma, introdotta nel 2002, ha portato a specifiche più severe, l'eliminazione della classe 3 (non più accettabile) e criteri di qualità e stabilità più rigorosi, per garantire maggiore affidabilità nel lungo termine.

2.4.2 Quadro europeo: Direttiva 2015/996

Nel contesto delle misurazioni acustiche ambientali, un ruolo centrale è svolto dalla Direttiva (UE) 2015/996 in attuazione della Direttiva 2002/49/CE, che ha introdotto i metodi comuni per la determinazione del rumore ambientale con l'obiettivo di armonizzare le modalità di valutazione acustica in tutti gli Stati membri. Il suo impatto non si limita agli aspetti modellistici e previsionali, ma si estende anche agli strumenti tecnici utilizzati per la misurazione, imponendo indirettamente standard elevati di precisione e compatibilità.

Elemento centrale della direttiva è il modello CNOSSOS-EU (*European Commission developed Common NOise aSSessment methOdS*), che fornisce un quadro tecnico uniforme per il calcolo del rumore generato da sorgenti quali traffico stradale, ferroviario, industriale e aeroportuale. L'adozione di questo metodo è diventata obbligatoria a partire dal 31 dicembre 2018 per la redazione delle mappe acustiche strategiche previste dalla direttiva madre, con l'obiettivo di standardizzare i criteri di calcolo e garantire la comparabilità dei risultati.

Nel contesto aeroportuale, CNOSSOS-EU fornisce un approccio tecnico standardizzato per stimare l'esposizione al rumore a partire da:

- l'integrazione con profili di volo standardizzati e curve di emissione acustica coerenti con le procedure ICAO (*Annex 16 - Volume I*);
- i criteri tecnici per il calcolo dei livelli di rumore generati nelle principali fasi operative del volo (decollo, atterraggio, rullaggio);
- l'utilizzo di dati operativi reali di traffico (numero di movimenti, tipo di aeromobile, fascia oraria);
- l'applicazione di modelli previsionali di propagazione del suono basati sulla norma ISO 9613-2, che considerano fattori come la topografia, la superficie del suolo, la presenza di ostacoli e le condizioni meteorologiche.

Sebbene non prescriva direttamente le caratteristiche della strumentazione fisica (microfoni, fonometri, centraline), l'adozione del metodo CNOSSOS-EU richiede che la raccolta dei dati avvenga mediante strumentazione conforme agli standard internazionali ISO e IEC, in grado di fornire misure precise, continue e riferibili a parametri acustici normalizzati.

In definitiva, pur non dettando specifiche costruttive per i singoli strumenti, la Direttiva 2015/996 esercita un'influenza determinante sulla scelta e sull'adeguatezza della strumentazione acustica impiegata nei monitoraggi ambientali. L'uniformità nei metodi di calcolo si traduce quindi anche in requisiti di compatibilità e prestazione per gli strumenti impiegati nei sistemi di monitoraggio acustico aeroportuale. L'affidabilità dei dati prodotti dai modelli CNOSSOS-EU è infatti strettamente legata alla qualità e alla conformità degli strumenti utilizzati in campo, che devono rispettare standard internazionali condivisi per assicurare risultati scientificamente validi, legalmente riconosciuti e comparabili a livello europeo.

2.4.3 Quadro nazionale: D.M. 16 marzo 1998

In Italia, il riferimento principale per la misurazione dell'inquinamento acustico è il Decreto del Ministero dell'Ambiente del 16 marzo 1998 *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*. Questo decreto stabilisce i criteri operativi e i requisiti minimi degli strumenti utilizzati per le misure acustiche in contesto ambientale, conferendo validità giuridica ai rilievi eseguiti nel rispetto delle disposizioni tecniche.

Secondo l'articolo 3 del decreto, la strumentazione deve appartenere alla Classe 1, come definita dalle norme EN 60651/1994 e EN 60804/1994, sia per quanto riguarda i fonometri utilizzati per la misura diretta del livello equivalente **Leq**, sia per le eventuali catene di registrazione, che devono avere una risposta in frequenza conforme e una dinamica adeguata al fenomeno acustico da misurare. In caso di utilizzo di sistemi di registrazione e riproduzione, devono essere registrati anche i segnali di calibrazione prima e dopo ogni sessione di misura e l'utilizzo del registratore va esplicitato nel rapporto di misura.

I componenti della catena di misura devono rispettare ulteriori requisiti normativi specifici:

- i filtri devono essere conformi alla norma EN 61260/1995 (IEC 1260);
- i microfoni devono essere conformi alle norme della serie EN 61094 (parti 1, 2, 3 e 4);
- i calibratori acustici devono essere conformi alle norme CEI 29-4, successivamente corretta in CEI 29-14.

Il decreto stabilisce inoltre l'obbligo di calibrazione della strumentazione prima e dopo ogni ciclo di misura tramite un calibratore di Classe 1 conforme alla IEC 942/1988 (oggi sostituita dalla IEC 60942): le misure sono considerate valide solo se la differenza tra le due calibrazioni non supera 0,5 dB.

Per garantire la qualità metrologica nel tempo, il decreto prevede che tutti gli strumenti e sistemi di misura siano dotati di certificato di taratura e che vengano sottoposti a controlli periodici almeno biennali, da eseguire presso laboratori accreditati secondo la Legge 11 agosto 1991 n. 273 sul Sistema nazionale di taratura.

Infine, l'utilizzo di componenti aggiuntivi nella catena di misura (non esplicitamente previsti dalle norme citate) è ammesso solo a condizione che vengano rispettati i limiti di tolleranza previsti per la Classe 1.

Il Decreto stabilisce anche requisiti stringenti per l'esecuzione di misurazioni acustiche in ambiente esterno, al fine di garantire la rappresentatività dei dati raccolti e la loro ripetibilità nel tempo. Per quanto riguarda le condizioni meteorologiche ammissibili affinché le misure siano valide, è necessario che:

- le misurazioni devono essere eseguite in assenza di precipitazioni, nebbia e neve;
- la velocità del vento non deve superare i 5 m/s;
- il microfono deve essere sempre dotato di cuffia antivento;
- la strumentazione impiegata deve essere compatibile con le condizioni climatiche del periodo di misura, conforme alle norme CEI 29-10 e EN 60804/1994.

Tali prescrizioni sono essenziali per ridurre le alterazioni nei livelli rilevati dovute a fenomeni meteorologici e atmosferici che influenzano la propagazione del suono, così da garantire la qualità dei dati fonometrici raccolti.

In conclusione, si osserva come, in base alle normative italiane e internazionali, la strumentazione di rilevamento acustico utilizzata per la misura del rumore aeroportuale debba rispondere a precisi requisiti tecnici per garantire la validità legale e scientifica delle misure. In particolare, è necessario l'impiego di:

- fonometri conformi alla IEC 61672-1, di Classe 1, per garantire accuratezza metrologica;
- microfoni calibrati secondo la norma IEC 61094, adatti alla risposta in frequenza richiesta;
- calibratori acustici rispondenti alla IEC 60942, utilizzati per la verifica pre e post misura.

2.4.4 Taratura e verifica metrologica degli strumenti di misura

Affinché le misurazioni acustiche abbiano validità tecnica e giuridica, è indispensabile che la strumentazione utilizzata sia sottoposta a regolare taratura e verifica metrologica, secondo quanto stabilito dalle normative internazionali e nazionali di riferimento.

A livello internazionale, i riferimenti principali per la taratura della strumentazione acustica sono:

- IEC 60942:2017 - Elettroacustica: calibratori del suono
Definisce le caratteristiche dei calibratori acustici, specificando le classi di precisione (Classe LS, 1 e 2) e i margini di tolleranza ammessi;
- IEC 61672-3:2013, già citata nel paragrafo 2.4.1
Regola i test periodici sui fonometri, stabilendo le modalità con cui verificarne la risposta in frequenza, la linearità dinamica e l'accuratezza complessiva, mediante confronto con segnali campione;
- ISO/IEC 17025 - Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura
Norma generale per l'accreditamento dei laboratori di taratura, che garantisce la tracciabilità dei risultati e l'affidabilità dei certificati rilasciati.

A livello nazionale, il riferimento più importante è l'articolo 2 del D.M. 16 marzo 1998 che impone: "Gli strumenti ed i sistemi di misura devono essere provvisti di certificato di taratura e controllati almeno ogni due anni per la verifica della conformità alle specifiche tecniche. Il controllo periodico deve essere eseguito presso laboratori accreditati da un servizio di taratura nazionale ai sensi della legge 11 agosto 1991, n. 273."

Il certificato di taratura è rilasciato da ACCREDIA, "l'Ente Unico di accreditamento designato dal Governo italiano ad attestare la competenza e l'imparzialità degli organismi e dei laboratori che verificano la conformità dei beni e dei servizi alle norme"^[9]. Consiste in un'associazione riconosciuta, senza scopo di lucro, che opera sotto la vigilanza del Ministero delle Imprese e del Made in Italy e che opera in conformità al Regolamento europeo CE 765/2008 e alla norma internazionale ISO/IEC 17011.

L'insieme di queste prescrizioni tecniche costituisce la base per la qualità metrologica del dato acustico: solo strumenti periodicamente verificati e correttamente calibrati possono fornire misurazioni affidabili, comparabili nel tempo e utilizzabili sia per finalità regolatorie, sia per attività di pianificazione e progettazione ambientale.

2.4.5 Applicazioni pratiche della tecnologia di monitoraggio

I dati raccolti tramite le reti di monitoraggio acustico non solo rappresentano un elemento di controllo regolamentare ma costituiscono una risorsa fondamentale per le attività di progettazione e gestione aeroportuale. L'analisi continua delle misurazioni permette di individuare le aree più critiche in termini di esposizione sonora, fornendo informazioni dettagliate sul contributo acustico delle diverse fasi operative del velivolo. Queste informazioni sono essenziali per sviluppare interventi mirati di mitigazione, come l'adozione di barriere acustiche o la modifica dei percorsi di volo. Inoltre, l'integrazione tra dati di monitoraggio e modelli previsionali permette di supportare

le decisioni degli uffici tecnici aeroportuali, migliorando la pianificazione territoriale e riducendo l'impatto ambientale in modo sostenibile e conforme alle normative vigenti.

L'inquadramento tecnico e normativo della strumentazione acustica costituisce un elemento cardine per garantire l'affidabilità delle misurazioni e la solidità dei processi decisionali in materia di rumore aeroportuale. Il rispetto delle norme internazionali (ICAO, IEC, ISO), delle direttive europee e delle disposizioni nazionali consente di raccogliere dati scientificamente validi ma anche comparabili, fondamentali per la valutazione dell'impatto acustico, la progettazione di infrastrutture aeroportuali e l'adozione di misure di mitigazione efficaci.

Capitolo 3

Emissioni acustiche e sviluppo tecnologico dei motori aeronautici

Il capitolo esamina il rumore aeronautico “alla sua sorgente”, ossia il complesso degli apparati propulsivi e strutturali che, in fase di volo, generano onde sonore percepibili sia a terra che in quota. Dopo una panoramica sui principali tipi di rumore prodotti da un aeromobile, distinguendo tra quello dovuto alla propulsione e quello dovuto alla struttura, il focus del capitolo è sul motore aeronautico, pertanto verranno analizzati i meccanismi fisici responsabili dell’emissione acustica e il ruolo critico delle parti che lo compongono. L’obiettivo non è soltanto descrittivo: capire come e perché un motore faccia rumore significa anche individuare le leve progettuali che negli ultimi decenni hanno permesso riduzioni significative dei livelli sonori. La ricostruzione storica degli step evolutivi per la riduzione del rumore permette di illustrare le tecniche di progettazione che hanno permesso di conseguire i migliori risultati e pone le basi per i futuri sviluppi.

Sebbene le strategie storiche abbiano portato a significative riduzioni del rumore, l’evoluzione recente degli aeromobili pone nuove sfide nella gestione dell’impatto acustico. Infatti l’industria aeronautica sta assistendo a una progressiva estremizzazione delle classi di aeromobili commerciali, in termini di dimensioni e numero di passeggeri trasportati, che comporta la necessità di sviluppare propulsori sempre più performanti, in grado di garantire efficienza e autonomia elevate. Tuttavia, l’incremento delle prestazioni dei motori introduce nuove complessità nelle strategie di riduzione del rumore, rendendo più complesso il controllo dell’impatto acustico.

Il settore dello sviluppo e produzione di motori aeronautici è ampio e articolato e numerosi produttori, in virtù delle proprie scelte progettuali e tecnologiche, immettono sul mercato motori con proprietà acustiche differenti a parità di caratteristiche dell’aeromobile, contribuendo alla variabilità delle emissioni sonore associate all’attività aeronautica. È quindi fondamentale descrivere i modelli di motori più diffusi in aviazione civile e le soluzioni tecniche adottate, così da analizzare il ruolo di ciascuna configurazione nelle emissioni acustiche complessive e comprendere come le innovazioni progettuali stiano orientando il settore verso una maggiore sostenibilità acustica.

3.1 I meccanismi di generazione del rumore aeronautico

Il rumore aeronautico rappresenta una delle principali emissioni ambientali generate dal traffico aereo ed è il risultato dell’interazione tra flussi aerodinamici, sistemi propulsivi e superfici dell’aeromobile. La sua origine può essere ricondotta a due categorie fondamentali:

- *engine noise*, rumore da propulsione generato soprattutto dai getti di gas ad alta velocità e dal flusso attraverso le componenti del motore;

- *airframe noise*, rumore aerodinamico prodotto dalle superfici portanti, dal carrello di atterraggio e da altri elementi strutturali in contatto con il flusso d'aria.

Questa distinzione è fondamentale per indirizzare le strategie di progettazione e mitigazione poiché ciascuna fonte richiede soluzioni tecniche diverse. Entrambe le tipologie si propagano attraverso l'atmosfera sotto forma di onde di pressione, percepite come suono da parte degli osservatori sia all'esterno (rumore esterno) sia all'interno della cabina (rumore interno). La percezione soggettiva dipende da numerosi fattori, tra cui la distanza, la topografia del terreno, le condizioni meteorologiche e la sensibilità uditiva individuale.

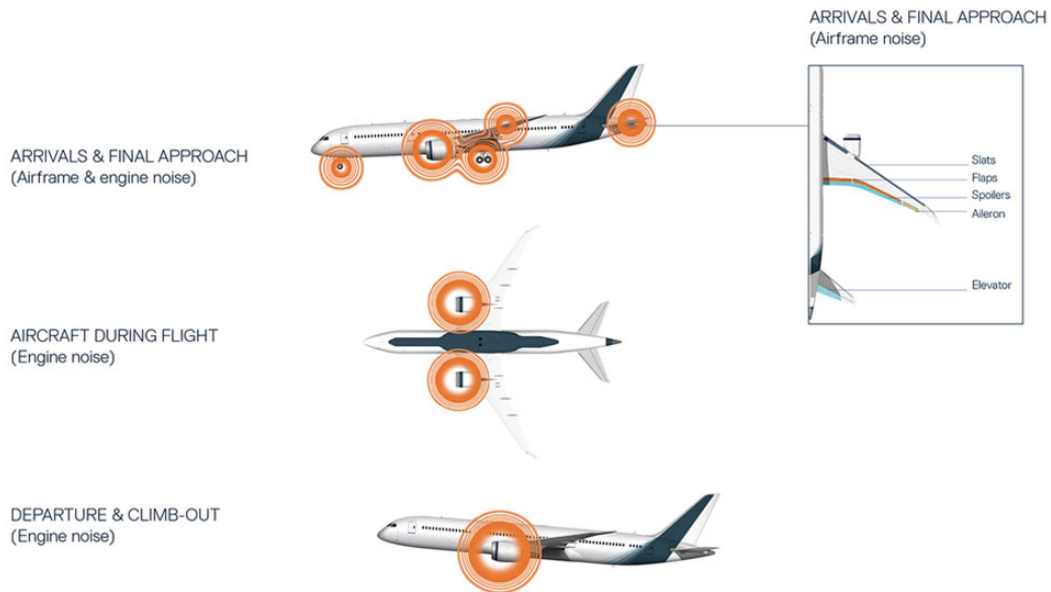


Figura 3.1: *Aircraft noise sources*^[10]

Oltre a questa distinzione principale, bisogna tenere presente che anche alcuni sistemi di bordo contribuiscono in modo non trascurabile al rumore prodotto da un aeromobile, specialmente nelle fasi di parcheggio, sosta e accensione. I seguenti elementi rappresentano dunque sorgenti secondarie di rumore che devono essere considerate nell'analisi acustica di un aeromobile:

- APU (*Auxiliary Power Unit*), un piccolo motore a turbina, solitamente installato nella parte posteriore della fusoliera, che fornisce energia elettrica e aria compressa ai vari sistemi di bordo quando i motori principali sono spenti, quindi, principalmente, durante le operazioni a terra. Sebbene sia notevolmente più piccolo di un turbofan, l'APU genera comunque un livello sonoro elevato, con emissioni percepibili soprattutto in prossimità della coda dell'aereo;
- ECS (*Environmental Control System*), l'impianto di condizionamento dell'aria, uno dei principali sistemi alimentati dall'APU che sfrutta una macchina a ciclo d'aria dotata di compressore e turbina che consente di climatizzare e pressurizzare la cabina. Quando il sistema ECS è attivo, sia a terra sia in volo, produce un rumore continuo e acuto, spesso percepito come un fischio costante. Questo suono può essere chiaramente udibile sia all'interno della cabina che all'esterno, contribuendo al livello di rumore complessivo nelle aree aeroportuali.

3.1.1 Engine noise

Il rumore da propulsione costituisce la principale sorgente sonora durante le fasi di decollo e salita, quando i motori operano a regimi di spinta elevati.

Nei motori a reazione, tra le componenti principali di emissione sonora spicca il *jet noise*, il rumore generato dal getto di scarico ad alta velocità che fuoriesce dall'ugello del motore e si mescola in modo turbolento con l'aria ambiente più lenta. Questa interazione produce vortici e fluttuazioni di pressione che si irradiano sotto forma di onde acustiche e la potenza acustica emessa è fortemente dipendente dalla velocità del getto, pertanto ridurre anche di poco la velocità del getto comporta una significativa attenuazione del rumore emesso. Il *jet noise* è dominante nei turbojet e nei turbofan a basso bypass ratio e presenta uno spettro a banda larga, con componenti significative sia a bassa che ad alta frequenza. Le componenti ad alta frequenza si originano prevalentemente in prossimità dell'ugello, dove le dimensioni dei vortici turbolenti (*eddies*) sono ridotte, mentre le componenti a bassa frequenza emergono a valle del getto, dove la dimensione dei vortici diventa confrontabile con il diametro del getto stesso.

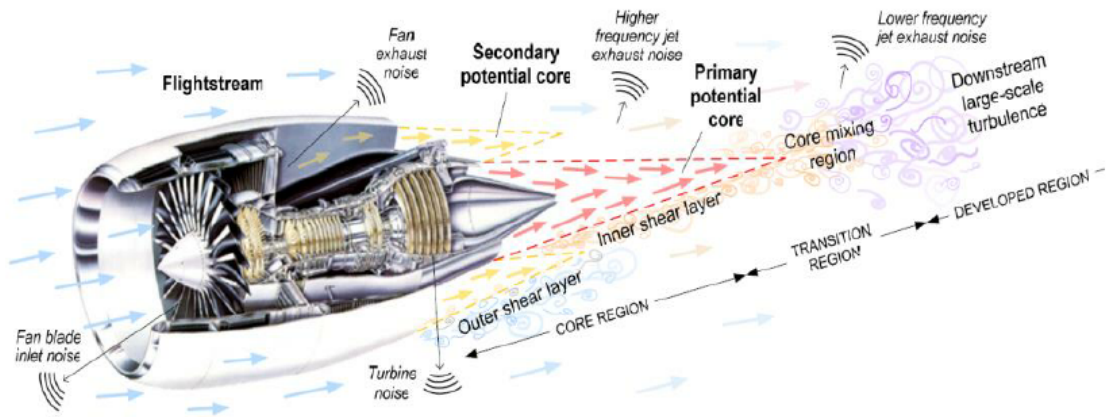


Figura 3.2: *Jet noise mixing regions*^[11]

Un altro fattore, soprattutto nei turbofan ad alto bypass, è il *fan noise*, dove la ventola anteriore (fan) contribuisce in modo rilevante al rumore irradiato. Il rumore prodotto è in parte tonale, legato alla rotazione delle pale, e in parte *broadband*, generato dalle interazioni turbolente tra le pale rotanti e le strutture fisse a valle, inoltre può essere legato ai condotti di aspirazione all'ingresso del motore e di scarico dietro al condotto di bypass.

Non trascurabile è il *compressor and turbine noise*, dovuto a componenti ad alta frequenza in cui il rumore è generato dall'interazione dei flussi con gli stadi rotanti e statorici. Il contributo è generalmente meno rilevante in termini di percezione esterna, ma può incidere sul rumore interno alla cabina.

Infine, sebbene più contenuto rispetto alle altre sorgenti, anche il *combustion noise* contribuisce alle emissioni acustiche totali, in particolare in caso di instabilità di combustione o fiamma rumorosa come avviene nei regimi transitori.

Nei motori a elica, il rumore dominante è quello tonale legato al passaggio ciclico delle pale, cioè alla *Blade Passage Frequency BPF*. Quando la punta delle pale si avvicina alla velocità del suono, si generano onde d'urto e un marcato incremento del rumore irradiato. Il rumore delle eliche è direzionale e risulta particolarmente intenso in presenza di elevati carichi aerodinamici o alti regimi di rotazione.

3.1.2 Airframe noise

Il rumore strutturale diventa rilevante soprattutto nelle fasi di avvicinamento e atterraggio, quando i motori operano a regimi ridotti e l'aeromobile configura le proprie superfici per il volo lento e ad alta portanza. In queste condizioni, la principale sorgente di rumore è il flusso d'aria che interagisce con le superfici esterne del velivolo, a partire dai dispositivi ipersostentatori. I *flaps* e gli *slats* sono utilizzati per aumentare la portanza durante le fasi a bassa velocità, ma introducono discontinuità geometriche nel flusso che a loro volta generano forti turbolenze. La loro forma complessa e i numerosi spigoli vivi favoriscono la separazione del flusso d'aria turbolento e la formazione di vortici, che si traducono in emissioni acustiche *broadband* di media-alta frequenza. È importante sottolineare che, nelle diverse fasi di volo, la rilevanza di queste componenti sonore varia, determinando contributi differenti alla percezione complessiva del rumore a terra.

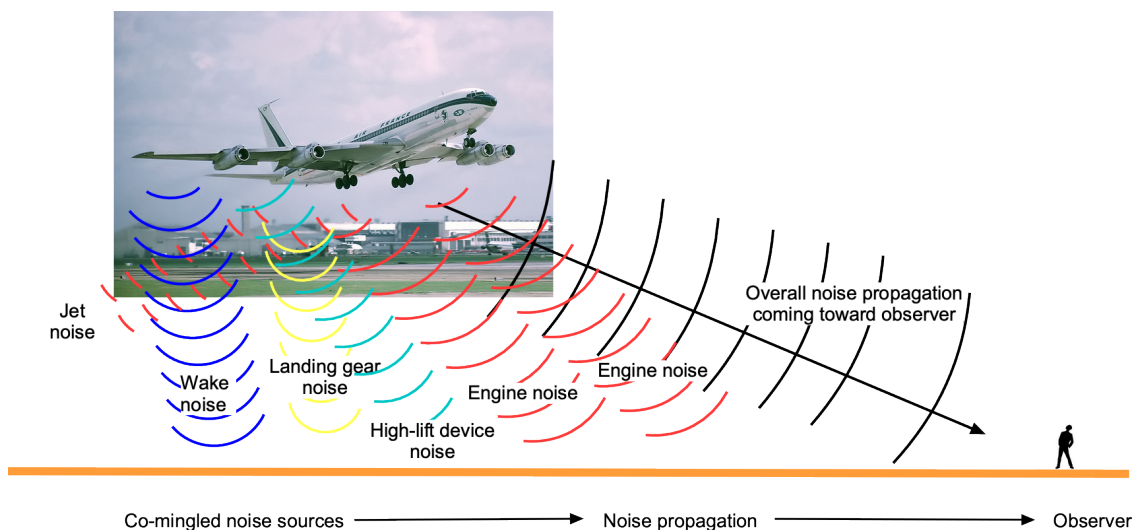


Figura 3.3: Sorgenti del rumore prodotto da un aereo^[12]

La principale sorgente di rumore strutturale è il carrello di atterraggio in quanto, una volta esteso, presenta una struttura sporgente e non carenata, con cavità e meccanismi articolati che generano resistenza aerodinamica e turbolenze intense. Per questo motivo è stato oggetto di numerosi interventi di mitigazione in modo da ridurre il suo impatto.

Infine, si deve tener conto del contributo di fusoliera e superfici alari perché, anche in assenza di elementi mobili, il flusso d'aria su superfici non perfettamente lisce o in presenza di turbolenze residue produce un rumore di fondo (*background noise*) che contribuisce al profilo acustico complessivo del velivolo.

3.1.3 Distinzione tra rumore esterno e interno

Le sorgenti acustiche descritte si manifestano come:

- rumore esterno, percepito a terra o da osservatori in volo, è il principale oggetto delle normative ambientali, in quanto responsabile dell'impatto acustico sugli insediamenti prossimi agli aeroporti;
- rumore interno, percepito all'interno della cabina, può influire sul comfort dei passeggeri e sull'ambiente di lavoro dell'equipaggio. In questo caso, le sorgenti acustiche possono essere sia

dirette, come nel caso del rumore trasmesso attraverso le pareti della fusoliera, sia indirette, come nel caso delle vibrazioni strutturali indotte dal flusso o dal funzionamento del motore.

In volo livellato, ad alta quota e velocità di crociera, entrambe le componenti (propulsiva e strutturale) sono meno rilevanti in termini di rumore esterno ed impatto ambientale, ma il rumore interno alla cabina (*cabin noise*), derivante da vibrazioni strutturali e risonanze acustiche, può comunque influire sul comfort dei passeggeri. La propagazione acustica attraverso la struttura dell'aeromobile e l'insonorizzazione interna determinano pertanto quanto del rumore prodotto raggiunge effettivamente i passeggeri.

3.2 Il rumore emesso dai motori aeronautici

Il rumore prodotto dai motori aeronautici è il risultato di una combinazione complessa di sorgenti acustiche, ciascuna associata a specifiche componenti della macchina termica. A seconda del tipo di propulsore impiegato, turbojet, turbofan o propeller, variano sia la distribuzione delle sorgenti acustiche sia le caratteristiche spettrali del suono generato. Le principali sorgenti includono:

- rumore da getto (per turbojet e turbofan);
- rumore del fan;
- rumore del compressore e della turbina;
- rumore di combustione;
- rumore delle eliche (per propeller).

Ognuna di queste sorgenti ha caratteristiche direzionali e frequenziali diverse, legate al tipo di motore, alla fase operativa e alla configurazione aerodinamica.

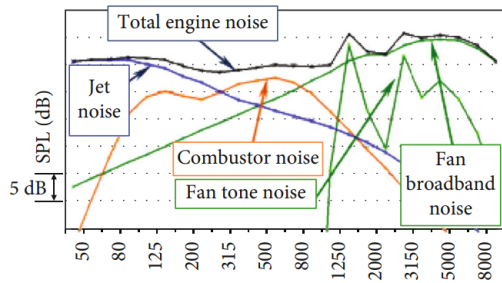


Figura 3.4: *The contributions of the noise emission for a turbojet engine*^[13]

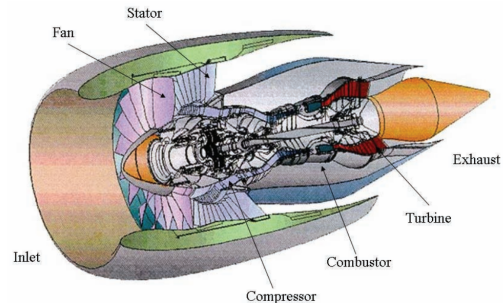


Figura 3.5: *Dominant engine noise sources*^[14]

3.2.1 Motori turbojet

Nei motori turbogetto, in cui l'intero flusso d'aria attraversa il *core* e viene espulso ad alta velocità dall'ugello, la sorgente dominante è il *jet noise* ma contribuiscono anche gli altri componenti.

Il getto espulso è altamente energetico e turbolento e interagisce in maniera violenta con l'aria circostante generando fluttuazioni di pressione che si propagano come onde sonore. Nei flussi subsonici, la potenza acustica irradiata è proporzionale all'ottava potenza della velocità del getto:

$$L_W \propto V_j^8 \quad (3.1)$$

dove L_W è la potenza acustica e V_j è la velocità del getto.

Nel caso di getti supersonici, come avviene all'uscita dei motori con post-combustore (*afterburner*), il rumore è amplificato da onde d'urto stazionarie note come *shock cells*. Queste strutture amplificano il rumore emesso dando origine a componenti tonali particolarmente intense e questo fenomeno, chiamato *screech*, si manifesta con suoni acuti e pulsanti, potenzialmente dannosi sia per il comfort acustico che per l'integrità strutturale del motore.

Il compressore e la turbina, composti da stadi alternati di pale rotanti e statori fissi, generano rumore attraverso l'interazione delle strutture solide con i flussi aerodinamici. Il rumore prodotto ha componenti acustiche ad alta frequenza e si manifesta con:

- componenti tonali a frequenze discrete ben definite, in questo caso rumore tonale da instabilità del flusso;
- componenti *broadband* spettralmente distribuite su un ampio intervallo di frequenze, in questo caso da turbolenza residua che interagisce con le pale fisse e dallo scorrimento vorticoso all'uscita degli stadi.

Sebbene queste componenti siano meno rilevanti rispetto a fan e jet in termini di impatto ambientale esterno, dato che contribuiscono in modo secondario al rumore percepito esternamente, esse possono contribuire in modo significativo al rumore interno percepito nella cabina passeggeri.

Il rumore prodotto dalla combustione deriva dalle onde di pressione ad alta pressione che si generano all'interno della camera. In condizioni stazionarie, il contributo è contenuto, tuttavia in caso di instabilità combustive possono insorgere fenomeni di risonanza acustica dannosi sia per la rumorosità sia per la durabilità del motore.

3.2.2 Motori turbofan

Nei motori turbofan, che oggi costituiscono lo standard per l'aviazione commerciale civile, una frazione consistente del flusso bypassa il *core* del motore e viene accelerata da una grande ventola (fan). La presenza di un *bypass ratio* elevato consente di ottenere maggiore spinta a velocità di getto inferiori, con conseguente riduzione del *jet noise*.

Sebbene più contenuto rispetto ai turbojet, il *jet noise* rimane significativo, specie nei motori a basso bypass. La porzione calda del getto si mescola con l'aria ambiente e con il flusso freddo bypassato, generando turbolenze che emettono rumore. Nei turbofan moderni, la velocità del getto è stata ridotta anche grazie all'impiego di *chevrons* e mixer multilobo, che favoriscono una miscelazione più graduale e meno rumorosa.

Il *fan* è una sorgente acustica importante, soprattutto in fase di decollo. Il rumore è generato dalla rotazione delle pale della ventola che interagiscono con il flusso un ingresso e con gli statori fissi posti a valle e si suddivide in:

- tonale, causato dalle interazioni periodiche tra le pale rotanti e le strutture fisse e associato alla frequenza di passaggio delle pale (*Blade Passing Frequency BPF*):

$$f_{BPF} = N_b \cdot \Omega \quad (3.2)$$

dove N_b è il numero di pale e Ω è la velocità angolare;

- *broadband*, prodotto da turbolenze casuali nei flussi in ingresso o tra rotore e statore.

Nei motori *geared* turbofan, un riduttore meccanico tra fan e stadio a bassa pressione consente di far ruotare la ventola a velocità inferiore, diminuendo il rumore tonale senza penalizzare le prestazioni: questo approccio ha permesso riduzioni significative sia del rumore percepito che dei consumi.

Come nei turbojet, anche nei turbofan il compressore e la turbina producono rumore attraverso meccanismi simili: vortici, instabilità, interazione tra pale rotanti e statori. La loro influenza è più marcata in fase di salita, quando il motore opera a regimi intermedi o elevati.

Anche nei turbofan il rumore di combustione ha un impatto relativamente ridotto sul rumore esterno, ma può influire su quello trasmesso alla fusoliera. È oggetto di attenzione progettuale in presenza di fiamma instabile, specialmente nei nuovi combustori a basse emissioni NO_x , più suscettibili a instabilità acustiche.

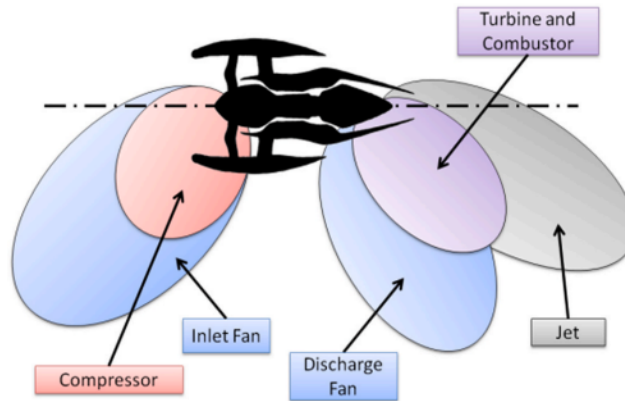


Figura 3.6: *Noise sources for a high BPR turbofan engine*^[15]

3.2.3 Motori propeller

Nei propulsori a elica, detti anche turboprop, la generazione del rumore avviene principalmente a causa della rotazione delle pale a velocità elevata in aria, che introduce una componente tonale ben definita. Il rumore è quindi caratterizzato da una forte componente tonale, associata alla frequenza di passaggio delle pale come nei fan, ma spesso con valori di frequenza più bassi e con armoniche multiple che si estendono su un ampio spettro.

L'intensità del rumore cresce in modo significativo con l'aumentare della velocità periferica della pala ed è particolarmente sensibile al numero di Mach alla punta delle pale. Quando questo si avvicina a 1, si generano onde d'urto locali (*shock tip*) e intense emissioni acustiche direzionali. È il motivo per cui si predilige l'impiego di eliche a giri ridotti e pale *scimitar* a curvatura controllata nei moderni turboprop, per contenere il rumore senza sacrificare l'efficienza.

Il rumore aumenta anche in presenza di interazione con flussi disturbati, dietro l'ala o la fusoliera. Nei velivoli a elica spingente (*pusher*) il rumore risulta più intenso rispetto a quelli con eliche traenti (*tractor*), proprio per via della turbolenza incontrata.

3.3 L'evoluzione storica della riduzione del rumore nei motori aeronautici

L'evoluzione del design dei motori in ambito aeronautico è stata fortemente influenzata, fin dalle sue origini, dalla necessità di contenere le emissioni acustiche. I primi tentativi di mitigazione risalgono all'era pre-jet, quando gli aerei a pistoncini generavano un rumore prevalentemente meccanico e impulsivo, legato alla combustione interna, al ciclo alternato del motore e alle eliche. Tuttavia, è con l'introduzione dei motori a reazione che il rumore aeronautico assunse una dimensione completamente nuova, per intensità e frequenze coinvolte.

3.3.1 Anni '40-'50: introduzione del turbojet ed origine del *jet noise*

Con la comparsa dei motori turbogetto, impiegati per la prima volta in aviazione militare e successivamente nei voli commerciali, si assiste a una marcata intensificazione delle emissioni acustiche associate alla propulsione. Il rumore generato è riconducibile principalmente al getto ad alta velocità espulso dagli ugelli, la cui interazione turbolenta con l'aria ambiente produce forti fluttuazioni di pressione. Nei turbojet di prima generazione, il flusso in uscita raggiungeva velocità prossime o superiori a quella del suono, con conseguente formazione di onde d'urto e livelli di pressione sonora particolarmente elevati.

Durante le fasi di decollo e salita, il *jet noise* rappresentava la componente dominante, con effetti acustici percepiti ben oltre il perimetro aeroportuale. Questo fenomeno si impose rapidamente come una delle principali criticità ambientali legate al trasporto aereo, in un'epoca in cui le questioni legate all'impatto acustico erano ancora prive di una regolamentazione organica.

In risposta a questa nuova criticità e alla crescente attenzione pubblica, le prime indagini sperimentali furono avviate da parte di enti di ricerca come la NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), poi confluita nella NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), e da vari centri europei. Già in questo periodo si cercò di intervenire alla fonte del rumore con l'impiego di ugelli dentati (*toothed nozzles*), miscelatori interni e ugelli convergenti-divergenti ottimizzati per favorire la transizione subsonica. Tuttavia, queste soluzioni che agivano sulla geometria e sulla struttura del getto comportavano spesso penalizzazioni in termini di spinta o efficienza propulsiva e i miglioramenti acustici risultavano limitati.

In questa fase pionieristica, il rumore del motore veniva ancora considerato un effetto collaterale inevitabile della spinta generata e solo negli anni successivi si sarebbe affermato un approccio più sistematico alla progettazione acustica dei propulsori.

3.3.2 Anni '60-'70: nascita del turbofan e del concetto di bypass ratio

Questo decennio segna una svolta significativa nella progettazione propulsiva, con l'introduzione su larga scala dei motori turbofan. A differenza dei turbojet, in cui l'intera massa d'aria attraversa il nucleo del motore, nei turbofan una frazione significativa del flusso viene canalizzata all'esterno del *core* caldo del motore, passando attraverso una grande ventola e aggirando la camera di combustione. Questo flusso secondario, noto come flusso bypass, è alla base della riduzione delle emissioni sonore e in questo modo viene ridotta la velocità effettiva del getto espulso e con essa la potenza acustica irradiata. Il bypass ratio (BPR), cioè il rapporto tra massa d'aria bypassata e quella che attraversa il *core*, diventò una variabile fondamentale.

Il concetto si basava su un principio noto della fluidodinamica aeroacustica: per getti subsonici, la potenza acustica irradiata dal getto varia con l'ottava potenza della velocità. Diminuendo quindi la velocità del getto espulso, grazie a una maggiore portata d'aria a bassa velocità ottenuta aumentando il bypass, si ottiene una riduzione sostanziale del rumore da getto, senza comprometterne la spinta complessiva.

L'introduzione del turbofan non solo migliorò l'efficienza propulsiva, ma modificò radicalmente la natura del rumore prodotto, spostando l'attenzione da un getto caldo e supersonico a un flusso più freddo e diffuso. Questo rappresentò il primo passo verso la progettazione consapevole del motore in ottica di sostenibilità acustica, con l'obiettivo di rendere compatibile l'espansione del trasporto aereo con la presenza di aeroporti in aree densamente popolate.

Nacque così il concetto di motore a basso rumore per aviazione civile e l'introduzione del motore turbofan rappresentò il primo grande progresso acustico. I turbofan di prima generazione avevano BPR modesti (1:1-2:1), ma aprirono la strada allo sviluppo di configurazioni a più alto bypass, che si sarebbero affermate nei decenni successivi come riferimento per l'aviazione civile.

3.3.3 Anni '80-'90: affermazione degli high-bypass turbofan, delle tecnologie fonoassorbenti e dei primi standard ICAO

Con il perfezionamento dei turbofan ad alto bypass ratio, la progettazione dei motori ad uso civile vide la consolidazione del turbofan ad alto BPR come la configurazione dominante per l'aviazione commerciale. I valori di BPR superarono rapidamente 5:1, in netta crescita rispetto ai turbofan di prima generazione, portando a una riduzione significativa del *jet noise*: i nuovi motori high-bypass consentivano un abbattimento dei livelli sonori di diversi decibel rispetto ai turbojet utilizzati negli anni '60.

L'aumento del bypass ratio fu accompagnato da una riprogettazione del fan: vennero introdotte pale a curvatura progressiva (*swept blades*), venne ridotto il numero di pale e furono ottimizzate le sezioni aerodinamiche per limitare la generazione di onde di pressione impulsive alle estremità. Accanto alla modifica dei parametri fluidodinamici, furono implementate anche soluzioni di assorbimento passivo del rumore, tra cui i *liner* acustici. Questi rivestimenti, generalmente costituiti da strutture porose a celle multiple o cavità di Helmholtz, vennero installati nei condotti di aspirazione e scarico del motore con l'obiettivo di attenuare selettivamente le frequenze generate.

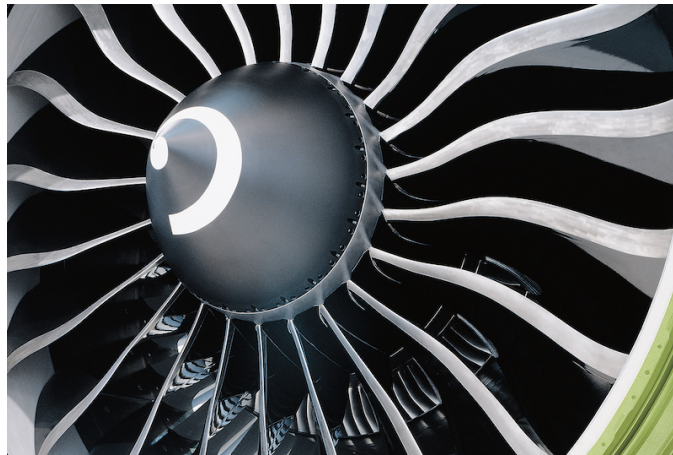


Figura 3.7: A close-up view of the GE90, with its 22 four-foot-long swept fan blades^[16]

Parallelamente al progresso tecnologico, l'ICAO introdusse, tramite l'*Annex 16* Volume I, i primi standard normativi internazionali per il controllo del rumore aeronautico: il *Chapter 2* stabilì i primi limiti assoluti per le emissioni acustiche misurate in tre condizioni operative (decollo, sorvolo e avvicinamento) e successivamente il *Chapter 3* impose requisiti ancora più stringenti. Questa nuova regolamentazione generò una forte pressione industriale sui costruttori di motori e aeromobili, spingendoli a implementare architetture più silenziose non solo per i nuovi velivoli, ma anche per la flotta già in servizio. Vennero così integrati componenti aerodinamicamente ottimizzati e dispositivi passivi per la riduzione del rumore e in quest'ottica si diffusero i cosiddetti *hush kits*, dispositivi di retrofit acustico destinati ai motori turbojet e ai turbofan a basso bypass ratio non conformi ai nuovi limiti ICAO. L'efficacia di questi sistemi, seppur limitata rispetto ai motori di nuova generazione, consentì a numerosi aeromobili di rientrare nei requisiti imposti dal *Chapter 3* ICAO, prolungando la propria operatività commerciale. Tuttavia tali interventi comportavano aumenti di peso, peggioramento dell'efficienza propulsiva e consumi, maggiore complessità manutentiva e furono quindi intesi come soluzioni transitorie in attesa della piena sostituzione della flotta.

3.3.4 Anni 2000-2010: *chevrons*, *geared* turbofan e ricerca USA-UE

Negli anni 2000, la ricerca sulla riduzione del rumore entra in una nuova fase tecnologica, grazie alla convergenza tra innovazione progettuale, progressi nei materiali e programmi di ricerca congiunti tra agenzie pubbliche e costruttori. In questo periodo si affermano due tecnologie fondamentali nelle generazioni successive di motori: i *chevrons* e i *geared* turbofan.

I *chevrons* sono dentellature a geometria controllata applicate ai bordi degli ugelli di scarico, in corrispondenza della giunzione tra il getto caldo in uscita dal *core* e il flusso freddo del bypass. Il loro obiettivo è favorire una miscelazione più graduale e controllata tra i due flussi, riducendo l'intensità delle turbolenze e delle fluttuazioni di pressione alla sorgente. Questi dispositivi, di forma tipicamente triangolare o seghettata, vennero testati e validati attraverso i programmi NASA AST (*Advanced Subsonic Technology*) e QAT (*Quiet Aircraft Technology*), condotti in collaborazione con Boeing, Pratt & Whitney e Rolls-Royce. I risultati sperimentali dimostrarono una riduzione del rumore di 2-4 EPNdB (*Effective Perceived Noise in decibels*), senza penalizzare significativamente la spinta.



Figura 3.8: *Close-up view of the Rolls-Royce Trent 1000, with its distinctive chevrons on the nacelle*^[17]

Un'altra innovazione fondamentale introdotta in questo decennio è rappresentata dal *geared* turbofan (GTF), un'architettura propulsiva in cui un riduttore epicicloidale viene inserito tra il fan e il compressore a bassa pressione. Ciò permette al fan di ruotare a velocità inferiore rispetto al resto del motore, riducendo drasticamente le componenti tonali legate alla *Blade Passing Frequency* (BPF). Il primo programma industriale su larga scala a implementare questa architettura fu quello del Pratt & Whitney PW1000G, sviluppato nel contesto del CLEEN Program (*Continuous Lower Energy, Emissions and Noise*) della *Federal Aviation Administration* (FAA) statunitense come perfezionamento delle attività connesse al programma EU SILENCER. I test condotti hanno mostrato che, grazie al GTF, il rumore tonale del fan può essere ridotto in modo significativo fino a 20 dB e il bypass ratio può essere aumentato oltre 10:1, senza le penalizzazioni aerodinamiche dovute alla rotazione ad alta velocità del fan. Oltre ai benefici acustici, il GTF ha mostrato un incremento dell'efficienza propulsiva e una riduzione delle emissioni di CO_2 e NO_x , favorendone l'adozione su piattaforme moderne.

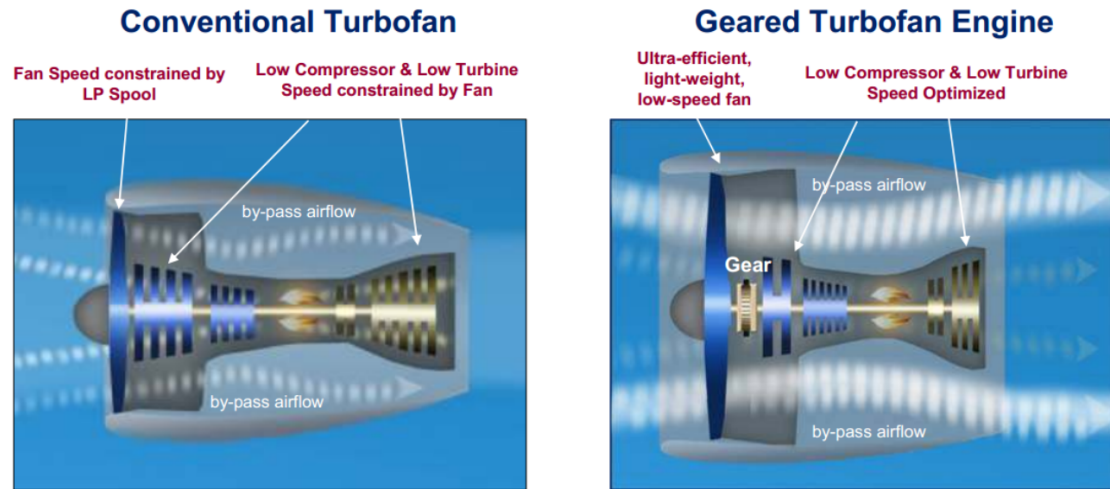


Figura 3.9: *GTF Engine allows step change in efficiency*^[18]

Il decennio fu caratterizzato da programmi di ricerca pubblici di ampio respiro, volti a supportare l'industria nella progettazione di motori compatibili con i futuri *Chapter 4 ICAO*. Tra questi:

- NASA AST e QAT, che svilupparono nuove tecniche sperimentali e validarono tecnologie chiave come *chevrans*, mixer avanzati e *liner* a celle multiple;
- UE SILENCER, che ha coinvolto Airbus, Rolls-Royce, Snecma e numerosi centri di ricerca europei per integrare soluzioni acustiche a livello di sistema;
- FAA CLEEN *Program*, lanciato nel 2010, che proseguirà nel decennio successivo con test su propulsori ibridi, *liner* attivi e fan *ultra-large*.

Questo decennio ha dunque rappresentato un punto di svolta: da una fase di mitigazione passiva si è passati a una logica di ottimizzazione acustica integrata nel design del motore, con obiettivi espliciti di riduzione delle emissioni sonore, in parallelo all'efficienza e alle prestazioni ambientali globali.

3.3.5 Anni 2010-oggi: *ultra-high* bypass, nuovi materiali e ottimizzazione digitale

A partire dagli anni 2010, l'industria aeronautica ha assistito all'introduzione di una nuova generazione di turbofan progettati per rispondere simultaneamente a requisiti di efficienza energetica, riduzione delle emissioni e sostenibilità acustica. Questi propulsori integrano le principali innovazioni sviluppate nel corso degli anni 2000, con i miglioramenti più significativi.

In primo luogo, bypass ratio superiori a 10:1 consentono una riduzione marcata della velocità del getto e, di conseguenza, del *jet noise* secondo la legge dell'ottava potenza. L'impiego di fan realizzati in materiale composito, più leggeri e resistenti, permette una rotazione a velocità inferiori, riducendo la generazione di onde di pressione impulsive e migliorando l'assorbimento vibroacustico. L'attenuazione uniforme e robusta delle frequenze tonali e broadband è ulteriormente garantita da *chevrans* di nuova generazione e *liner* acustici a struttura continua (*zero-splice*). Infine, il controllo elettronico ottimizzato FADEC (*Full Authority Digital Engine o Electronics Control*), in condizioni operative specifiche, consente una gestione efficiente dei parametri motore in funzione della riduzione del rumore.

In parallelo, la progettazione acustica beneficia dell'introduzione di strumenti digitali avanzati, come la simulazione aeroacustica CFD/CAA (*Computational Aero-Acoustics*), l'impiego di algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo e il controllo predittivo delle condizioni operative tramite *machine learning* e *big data* derivati dal monitoraggio in servizio.

La riduzione del rumore nei motori aeronautici è frutto di un'evoluzione continua, scandita da innovazioni tecnologiche, normative ambientali sempre più stringenti e crescente consapevolezza sociale. Dopo decenni di riduzioni incrementali, l'industria si prepara ad affrontare l'abbattimento delle emissioni sonore non più come una funzione accessoria della progettazione propulsiva, ma come una variabile progettuale primaria, integrata fin dalle prime fasi del ciclo di vita del motore e parte integrante della sostenibilità del trasporto aereo del futuro.

3.4 Le tecnologie e le procedure operative per la mitigazione del rumore aeronautico

Dopo aver ricostruito nel dettaglio le tappe storiche attraverso cui l'industria ha progressivamente ridotto le emissioni acustiche dei motori, si propone una visione sistematica delle principali strategie di mitigazione, articolate secondo le categorie fisiche di rumore e le soluzioni progettuali associate. Le strategie ingegneristiche per la riduzione del rumore prodotto dai motori aeronautici si concentrano principalmente sull'intervento diretto alla fonte acustica, ovvero nelle fasi in cui nascono le principali componenti del rumore, ma sono state elaborate anche procedure per ridurre i livelli di rumore, che dipendono dal modo in cui opera un aeromobile.

3.4.1 Riduzione del *jet noise*

Per ridurre la rumorosità dei primi motori a getto, si intervenne sull'area di scarico, introducendo un'unità di miscelazione all'interno del flusso. Questa miscelazione anticipata favoriva una transizione più rapida tra il flusso espulso e l'aria circostante, con due effetti acustici rilevanti: da un lato l'aumento della frequenza del rumore generato, che spesso superava la soglia di udibilità umana, e dall'altro una riduzione della velocità del getto, che comportava una diminuzione del *jet noise* associato alla turbolenza di scarico. Inoltre, le frequenze più elevate risultano più facilmente assorbite dall'atmosfera, contribuendo ulteriormente alla mitigazione del rumore percepito a terra. Al contrario, le frequenze più basse ma ad alto volume si dissipano più lentamente nell'atmosfera e di conseguenza sono udibili anche a distanze maggiori.

Tra le soluzioni impiegate vi furono i cosiddetti miscelatori ondulati (*corrugated mixers*), che tuttavia presentarono significative criticità in termini aerodinamici: l'aggiunta di peso e l'incremento della resistenza riducevano le prestazioni complessive del motore. Per questi motivi, tali dispositivi non conobbero una larga diffusione e si passò all'adozione di motori ad alto rapporto di bypass, nei quali la maggior parte del flusso d'aria in ingresso bypassa il nucleo motore senza attraversare la camera di combustione. Questi propulsori producono spinta accelerando una grande massa d'aria a velocità relativamente basse, riducendo la differenza di velocità tra il flusso espulso e l'aria ambiente e abbattendo così la generazione di rumore da scarico.

Nei turbofan moderni, l'aumento del bypass ratio (BPR) permette di generare la stessa spinta abbattendo il rumore emesso. In particolare, il getto di scarico non rappresenta più la principale sorgente acustica, mentre la ventola anteriore e le componenti rotanti interne, come compressori e turbine, risultano essere i maggiori contributori al rumore totale. In particolare, nei motori turbofan ad alto bypass ratio, il fan deve essere più grande e girare più lentamente, perché deve spostare più aria a una velocità inferiore per ottenere la stessa spinta. Ciò permette di avere fan più grandi ma che operano a velocità più basse rispetto ai motori turbojet o ai turbofan a

basso BPR. Per comprendere l'impatto che questo aumento può avere sul fan, è stato realizzato un confronto visivo in scala delle dimensioni, in questo caso il diametro in centimetri, dei fan dei motori aeronautici più diffusi, sia *narrow-body* che *wide-body*.

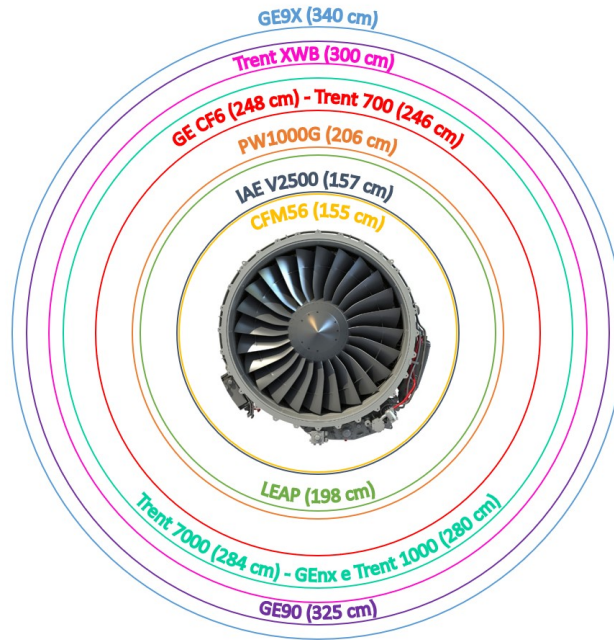


Figura 3.10: Diametro in centimetri dei fan dei motori aeronautici *narrow-body* e *wide-body* più diffusi

Le strategie principali per ridurre il *jet noise* includono anche diversi dispositivi passivi, sviluppati per agire sulla propagazione delle onde acustiche o sulla turbolenza dei flussi in uscita:

- ugelli miscelatori e mixer multilobo, promuovono una miscelazione più rapida e meno turbolenta tra il getto caldo proveniente dal *core* e l'aria fredda bypassata. Alcuni includono geometrie complesse per abbassare la frequenza di taglio delle onde sonore e disaccoppiare la propagazione acustica, rendendola meno efficiente;
- *chevrons*, dentellature applicate sul bordo d'uscita degli ugelli del *core* o del bypass che favoriscono una transizione più graduale tra i flussi, migliorando la miscelazione del getto e attenuando le onde di pressione a bassa frequenza. La loro efficacia si manifesta soprattutto nella zona posteriore del motore, dove agiscono sul rumore *downstream*, e in fase di decollo, contribuendo a ridurre di diversi decibel il rumore percepito senza compromettere significativamente le prestazioni del propulsore.

Questi avanzamenti rappresentano solo una parte dell'evoluzione in atto nel controllo acustico dei motori aeronautici, sempre più orientato verso un equilibrio tra la riduzione dell'impatto ambientale e il mantenimento dell'efficienza propulsiva, in linea con le esigenze della moderna aviazione commerciale.

3.4.2 Riduzione del rumore del fan

Il rumore del fan è composto da due componenti principali, cioè una tonale legata alla frequenza di passaggio delle pale e una *broadband* dovuta alle interazioni con il flusso turbolento. Le tecnologie

di mitigazione includono:

- *geared* turbofan, attraverso un riduttore meccanico epicicloidale interposto tra fan e compressore, la ventola può ruotare più lentamente rispetto al resto del compressore, riducendo il rumore tonale senza compromettere la spinta;
- pale fan *swept* e a bassa velocità di punta, cioè inclinate all'indietro, mitigano la formazione di fronti d'onda acustici impulsivi, specialmente in regime transonico. L'ottimizzazione del profilo aerodinamico e dell'angolo di incidenza delle pale riduce le onde di pressione generate localmente;
- ottimizzazione *rotor-stator*, la disposizione sfalsata tra le pale mobili (rotore) e quelle fisse (statore) e l'uso di numeri di pale dispari, nonché l'aumento della distanza assiale tra gli stadi, limitano le risonanze e riducono l'interazione ciclica che genera le componenti tonali più marcate;
- *scimitar blades*, design avanzato delle pale del fan che, accompagnato con un aumento del numero di pale, consente di distribuire l'energia acustica associata al tono di passaggio su uno spettro più ampio, diminuendone l'intensità di picco e rendendolo meno percepibile;



Figura 3.11: *Hamilton Sundstrand A400M 17,5 ft diameter propeller system*^[19]

- spaziatura ottimizzata, variando opportunamente la distanza e il rapporto tra le palette della ventola e quelle dello statore si può interferire con la formazione delle onde acustiche e ridurre l'intensità delle interazioni periodiche che generano toni acuti.

Questi interventi concorrono a un abbattimento significativo del rumore di fan, oggi tra i più critici nelle fasi a basso regime, e rappresentano una delle principali aree di innovazione nella progettazione dei motori a reazione di nuova generazione.

3.4.3 Riduzione dell'airframe noise

Il rumore aerodinamico contribuisce in modo rilevante all'ambiente acustico aeroportuale, soprattutto in prossimità delle piste, e per mitigarlo sono state sviluppate diverse soluzioni progettuali:

- carenature aerodinamiche per il carrello d'atterraggio, che costituisce una delle principali sorgenti di rumore a bassa frequenza in fase di avvicinamento, permettono di migliorare

il flusso sul carrello in modo da ridurre sensibilmente il rumore durante la discesa senza compromettere funzionalità meccaniche o strutturali;

- design avanzato per superfici mobili ad alta portanza, che durante le manovre di avvicinamento generano rumore ad alta frequenza, con forme aerodinamiche ottimizzate capaci di limitare l'intensità e la dimensione dei vortici generati, migliorando così sia il comportamento acustico che le prestazioni aerodinamiche;
- interventi retroattivi, attraverso l'installazione di dispositivi come gli *Sharklet* di Airbus o gli *Split Scimitar Winglet* di Boeing, nati per migliorare l'efficienza aerodinamica e ridurre il consumo di carburante ma che agiscono anche sulla riduzione del rumore indotto dal vortice di estremità, contribuendo a un volo più silenzioso.



Figura 3.12: A320 Sharklet close-up^[20]



Figura 3.13: Split Scimitar Winglet in BBJ^[21]

Queste soluzioni rappresentano solo l'inizio di un'evoluzione più ampia nel controllo acustico della struttura, volta a trovare un equilibrio tra le esigenze di efficienza della moderna aviazione commerciale e la riduzione dell'impatto ambientale in prossimità degli aeroporti.

3.4.4 Smorzamento acustico tramite rivestimenti e materiali

Oltre a modificare il comportamento del flusso, è possibile intervenire sulla propagazione del rumore attraverso l'impiego di superfici fonoassorbenti:

- *acoustic liners*, rivestimenti installati tipicamente nelle nacelle dei motori, costituiti da materiali porosi montati su strutture a nido d'ape, che agiscono come risonatori di Helmholtz. L'energia sonora in ingresso viene dissipata attraverso un meccanismo combinato di assorbimento poroso e risonanza acustica, con un'efficacia particolarmente elevata nella mitigazione del rumore generato dalle pale della ventola e del compressore. I *liner* sono collocati strategicamente sia all'ingresso che nello scarico del motore, oltre che nelle sezioni interne più rumorose, come quelle adiacenti agli stadi del compressore e della turbina. Sono progettati per assorbire selettivamente le frequenze emesse da fan, compressore e turbina e le configurazioni più avanzate includono *liner* a struttura continua (*zero-splice*), privi di giunzioni longitudinali, che garantiscono una maggiore uniformità di assorbimento e riducono la riflessione delle onde sonore all'interno del condotto;

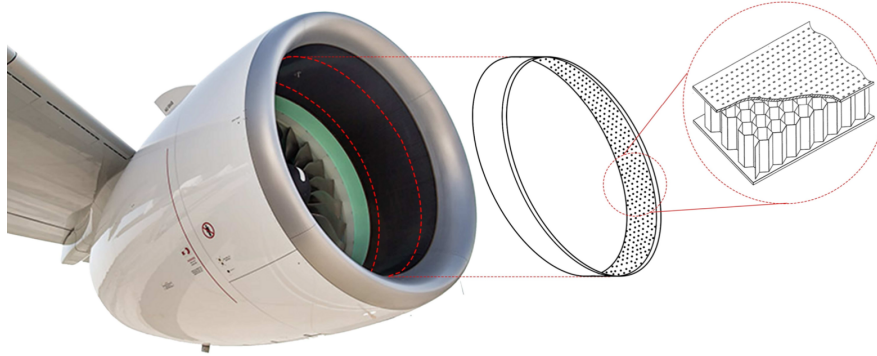


Figura 3.14: *The acoustic liners are composed of a metal plate perforated with tiny holes and, underneath, a honeycomb pattern core*^[22]

- materiali compositi con proprietà acustiche integrate, fan con pale in fibra di carbonio o compositi termoplastici che consentono non solo di ridurre il peso, ma anche di smorzare le vibrazioni strutturali e limitare la trasmissione del rumore verso l'esterno.

Queste tecnologie rappresentano un elemento chiave nel controllo passivo del rumore, agendo direttamente sulle superfici irradianti e contribuendo a contenere l'impatto acustico degli aeromobili di nuova generazione.

3.4.5 Soluzioni retrofit e tecnologie ibride

Le soluzioni retrofit sono state pensate per estendere la vita operativa di aeromobili più datati, rendendoli conformi alle normative ambientali ICAO più restrittive. Tra queste spiccano gli hush kits, pacchetti di modifiche installati su motori turbojet e turbofan a basso rapporto di bypass e che comprendono tipicamente:

- mixer multilobo, progettati per favorire una miscelazione più graduale tra il getto caldo e l'aria ambiente, riducendo la velocità del flusso;
- ugelli profilati e silenziatori integrati, che permettono una riduzione del rumore direttamente alla sorgente, sfruttando geometrie ottimizzate per attenuare le onde di pressione;
- estensioni del condotto di scarico (*tailpipe*) dotate di *liner* acustici, che assorbono parte dell'energia sonora prima che venga irradiata all'esterno;
- *guide vanes*, per una più efficiente canalizzazione del flusso, contribuendo a minimizzare le disuniformità che generano turbolenza e rumore.

Sebbene tali soluzioni abbiano permesso a numerosi velivoli di proseguire l'operatività nel rispetto dei limiti acustici, esse comportano un incremento del peso complessivo del propulsore e un aumento del consumo di carburante, penalizzando marginalmente le prestazioni aerodinamiche e propulsive.

Parallelamente, la ricerca sta esplorando tecnologie ibride e attive per il controllo del rumore, che puntano a intervenire in tempo reale sulla propagazione delle onde acustiche. Tra queste:

- l'impiego di algoritmi predittivi integrati nei sistemi FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*), in grado di modulare dinamicamente il regime del motore e le condizioni operative per ridurre il rumore emesso in determinati scenari;

- lo sviluppo di sistemi ANC (*Active Noise Control*) applicati al flusso motore: attraverso una rete di microfoni, sensori e attuatori, è possibile generare segnali acustici in controfase, in grado di cancellare le onde sonore indesiderate all'interno dei condotti motore.

Queste soluzioni attive sono ancora in fase sperimentale, ma rappresentano una delle prospettive più promettenti per il futuro della propulsione a basso impatto acustico, soprattutto in un contesto normativo in costante evoluzione.

3.4.6 Prospettive future: *open rotor*, motori ibridi e tecnologie acustiche avanzate

Per il futuro, le traiettorie di sviluppo della propulsione aeronautica si stanno orientando verso configurazioni radicalmente innovative, con l'obiettivo di raggiungere gli obiettivi climatici e ambientali fissati per il 2035-2050. La sfida sarà coniugare le prestazioni acustiche con efficienza, peso, compatibilità aerodinamica e sostenibilità ambientale.

Tra i concetti più promettenti rientrano i motori *open rotor*, una tipologia di propulsori privi di nacelle caratterizzati da eliche controrotanti ad alto rendimento e bypass ratio superiori a 20:1. Questi propulsori offrono efficienze paragonabili a quelle di un turboprop, ma con velocità di crociera simili a quelle dei turbofan e permettendo importanti risparmi di carburante. Tuttavia presentano un'emissione acustica complessa, in particolare per la presenza di rumore tonale marcato pertanto le attuali ricerche mirano all'ottimizzazione delle pale e all'integrazione di carenature acustiche per contenerne l'impatto sonoro generato.



Figura 3.15: *Open Fan architecture of the CFM RISE program*^[23]

Un'altra direzione importante è quella della propulsione ibrida-elettrica, resa possibile dallo sviluppo di motori elettrici ad alta densità di potenza e dalla loro integrazione con turbine a gas. Tali architetture, in particolare quelle seriali-ibride, si prestano bene all'impiego su aerei regionali grazie ai requisiti di potenza più contenuti e alle rotte brevi, per cui permettono di sfruttare la propulsione elettrica che è più silenziosa di quella termica.

Connessa a questa visione è la propulsione distribuita, che prevede l'installazione di tanti piccoli fan elettrici lungo l'apertura alare. Questo permetterebbe di eliminare le tradizionali sorgenti puntuali di rumore e migliorare l'efficienza aerodinamica, riducendo le emissioni acustiche complessive grazie alla possibilità di ottimizzare localmente la spinta e le interazioni tra flusso e struttura.

L'evoluzione del trasporto urbano porta a considerare le implicazioni acustiche dell'*Urban Air Mobility* UAM, in particolare i droni e i velivoli eVTOL (*electric Vertical TakeOff and Landing*) destinati a operare in ambienti ad alta densità urbana. Questi dovranno affrontare l'effetto delle riflessioni sonore generate dalle superfici costruite pertanto sarà necessario rendere questi velivoli compatibili con la convivenza urbana, con una progettazione orientata alla minimizzazione del disturbo amplificato.

Un altro elemento che sta acquisendo importanza crescente sono le superfici mobili adattive e morfologiche, ali e impennaggi in grado di cambiare forma in volo migliorando l'aerodinamica e riducendo la generazione di vortici e, di conseguenza, di rumore aerodinamico.

Dal punto di vista dei materiali, si sperimenta l'uso di *liner* realizzati con metamateriali, materiali con strutture interne progettate per deviare, assorbire o rifrangere le onde sonore in modo selettivo, superando le prestazioni dei *liner* convenzionali. Sono in grado di modificare la propria risposta acustica in funzione della frequenza incidente, adattandosi dinamicamente alle condizioni operative del motore.

Infine, la progettazione acustica beneficia oggi di strumenti di simulazione numerica avanzata noti come *Computational Aeroacoustics* CAA, che integrano fluidodinamica computazionale e modelli di propagazione acustica così da ottenere soluzioni acusticamente ottimali già nelle fasi preliminari del design.

L'insieme di queste tecnologie rappresenta l'avanguardia della ricerca aeroacustica contemporanea e risponde alla crescente esigenza di ridurre l'impatto del rumore aeronautico nei pressi degli aeroporti e nei centri urbani, in linea con i futuri standard normativi e la progressiva urbanizzazione delle aree aeroportuali.

3.4.7 Mitigazione operativa del rumore grazie alle procedure di volo

Oltre agli interventi progettuali e tecnologici, anche il modo in cui un aeromobile opera gioca un ruolo determinante nella riduzione del rumore percepito. Le procedure di volo ottimizzate rappresentano una leva fondamentale per contenere l'impatto acustico soprattutto in fase di decollo, atterraggio e rullaggio. Tra le principali strategie operative si individuano:

- Continuous Descent Approach CDA: prevede una discesa continua con spinta minima o in regime di idle, riducendo il numero di tratti livellati e la necessità di riapplicare potenza. Questo consente di limitare la rumorosità complessiva nella fase di avvicinamento e di ridurre il consumo di carburante;
- impostazioni ridotte dei flap: l'impiego di configurazioni alari con minore estensione, laddove compatibile con le condizioni di pista, riduce il rumore aerodinamico generato dall'interazione tra flusso d'aria e superfici mobili;
- piste e rotte preferenziali per il rumore: alcuni aeroporti adottano specifici orientamenti di decollo e atterraggio, soprattutto in orari sensibili, per evitare il sorvolo di aree densamente abitate;
- procedure NADP (*Noise Abatement Departure Procedure*): attraverso una riduzione della potenza e/o dei profili di salita specifici, permettono di guadagnare rapidamente quota prima di sorvolare le aree residenziali e si distinguono in:
 - NADP 1, ottimale per ridurre il rumore nelle immediate vicinanze dell'aeroporto, consiste nel mantenere la configurazione di decollo fino a 3000 ft, riducendo precocemente la potenza motore ma ritardando la retrazione dei flap;
 - NADP 2, utile per contenere il rumore in aree più lontane, penalizzando però la silenziosità nella zona aeroportuale, prevede una retrazione anticipata dei flap e l'accelerazione dell'aeromobile già a 800-1500 ft, con riduzione della potenza in seguito.

- approccio ripido (*Steep Approach*): una traiettoria di discesa più inclinata consente di mantenere la velocità d'approccio con minore spinta, riducendo il rumore percepito al suolo, tuttavia richiede delle certificazioni specifiche sia per velivoli che per equipaggi;
- *reverse thrust* limitato: dopo l'atterraggio, l'uso della sola spinta inversa in idle consente una riduzione significativa del rumore. Alcuni aeroporti ne vietano l'impiego al massimo regime durante le ore notturne, a meno che non sia necessario per motivi di sicurezza;
- spegnimento dell'APU a terra: in molti scali è previsto l'obbligo di spegnere l'unità di potenza ausiliaria una volta parcheggiati, sostituendola con sistemi a terra come GPU (*Ground Power Unit*) e *air conditioning unit* esterni, per limitare il rumore durante la sosta in piazzola;
- mappe di contorno acustico: gli aeroporti utilizzano mappe isofone per rappresentare le aree più impattate dal rumore e pianificare le procedure in modo da minimizzare l'esposizione della popolazione residente;
- coprifuoco e restrizioni locali: molti aeroporti impongono limitazioni operative in fasce orarie notturne e incentivano economicamente l'uso di velivoli più silenziosi tramite sconti sulle tariffe di atterraggio o assegnazione di slot preferenziali.

Queste misure, combinate a strategie progettuali e tecnologiche, rappresentano un pilastro fondamentale per l'integrazione sostenibile del traffico aereo nel contesto urbano.

3.5 I principali modelli di motori aeronautici in uso e il loro profilo acustico

Lo scopo di questa sezione è approfondire i principali modelli di motori aeronautici oggi in uso, descrivendone le caratteristiche propulsive e acustiche. Questo approfondimento non ha solo una finalità enciclopedica: rappresenta un passaggio cruciale per dare coerenza e continuità all'attività sperimentale svolta nel presente lavoro di tesi. L'obiettivo è risalire al modello dell'aeromobile e al tipo di motore installato così da associare le emissioni acustiche misurate sul campo con specifiche architetture propulsive, permettendo una valutazione più mirata dell'impatto acustico dei diversi motori in condizioni operative reali.

L'approccio seguito, infatti, si concentra sul comportamento acustico reale dei velivoli analizzato in condizioni operative variabili e comprende i dati di certificazione acustica ICAO *Annex 16, Chapter 3-4-14*, focalizzandosi sui motori più diffusi in ambito commerciale, regionale e generale.

La generazione di rumore da parte di un motore aeronautico dipende in larga misura dal suo principio di funzionamento e dall'architettura interna. Attualmente, il panorama dei motori commerciale è dominato dai turbofan ad alto rapporto di bypass, progettati per garantire un compromesso ottimale tra prestazioni, efficienza e contenimento del rumore. Di seguito si riportano i principali modelli in uso e le relative caratteristiche acustiche.

Parallelamente, in ambito dell'aviazione generale, rivestono un ruolo significativo gli elicotteri con motori a pistoni o turboalbero, ciascuno con peculiari modalità di generazione del rumore legate sia alla propulsione che alle caratteristiche aerodinamiche delle eliche e dei rotori.

Infine, alla luce del panorama aeronautico in continua evoluzione e dell'emergere di nuove tecnologie, si è ritenuto opportuno includere un accenno anche ai droni e ai sistemi a pilotaggio remoto, con particolare riguardo agli aspetti normativi delle certificazioni acustiche.

3.5.1 Motori per aeromobili *narrow-body*

Nelle immagini seguenti sono riportati i motori per aeromobili *narrow-body* più diffusi, collegati con i principali tipi di aeromobili sui quali possono essere installati.



Figura 3.16: CFM CFM56

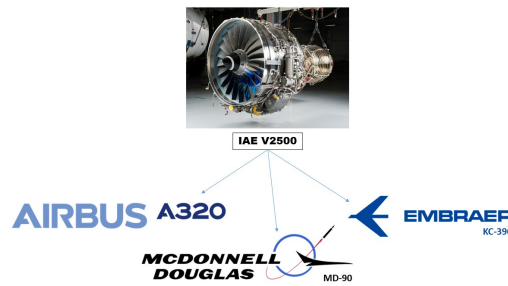


Figura 3.17: IAE V2500



Figura 3.18: CFM LEAP



Figura 3.19: PW1000G geared Turbofan

CFM56 (CFM International)

Storicamente uno dei motori turbofan più diffusi al mondo è il CFM56, frutto della collaborazione tra GE Aviation (Stati Uniti) e Snecma (oggi Safran Aircraft Engines, Francia). Il motore nasce negli anni Settanta dalla *joint venture* CFM International e il nome “CFM56” riflette questa origine, combinando i riferimenti ai programmi propulsivi CF6 di GE e M56 di Snecma. Da allora il CFM56 è diventato il motore a reazione più venduto al mondo, punto di riferimento per robustezza, affidabilità e versatilità applicativa, ed è installato su una vasta gamma di velivoli, sia civili che militari. Le sue versioni principali includono:

- il CFM56-3, adottato dalla serie Boeing 737 Classic (-300/-400/-500);
- il CFM56-5A/B/C, destinati alla famiglia Airbus A320ceo (*current engine option*) e all'A340-200/-300;
- il CFM56-7B, sviluppato per la serie Boeing 737 Next Generation (-600/-700/-800/-900).

Questa longevità progettuale è dovuta a un'ampia modularità e a costi di manutenzione contenuti, che hanno contribuito al successo del motore presso le compagnie aeree di tutto il mondo. Il bypass ratio, compreso generalmente tra 5:1 e 6:1, ha rappresentato per decenni un buon compromesso tra efficienza e contenimento delle emissioni sonore, sebbene oggi sia stato superato dai motori di nuova generazione (con BPR superiori a 10:1).

Dal punto di vista acustico, le versioni iniziali del CFM56, come la -3, presentavano livelli di rumore più elevati e sono state certificate secondo gli standard ICAO *Chapter 3*. Con l'introduzione delle versioni -5 e -7, migliorate grazie ad alette di guida aerodinamiche tridimensionali in uscita, un ugello *core* di tipo *chevron*, rivestimenti migliorati dell'invertitore e dell'ingresso della nacelle, il motore ha ottenuto la certificazione *Chapter 4*, con una riduzione sensibile delle emissioni sonore.

Le configurazioni più recenti del CFM56 hanno introdotto migliorie per mitigare l'intensità e la frequenza di queste emissioni, contribuendo a ridurre l'impatto acustico complessivo del traffico aereo, sebbene non ai livelli dei motori certificati *Chapter 14*.

L'EASA pubblica un database dei livelli di rumore di certificazione contenente tutte le configurazioni di aeromobili approvate. Facendo riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 4* del CFM56, tenendo sempre presente che questi valori variano in base alla configurazione del velivolo, peso al decollo e condizioni operative specifiche. Nel caso del CFM56-5B4/3 su A320-214:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
93,4	97,0	3,6	85,8	91,8	6,0	95,5	100,7	5,2

Tabella 3.1: NOISE LEVELS (EPNdB) del CFM56-5B4/3 su A320-214

Nel caso del CFM56-7B24 su B737-800:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
91,6	97,0	5,4	88,2	91,9	3,7	96,7	100,7	4,0

Tabella 3.2: NOISE LEVELS (EPNdB) del CFM56-7B24 su B737-800

IAE V2500 (International Aero Engines)

Il V2500 è un motore turbofan sviluppato dal consorzio IAE (International Aero Engines) che fu fondato nel 1983 come joint venture tra Rolls-Royce, Pratt & Whitney, MTU Aero Engines, Japanese Aero Engines Corporation (JAEC) e Fiat Avio. L'obiettivo era competere con il CFM56 nella fornitura di propulsori per aeromobili a fusoliera stretta, in particolare per la famiglia Airbus A320ceo. Oltre agli Airbus A319, A320 e A321, è stato utilizzato anche su altri velivoli come il McDonnell Douglas MD-90 e alcuni business jet della famiglia Embraer KC-390.

Dal punto di vista tecnico, il V2500 presenta un rapporto di bypass di circa 4.5-5:1, a seconda della variante, e ha introdotto miglioramenti rispetto ai motori della generazione precedente grazie a una maggiore efficienza aerodinamica e all'ottimizzazione del flusso bypass. Le emissioni sonore del V2500 variano in funzione del modello di aeromobile e delle condizioni operative, valori comunque inferiori ai limiti imposti dal *Chapter 4* ma più elevati rispetto agli attuali motori *Chapter 14*.

Sempre facendo riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 4* del V2500. Nel caso del V2500-A1 su A320-231:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
92,3	96,9	4,6	86,9	91,7	4,8	95,7	100,7	5,0

Tabella 3.3: NOISE LEVELS (EPNdB) del V2500-A1 su A320-231

LEAP (CFM International)

Il LEAP (*Leading Edge Aviation Propulsion*) è un motore turbofan di ultima generazione lanciato nel 2008 da CFM International, *joint venture* tra GE Aerospace (USA) e Safran Aircraft Engines (Francia). Rappresenta l'evoluzione tecnologica del CFM56 e ne raccoglie l'eredità per i *narrow-body* di nuova generazione. È disponibile in tre versioni:

- LEAP-1A per la famiglia Airbus A320neo;
- LEAP-1B per il Boeing 737 MAX;
- LEAP-1C per il Comac C919 (è ancora in fase di sviluppo il motore ACAE/AECC CJ-1000A destinato a rappresentare l'alternativa nazionale, così da ridurre la dipendenza tecnologica dall'estero, sempre mantenendo efficienza nei consumi e contenimento del rumore).

Dal punto di vista propulsivo, il LEAP è un turbofan a doppio albero con rapporto di bypass elevato, circa 11:1, che utilizza materiali all'avanguardia come le pale delle ventole 3D RTM (*Resin Transfer Molding*) in materiale composito a matrice ceramica (CMC), che garantiscono leggerezza, resistenza alle alte temperature e minore rumorosità. Il motore incorpora inoltre tecnologie avanzate, come una turbina ad alta pressione più durevole e soprattutto il *Reverse Bleed System* (RBS), un sistema introdotto per ridurre il fenomeno del *fuel nozzle coking* (formazione di depositi carboniosi). Quel che accade è che, dopo lo spegnimento del motore, questo sistema alimenta il *core* con aria in direzione inversa, aiutando a raffreddare gli ugelli e a prevenire accumuli carboniosi, migliorando così la durabilità del motore.

Uno dei punti di forza del LEAP è l'aspetto acustico in quanto il motore è stato certificato secondo lo standard ICAO *Chapter 14*, attualmente il più restrittivo in materia di emissioni sonore per l'aviazione civile. Rispetto alla precedente generazione, infatti, garantisce una riduzione media del rumore percepito, inoltre, grazie all'efficienza propulsiva migliorata, il motore contribuisce anche alla riduzione delle emissioni di CO_2 e NO_x , rafforzando il legame tra sostenibilità ambientale e acustica.

Facendo riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO del LEAP. Nel caso del LEAP-1A26E1 su A320-251N (ICAO *Chapter 14*):

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
86,2	97,0	10,8	81,5	91,9	10,4	92,3	100,7	8,4

Tabella 3.4: NOISE LEVELS (EPNdB) del LEAP-1A26E1 su A320-251N

Nel caso del LEAP-1B27 su 737 MAX 8 (ICAO *Chapter 4*):

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
87,9	97,2	9,3	83,6	92,1	8,5	94,2	100,9	6,7

Tabella 3.5: NOISE LEVELS (EPNdB) del LEAP-1B27 su 737 MAX 8

PW1000G *geared* Turbofan (Pratt & Whitney)

La famiglia PW1000G (PurePower *geared* Turbofan) è una delle innovazioni più significative nella propulsione aeronautica dei primi anni 2000. Sviluppata da Pratt & Whitney, rappresenta una svolta rispetto ai turbofan convenzionali grazie all'introduzione di un riduttore epicicloidale, una *gearbox*, che separa la velocità di rotazione del fan da quella della turbomacchina e consente alla ventola e alla turbina di girare a velocità ottimizzate in modo indipendente.

Questa architettura consente al fan di essere di dimensioni maggiori rispetto ai motori tradizionali e di operare a una velocità inferiore, riducendo in modo significativo il rumore generato dal passaggio delle pale. Parallelamente, la turbina può funzionare a regimi più elevati, migliorando l'efficienza termodinamica e meccanica. Il risultato è un motore che offre una riduzione dei consumi fino al 20% rispetto ai turbofan di precedente generazione, insieme a prestazioni acustiche nettamente migliorate: le prove di certificazione condotte secondo lo standard ICAO *Annex 16, Chapter 14*, hanno evidenziato una riduzione del rumore del 75% rispetto ai motori della generazione precedente. Ne esistono versioni differenti ma le principali sono:

- PW1500G, adottato in esclusiva dall'A220;
- PW1100G, sviluppato per l'A320neo;
- PW1700G & PW1900G, progettato in esclusiva per la famiglia Embraer E-Jet E2.

In riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 14* del PW1000G. Nel caso del PW1124G1-JM su A320-272N:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
85,3	97,0	11,7	83,0	91,9	8,9	92,6	100,7	8,1

Tabella 3.6: NOISE LEVELS (EPNdB) del PW1124G1-JM su A320-272N

3.5.2 Motori per aeromobili *wide-body*

Nelle immagini seguenti sono riportati i motori per aeromobili *wide-body* più diffusi, collegati con i principali tipi di aeromobili sui quali possono essere installati.

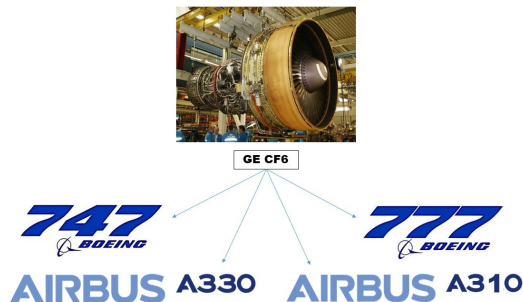


Figura 3.20: GE CF6

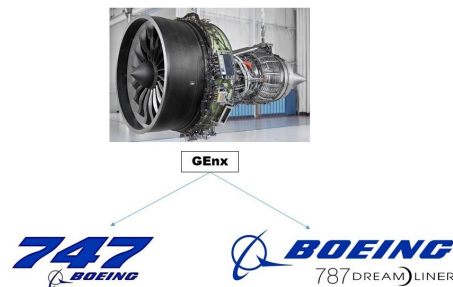


Figura 3.21: GENx



Figura 3.22: GE90/GE9X



Figura 3.23: Trent 700/Trent 7000

Figura 3.24: Trent 1000/Trent XWB

GE CF6 (General Electric)

Il General Electric CF6 è uno dei turbofan a lungo raggio più longevi e diffusi nella storia dell'aviazione civile e cargo. Sviluppato a fine anni Sessanta, fu progettato per rispondere alle crescenti esigenze di efficienza propulsiva e affidabilità imposte dall'espansione del traffico aereo commerciale internazionale. Il CF6 è un turbofan *dual rotor* con rapporto di bypass compreso tra 4,2:1 e oltre 5:1 a seconda delle varianti (-6, -50, -80A, -80C2, -80E1), ognuna adattata alle esigenze di diversi costruttori e configurazioni di velivolo.

Dal punto di vista acustico, il CF6 è generalmente certificato secondo ICAO *Chapter 3* o 4, pertanto rappresenta una generazione intermedia tra i turbofan a basso bypass e quelli di ultima generazione certificati secondo ICAO *Chapter 14*. Per i velivoli *wide-body*, le varianti sono principalmente:

- CF6-80A, per il Boeing 767-200 e alcune versioni dell'A310;
- CF6-80C2, per il Boeing 747-400 e 767-300/-400 e le ultime versioni dell'A310;
- CF6-80E1, per l'Airbus A330.

Facendo riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 4* del CF6. Nel caso del CF6-80E1A4 su A330-202:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
98,8	101,2	2,4	93,6	98,3	4,7	99,0	104,5	5,5

Tabella 3.7: NOISE LEVELS (EPNdB) del CF6-80E1A4 su A330-202

Trent 700/Trent 7000 (Rolls-Royce)

Tra i motori turbofan più rilevanti per l'aviazione *wide-body*, un ruolo centrale è occupato dal Rolls-Royce Trent 700, progettato per equipaggiare l'Airbus A330ceo a partire dagli anni '90. Si tratta del primo modello della famiglia Trent ad essere impiegato su larga scala, caratterizzato dalla configurazione a tre alberi coassiali (*three coaxial shafts*) soluzione distintiva di Rolls-Royce, che consente una gestione più flessibile ed efficiente delle diverse sezioni del motore. Il Trent 700 presenta un bypass ratio di circa 5:1, in linea con i requisiti dell'epoca, mentre nonostante l'adozione di rivestimenti fonoassorbenti (*acoustic liners*), la sua certificazione ICAO rientra solitamente nel *Chapter 4*.

A raccogliere l'eredità del Trent 700 è il più recente Trent 7000, sviluppato per l'Airbus A330neo e introdotto in servizio nel 2018. Questo motore rappresenta un'evoluzione sostanziale, sia dal punto di vista propulsivo che ambientale. Pur mantenendo la configurazione *three coaxial shafts*, il Trent 7000 raddoppia il bypass ratio rispetto al predecessore, portandolo a valori superiori a 10:1, grazie a un ventilatore di diametro maggiore e alla riduzione della velocità di rotazione del fan, soluzione che contribuisce in modo significativo anche alla riduzione del rumore generato. Il motore eredita molte tecnologie dal Trent 1000 TEN, come i materiali compositi nel fan e i *liner* acustici avanzati, che consentono un abbattimento del rumore percepito fino a 6 dB rispetto al Trent 700. Questo lo rende conforme alla più stringente normativa ICAO *Chapter 14* e la combinazione di efficienza propulsiva e silenziosità ne fa una delle soluzioni più performanti nel segmento dei bimotori a lungo raggio di nuova generazione.

In riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 14* del Trent 700 (del suo modello più recente) e del Trent 7000. Nel caso del Trent 772C-60 su A330-243:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
97,3	101,1	3,8	91,9	98,3	6,4	96,9	104,5	7,6

Tabella 3.8: NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent 772C-60 su A330-243

Nel caso del Trent 7000-72 su A330-841:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
92,4	101,3	8,9	90,4	98,5	8,1	98,2	104,6	6,4

Tabella 3.9: NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent 7000-72 su A330-841

GE90/GE9X (General Electric)

Il General Electric GE90 è uno dei motori turbofan più potenti mai sviluppati per l'aviazione commerciale. Progettato negli anni '90 per equipaggiare esclusivamente il Boeing 777, rappresenta una pietra miliare nel settore dei motori ad alto bypass ratio. Dal punto di vista tecnico, il GE90 è un turbofan con bypass ratio compreso tra 8:1 e 9:1, valori che contribuiscono alla sua efficienza propulsiva e al contenimento delle emissioni acustiche, ed è dotato di un ventilatore di grandi dimensioni. In particolare, è stato il primo motore commerciale ad adottare pale fan in fibra di carbonio composite su larga scala, contribuendo alla riduzione di peso e alla silenziosità. Le varianti più recenti del GE90 sono certificate ICAO *Chapter 4* e, anche se non raggiunge i livelli di silenziosità dei motori più moderni, ha rappresentato un punto di svolta per l'aeroacustica nei motori *long-range*.

Il GE9X, sviluppato nel 2018 come propulsore esclusivo per il nuovo Boeing 777X, ne raccoglie l'eredità spingendosi oltre. Ad oggi è il più grande motore turbofan mai costruito per l'aviazione commerciale e con un bypass ratio superiore a 10:1, abbinato a un rapporto di compressione complessivo record di circa 61:1, consente una riduzione significativa dei consumi e delle emissioni. Per ogni libbra di spinta statica prodotta, il GE9X è il motore turbofan più silenzioso che GE Aerospace abbia mai prodotto ed è progettato per soddisfare gli standard di certificazione acustica ICAO *Chapter 14*, la più stringente attualmente in vigore. Facendo riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 4* del GE90. Nel caso del GE90-115B su B777-200LR:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
99,2	102,5	3,3	92,0	100,4	8,4	100,3	105,0	4,7

Tabella 3.10: NOISE LEVELS (EPNdB) del GE90-115B su B777-200LR

GENx (General Electric)

Il General Electric GENx (*General Electric Next-generation*) è uno dei motori turbofan più avanzati attualmente in servizio e rappresenta l'evoluzione tecnologica del GE90. È stato sviluppato per equipaggiare due delle più importanti piattaforme *wide-body* moderne: il Boeing 787 Dreamliner (nella versione GENx-1B) e il Boeing 747-8 (nella versione GENx-2B67). Fin dal progetto iniziale, il GENx è stato concepito per ridurre drasticamente il consumo di carburante, le emissioni ambientali e soprattutto il rumore, pur garantendo elevata affidabilità e lunghi intervalli tra le revisioni.

Il GENx presenta un fan in materiale composito con pale a forma di scimitarra (*swept composite blades*) che migliorano l'efficienza aerodinamica. Il bypass ratio è di 9:1 e il rapporto di compressione complessivo è circa 58:1, numeri che collocano il motore tra i più efficienti mai costruiti per l'aviazione commerciale. Per mitigare le emissioni sonore, ha introdotto *chevrons* sull'ugello del fan e del *core* per ridurre il rumore da jet e la discontinuità tra flussi caldi e freddi, rendendo il GENx certificato ICAO *Chapter 4*.

In riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 4* del GENx. Nel caso del GENx-1B64 su B787-8:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
90,3	100,9	10,6	88,3	98,0	9,7	95,7	104,3	8,6

Tabella 3.11: NOISE LEVELS (EPNdB) del GENx-1B64 su B787-8

Trent 1000/Trent XWB (Rolls-Royce)

Il Rolls-Royce Trent 1000 è un motore turbofan sviluppato specificamente per il Boeing 787 Dreamliner. Entrato in servizio nel 2011, fa parte della famiglia Trent nota per l'architettura a tre alberi coassiali, in grado di garantire una maggiore flessibilità nella gestione delle velocità rotazionali dei diversi stadi (fan, compressore intermedio, compressore ad alta pressione). Questo motore presenta un bypass ratio di circa 10:1 e un rapporto di compressione totale superiore a 50:1, caratteristiche che lo collocano tra i propulsori più moderni della sua classe. Grazie a una nacelle a bassa rumorosità e all'aerodinamica avanzata delle pale di seconda generazione del fan, il Trent 1000 è certificato come ICAO *Chapter 4*. Il suo successivo miglioramento, denominato Trent 1000 TEN (*Thrust, Efficiency, New technology*), è stato introdotto nel 2016 e ha incorporato innovazioni ispirate al Trent XWB e al Trent 7000, migliorando ulteriormente durabilità, efficienza e silenziosità.

Il Trent XWB del 2013, invece, è stato progettato esclusivamente per l'Airbus A350 (-900/-1000) e rappresenta il *large aero-engine* più efficiente al mondo. Con un bypass ratio di 9,6:1 e un rapporto di compressione di 50:1, impiega tecnologie acustiche che sono un'evoluzione di quelle utilizzate dal Trent 1000: pale fan in materiale composito e condotti acusticamente trattati lo hanno reso 14dB più silenzioso rispetto al motore Trent 800 prodotto nel 1997, risultando compatibile con i requisiti della certificazione ICAO *Chapter 14*.

Facendo riferimento al file *Jet aeroplanes noise database*^[24], è possibile osservare esempi di certificazione acustica ICAO *Chapter 4* del Trent 1000 e ICAO *Chapter 14* del Trent XWB. Nel caso del Trent 1000-A/01 su B787-8:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
91,0	100,9	9,9	91,5	98,0	6,5	96,8	104,3	7,5

Tabella 3.12: NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent 1000-A/01 su B787-8

Nel caso del Trent XWB-97 su A350-1041:

LATERAL			FLYOVER			APPROACH		
LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN	LEVEL	LIMIT	MARGIN
94,7	102,1	7,4	89,8	99,9	10,1	96,8	105,0	8,2

Tabella 3.13: NOISE LEVELS (EPNdB) del Trent XWB-97 su A350-1041

3.5.3 Motori per l'aviazione regionale, business e generale

Oltre ai velivoli commerciali *narrow-/wide-body*, una quota significativa del traffico aereo è rappresentata da aeromobili regionali e dell'aviazione generale. Questi velivoli impiegano motori con caratteristiche propulsive e acustiche differenti, spesso più contenute in potenza, ma comunque rilevanti dal punto di vista dell'impatto locale, specialmente in fase di decollo e avvicinamento.

Nel settore regionale, gli aerei ATR 42 e 72 montano motori turboprop Pratt & Whitney PW100 a turbina libera. Tali propulsori, grazie alla loro efficienza operativa alle basse velocità e alla natura subsonica del flusso elicoidale, generano un rumore prevalentemente a bassa frequenza, percepito come pulsante ma relativamente contenuto in ampiezza. I modelli più recenti sono certificati secondo i requisiti ICAO *Chapter 14* e sono considerati tra i velivoli più silenziosi della loro classe.

Gli Embraer E-Jets (E170, E190, E195) impiegano invece turbofan General Electric CF34, con bypass ratio compreso tra 5:1 e 6:1. Derivati da motori militari e regionali, questi propulsori offrono buone prestazioni ma non presentano soluzioni acustiche particolarmente avanzate, tuttavia, soddisfano la certificazione *Chapter 4*. La nuova generazione Embraer E2 introduce invece motori GTF PW1900G, con miglioramenti significativi anche sul fronte acustico.

Una configurazione simile è riscontrabile nei Bombardier CRJ (serie CRJ200 e CRJ900), che montano motori CF34 condividendo prestazioni e impatto sonoro con gli E-Jets. Si tratta di propulsori di generazione ormai consolidata, certificati *Chapter 4*, ma privi delle ottimizzazioni tipiche dei motori più moderni.

I De Havilland Dash 8 Q400 (DHC-8) adottano turboprop PW150A, che rappresentano una versione più recente ed efficiente della famiglia PW100. L'utilizzo di eliche *Dowty* a sei pale *swept* combinate con un sistema di soppressione attiva del rumore e delle vibrazioni (ANVS), consente una riduzione efficace del livello di rumore dell'elica all'interno dell'aeromobile per il comfort della cabina. In questa maniera il Dash 8 soddisfa la certificazione *Chapter 14*, progettato espressamente per ridurre il rumore durante le operazioni in aeroporti regionali.

Nel campo dell'aviazione d'affari, la varietà di propulsori è ampia ma generalmente riconducibile a una categoria di turbofan di media potenza, con bypass ratio compresi tra 3:1 e 4,5:1. Tra i più diffusi figurano i Honeywell TFE731, i Pratt & Whitney PW300/500 e i Rolls-Royce BR710 e BR725. I velivoli che ne fanno uso, come i Bombardier Challenger 600/650, i Gulfstream GLEX/G500/G700 e i Dassault Falcon, rispettano prevalentemente il *Chapter 4* con alcune eccezioni più recenti, come il G700 con motori BR725 che è certificato *Chapter 14* e integra tecnologie per la mitigazione del rumore, tra cui *acoustic liners* ottimizzati e fan in composito.

Infine, per i velivoli leggeri dell'aviazione generale (come Cessna Citation, Beechcraft King Air, Pilatus PC-12), le motorizzazioni spaziano dai turboprop Pratt & Whitney PT6 ai turbofan Williams FJ44. Pur trattandosi di propulsori meno potenti, il loro contributo all'impatto acustico può essere significativo a livello locale, soprattutto nelle fasi di decollo ravvicinato alle centraline di misura. Anche in questi casi, le certificazioni acustiche rientrano generalmente nei requisiti del *Chapter 4*, benché l'eterogeneità della flotta renda complessa una classificazione univoca.

3.5.4 Motori per elicotteri

Gli elicotteri rappresentano una categoria particolare di velivoli, caratterizzati dalla capacità di decollo e atterraggio verticale e dal volo stazionario. Il cuore propulsivo di un elicottero è il motore, che fornisce la potenza necessaria per azionare il rotore principale e, nei modelli tradizionali, anche il rotore di coda per il controllo dell'assetto. In funzione della classe e delle missioni operative, gli elicotteri possono essere equipaggiati con due principali tipologie di propulsori:

- motori a pistoni, analoghi a quelli automobilistici, si basano sul moto alternativo dei pistoni nei cilindri e, per la semplicità costruttiva e l'affidabilità, sono tipici degli elicotteri leggeri da

addestramento e aviazione generale, mentre sono limitati in termini di potenza ed efficienza per applicazioni più impegnative;

- motori turboalbero (turboshaft), hanno come principio di funzionamento il passaggio dei gas caldi prodotti dalla combustione attraverso una turbina, che va ad azionare il rotore principale. Dato che garantiscono elevati rapporti peso/potenza e ampia versatilità operativa, sono idonei a una gamma molto vasta di impieghi ed infatti vengono utilizzati per elicotteri civili e militari di media e grande dimensione.

Una distinzione fondamentale riguarda il numero di motori installati: gli elicotteri possono essere monomotore o bimotores e questa caratteristica influisce direttamente sulle prestazioni, sull'autonomia e soprattutto sulle procedure di sicurezza. Gli elicotteri monomotore si distinguono per la loro semplicità costruttiva e i costi operativi contenuti, caratteristiche che li rendono ideali per la formazione, il volo turistico e le missioni a corto raggio. La ridotta complessità del motore facilita inoltre la manutenzione e migliora l'efficienza nei consumi, pur garantendo livelli di sicurezza adeguati grazie a procedure come l'autorotazione in caso di guasto. Al contrario, gli elicotteri bimotores offrono una ridondanza propulsiva che permette di proseguire il volo o di atterrare in sicurezza anche in caso di avaria di un motore. Questa configurazione consente prestazioni superiori in termini di velocità, potenza e carico trasportabile, rendendo i bimotores adatti a missioni più impegnative, come il trasporto passeggeri, operazioni mediche d'emergenza e operazioni militari.

Dal punto di vista acustico, la generazione di rumore negli elicotteri è complessa e vede sorgenti diverse. La componente dominante è quasi sempre associata al rotore principale, che produce rumore di spessore (*thickness noise*), di carico (*loading noise*), di interazioni vortice-pala (BVI, *blade-vortex interaction*) responsabile del *blade slap* in discesa e di fenomeni impulsivi ad alta velocità (HSI, *high speed impulsive noise*). Altre sorgenti rilevanti includono il rotore anticoppia, soggetto a interazioni complesse con la scia del rotore principale, e il motore, che contribuisce con rumore dovuto alle turbomacchine e alla camera di combustione nei turboalbero o con il rumore di scarico nei motori a pistoni.

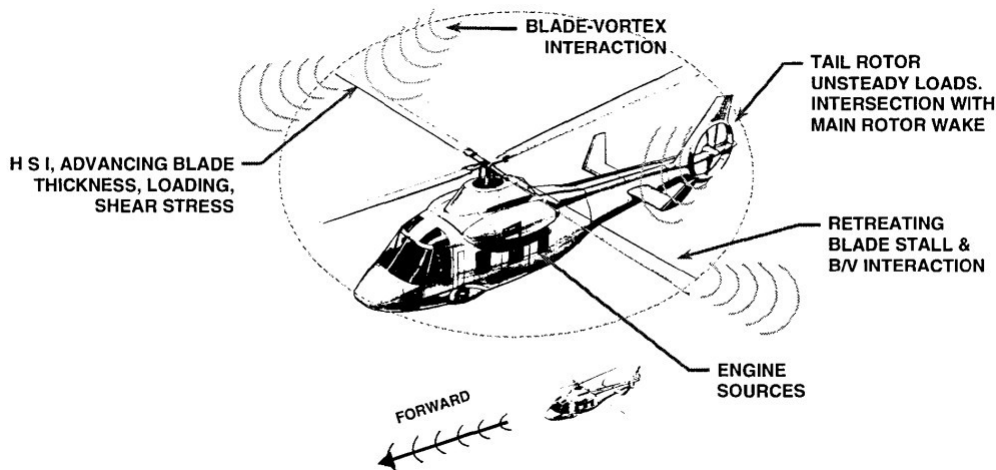


Figura 3.25: *Helicopter noise propagates from numerous sources*^[25]

Il contributo relativo di ciascuna sorgente varia sensibilmente in funzione della fase di volo: in decollo le richieste di potenza massima rendono più rilevante il contributo del motore e del rotore anticoppia, in crociera il rotore principale con fenomeni rumorosi impulsivi, mentre in

avvicinamento il responsabile principale è sempre il rotore ma per il rumore impulsivo da interazione vortice-pala. Per questi motivi, la caratterizzazione acustica degli elicotteri richiede un approccio specifico rispetto agli aeromobili ad ala fissa, con una maggiore attenzione alle condizioni operative e alle configurazioni aerodinamiche del rotore.

Gli standard sul rumore per gli elicotteri sono stati introdotti per la prima volta nel 1981 all'interno dell'ICAO *Annex 16 Volume I* e, attualmente, i requisiti applicabili agli elicotteri sono contenuti nei *Chapters 8* e *11*: il primo stabilisce le norme generali valide per tutti i tipi di elicottero, indipendentemente dalla massa e dalla configurazione, definendo i metodi di misura del rumore e i limiti da rispettare; il secondo introduce una procedura di certificazione semplificata, per gli elicotteri leggeri con massa massima al decollo certificata pari o inferiore a 3.175 kg.

Recentemente, con l'evoluzione delle tecnologie aeronautiche, l'ICAO ha riconosciuto la necessità di regolamentare anche i nuovi concetti di aeromobili a decollo e atterraggio verticale. Nel 2014, infatti, il Consiglio ICAO ha adottato specifici standard sul rumore per i *tiltrotors*, aeromobili ibridi che combinano caratteristiche di elicotteri ed aerei, includendoli nel *Chapter 13* dell'*Annex 16 Volume I*.

Tipologie più diffuse

Nel campo degli elicotteri leggeri da addestramento e trasporto privato, il Robinson R44 adotta un motore a pistoni Lycoming O-540 che può essere dotato di un grande silenziatore (*large muffler*) per ridurre il rumore, così che possa essere certificato secondo lo standard ICAO *Chapter 11*.

Nella fascia alta della categoria degli elicotteri civili, il Bell 412 adotta il motore turboalbero Pratt & Whitney PT6T Twin-Pac, che garantisce affidabilità e buone prestazioni ma non integra soluzioni avanzate per la riduzione del rumore, di conseguenza il profilo acustico generato rispetta gli standard ICAO *Chapter 8*.

Si posiziona invece nella categoria intermedia l'Airbus H125, originariamente Eurocopter AS350 Écureuil, equipaggiato con un turboshaft Safran Helicopter Engines Arriel 2D, capace di garantire un buon compromesso tra prestazioni e impatto acustico. Quest'elicottero è stato progettato per competere con il Bell 206, permettendo una diminuzione del rumore e delle vibrazioni, e per soddisfare i requisiti acustici in vigore in luoghi come i parchi nazionali. Per raggiungere l'obiettivo, sono stati impiegati materiali compositi per diversi elementi del rotore principale e per quello di coda, così da poter essere certificato secondo lo standard ICAO *Chapter 11*.

L'attuale Airbus H130, in origine Eurocopter EC130, rappresenta invece uno dei riferimenti in termini di quiete operativa: il suo motore Safran Helicopter Engines Arriel 2D è abbinato a un rotore di coda *Fenestron* a pale non equispaziate, che riduce il rumore del 50% rispetto a un *tail rotor* convenzionale. Il profilo acustico certificato in *fly-over* secondo la FAA *Part 36 Appendix H* è di 84,3 EPNdB, al di sotto dei limiti FAA *Stage 2*, e consente operazioni turistiche in aree a elevata sensibilità acustica.

Un discorso analogo vale per l'Airbus H135, tra gli elicotteri più diffusi per il trasporto medico aereo (in particolare per le operazioni *MedEvac*), per il trasporto aziendale e per le forze dell'ordine. Questo modello è equipaggiato con due turboalbero Safran Arrius 2B o Pratt & Whitney PW206B che, assieme al rotore di coda *Fenestron* e all'impiego di sistemi antivibrazione integrati nella cellula, hanno permesso di limitare le emissioni sonore percepite a terra e di rendere questo elicottero uno dei più silenziosi della sua classe.

È interessante notare come il programma sperimentale *Bluecopter*, sviluppato da Airbus Helicopters, ha utilizzato l'H135 come banco di prova per nuove soluzioni trasferibili ad altri modelli. Questo progetto ha rappresentato una piattaforma tecnologica dimostrativa con l'obiettivo di ridurre in modo significativo le emissioni acustiche e di $C0_2$ dei velivoli ad ala rotante, introducendo le pale *Blue Edge* a bordo d'attacco *swept*, la diminuzione del regime di rotazione del rotore principale del 16%, una riprogettazione del rotore *Fenestron* con un numero ridotto di statori, pale a bordo

d'attacco curvo e l'adozione di un *acoustic liner*, e la modifica dell'architettura del velivolo con l'affinamento della fusoliera e la configurazione a T della coda.

Infine, l'Airbus H160, di più recente introduzione, viene utilizzato per l'aviazione civile e presenta diverse soluzioni progettuali mirate alla riduzione del rumore. È equipaggiato con una coppia di turboshaft Safran Helicopter Arrano 1A e presenta un rotore principale a cinque pale *Blue Edge*, caratterizzato da una doppia curvatura *double-swept* che mitiga in modo significativo il fenomeno dell'interazione pala-vortice (BVI), ossia l'impatto della pala con i vortici generati in prossimità della sua estremità. Questa configurazione consente una riduzione del rumore di circa 3-4 dB rispetto a elicotteri della stessa classe ma rispetta gli standard ICAO *Chapter 8*.

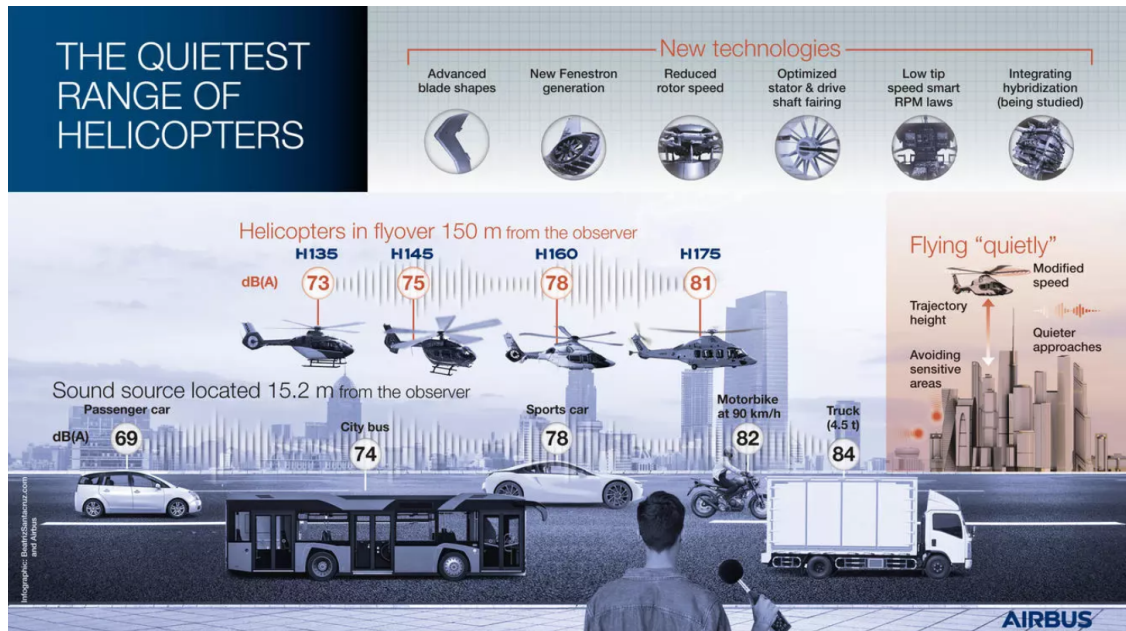


Figura 3.26: *The quietest range of helicopters*^[26]

Tra gli elicotteri bimotore medi spiccano quelli prodotti da AgustaWestland/Leonardo, come l'AW139 che monta due turboalberi Pratt & Whitney PT6C-67C, con una buona efficienza acustica tale da rispettare gli standard ICAO *Chapter 8*, e l'AW169, più moderno, che utilizza due motori Pratt & Whitney PW210A in grado di azionare il rotore principale a velocità variabili per ridurre il rumore esterno e aumentare l'efficienza, rispettando anche in questo caso gli standard ICAO *Chapter 8*.

Infine, tra i modelli civili di Sikorsky, si distingue il S-76D che adotta due turboshaft Pratt & Whitney Canada PW210S e presenta una certificazione del rumore ICAO *Chapter 8* grazie a diversi elementi: le pale del rotore principale *dual-speed* sono azionabili in modalità silenziosa, il mozzo del rotore principale è dotato di un sistema di controllo attivo delle vibrazioni e il rotore di coda è leggermente più silenzioso. Sempre di Sikorsky è l'S-92, che impiega una coppia di motori GE CT7-8A e ha un rotore a 4 pale con la punta affusolata che si inclina all'indietro e verso il basso per contenere il rumore, permettendo una certificazione ICAO di tipo *Chapter 8*.

3.5.5 Motori del futuro: droni, VTOL e UAS

Il panorama internazionale dello sviluppo aeronautico è in rapida trasformazione e, parallelamente, anche il quadro normativo sta cercando di adattarsi a queste nuove realtà. Tra i temi in evoluzione

rientra lo studio dell'impatto acustico generato dai droni, dai velivoli a decollo e atterraggio verticale VTOL (*Vertical Take-off and Landing*) e, più in generale, dai sistemi aerei senza pilota UAS (*Unmanned Aircraft Systems*). Si rende pertanto necessario chiarire le definizioni dei termini chiave nel nuovo mondo dell'aviazione, un glossario tecnico che cambia a seconda delle fonti ufficiali come EASA, ICAO e FAA. Secondo l'EASA, le definizioni aggiornate sono:

1. *Unmanned Aerial System* (UAS), noto anche come drone o *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), è costituito da tre elementi:
 - *Unmanned Aircraft* (UA), un aeromobile che può operare in modo autonomo oppure essere pilotato a distanza, senza la presenza di un pilota a bordo;
 - *Control System*, di tipo autonomo oppure gestito da un operatore umano, ha la funzione di inviare i comandi all'aeromobile e di governarne le operazioni di volo;
 - *Command and Control (C2) System* o *Communication, Command and Control (C3) system*, il collegamento tra il sistema di controllo e l'aeromobile.
2. *Electrically powered aircraft capable of Vertical Take-off and Landing* (eVTOL), non rientrano nelle categorie tradizionali di aeroplani o elicotteri, ma sono caratterizzati dalla capacità di decollo e atterraggio verticale, da sistemi di propulsione distribuita e, in futuro, dalla possibilità di operare senza pilota a bordo;
3. *VTOL-capable aircraft* (VCA), diverso dagli aeroplani o *rotorcraft*, in grado di decollare e atterrare verticalmente tramite unità di portanza e spinta;
4. *Innovative Aerial Services* (IAS), operazioni e servizi resi possibili da tecnologie aeree emergenti come trasporto merci, sorveglianza, mappatura o telecomunicazioni;
5. *Innovative Air Mobility* (IAM), mobilità aerea sicura, sostenibile e integrata in sistemi di trasporto multimodali, grazie a tecnologie di nuova generazione;
6. *Urban Air Mobility* (UAM), sottoinsieme di IAM, riguarda operazioni svolte all'interno di contesti urbani.

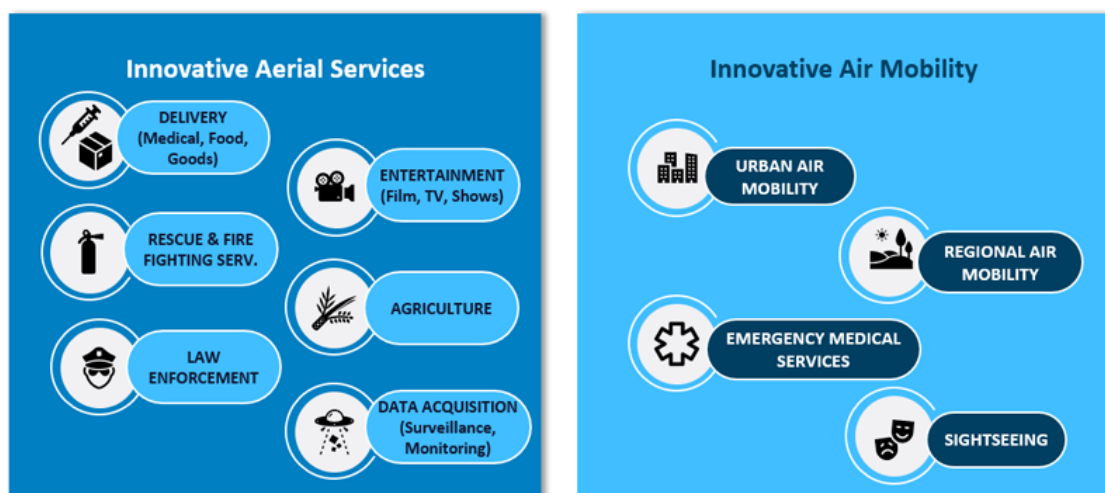


Figura 3.27: *Innovative Air Services and Mobility*^[27]

Tali definizioni subiscono, seppur in misura limitata, alcune variazioni secondo quanto stabilito dalla FAA:

1. drone, descrive qualsiasi aeromobile senza pilota a bordo, a pilotaggio remoto, indipendentemente dalle dimensioni, dalla forma o dalla capacità, andando a coincidere con l'*Unmanned Aircraft* (UA) descritto dall'EASA;
2. *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), inizialmente veniva utilizzato in modo intercambiabile con UAS ma a seguito del regolamento 14 CFR *Part* 8, per distinguere il sistema dall'aeromobile, questo termine si limita a indicare il velivolo senza pilota e quindi è una parte dell'UAS.

Internazionalmente, si sta diffondendo come sinonimo di UAS il termine RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), che rappresenta l'insieme costituito dal RPAV (*Remotely Piloted Aerial Vehicle*), dalla sua stazione di controllo, dai collegamenti di comando e da qualsiasi altro elemento di sistema necessario durante le operazioni di volo.

Per quanto concerne l'impronta acustica, diversi studi hanno analizzato lo spettro sonoro dei droni ed è emerso che i livelli sonori predominanti, non ponderati, derivano dalle frequenze di passaggio delle pale, generalmente comprese tra 100 e 300 Hz nei droni di piccole dimensioni. Altre fonti sonore secondarie includono i motori elettrici e le vibrazioni della struttura e l'insieme di questi fattori combinati produce il tipico ronzio percepito, simile a uno sciame di api. Va tuttavia evidenziato che l'impatto acustico generato dai droni a propulsione elettrica risulta solo marginalmente confrontabile, in termini di pressione sonora percepita, con quello prodotto dai motori a reazione tipici dell'aviazione convenzionale, sia per la diversa entità dei livelli sonori espressi in decibel, sia per la scala operativa significativamente ridotta.

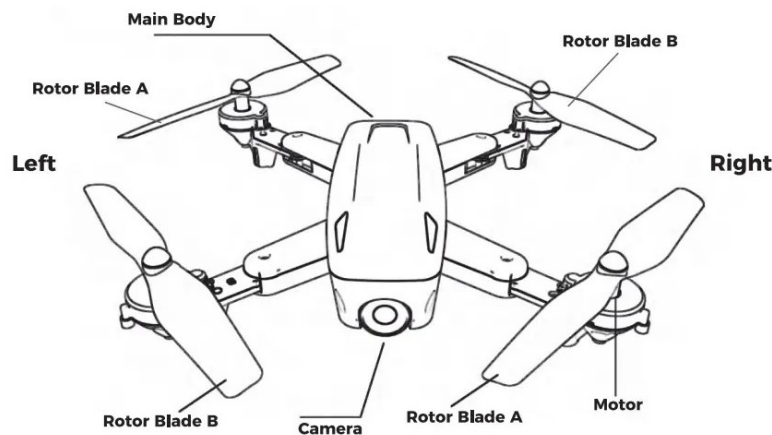


Figura 3.28: Schema drone SKYHAWK DRC442-BLK Foldable Video GPS^[28]

L'Unione Europea, tramite l'EASA, ha pubblicato linee guida per stabilire i livelli di rumore dei droni con massa al decollo inferiore a 600 kg, operanti nella categoria specifica a basso e medio rischio. Queste linee guida offrono procedure armonizzate per valutare e misurare l'impatto acustico dei droni, elaborate a seguito di una fase iniziale di consultazione pubblica che ha visto la raccolta di circa 90 commenti da parte di produttori di UAS, operatori, mondo accademico e autorità aeronautiche nazionali. Inoltre, l'EASA ha fornito un "modello di rapporto sul rumore che i richiedenti o i dichiaranti possono utilizzare per presentare i dati sul rumore, nonché un foglio di calcolo intuitivo che assiste nelle procedure di regolazione del rumore"^[29].

Entrando nel dettaglio, il documento *Guidelines on Noise Measurement of Unmanned Aircraft Systems Lighter than 600 kg Operating in the Specific Category (Low and Medium Risk)* pubblicato da EASA ha come scopo principale quello di fornire delle linee guida adatte a garantire la raccolta di dati acustici affidabili e comparabili, così da essere da supporto alle autorità competenti nella valutazione dell'impatto ambientale delle operazioni ma anche fornire indicazioni pratiche a produttori per migliorare le prestazioni acustiche dei velivoli. Il documento è strutturato in diverse sezioni, a partire dalle definizioni generali dei termini tecnici più rilevanti e dalle metriche di valutazione del rumore, nonché come correggere i dati in base alle condizioni atmosferiche. Le linee guida dettagliano anche le condizioni di riferimento e le procedure operative necessarie per le misurazioni, prestando particolare attenzione alla posizione e alla velocità del velivolo. Viene inoltre definito l'equipaggiamento richiesto, la procedura per verificare la conformità dei dati di rumore e la struttura dei rapporti di misurazione. Pur non stabilendo limiti vincolanti di rumore, queste linee guida rappresentano un riferimento fondamentale per standardizzare le misurazioni, facilitare la comparabilità dei dati e promuovere lo sviluppo di UAS più silenziosi e sostenibili, contribuendo alla tutela dell'ambiente e della salute pubblica.

Negli Stati Uniti, la FAA non dispone ancora di uno standard generale e applicabile universalmente per la certificazione acustica dei droni. I droni di piccole dimensioni, sotto i 25 kg, soggetti alla *Part 107 Small Unmanned Aircraft Systems*, sono esenti da certificazione del rumore, mentre per il resto sta rendendo disponibili norme di certificazione acustica applicabili ai singoli modelli, adottando un approccio basato su *Rules of Particular Applicability* (RPA). Si tratta di regole acustiche pubblicate caso per caso, specifiche per singoli modelli di droni di singoli produttori, e ad oggi sono stati emessi RPA per diversi modelli, tra cui il Matternet Model M2. Nel suo caso, la FAA ha pubblicato il 12 settembre 2022 i *Noise Certification Standards: Matternet Model M2 Aircraft*, "applicabili esclusivamente al velivolo senza pilota (UA) quadricottero Matternet Model M2, poiché al momento della presentazione del velivolo per la certificazione non erano disponibili norme acustiche di applicazione generale per questo velivolo"^[30]. Al momento, poiché ogni RPA riguarda un singolo produttore e un singolo modello di veicolo, non è richiesta la pubblicazione nel Registro Federale ma l'obiettivo è utilizzare queste certificazioni individuali per costruire un database acustico più robusto, utile a sviluppare in futuro uno standard acustico generale e condiviso per i droni.

Tipologie più diffuse

Esiste una grande varietà di droni, in termini di forme e dimensioni, progettati per svolgere compiti diversi. Questa diversità è possibile grazie alla scelta del motore in quanto ogni tipo di motore ha caratteristiche proprie che influiscono sulle prestazioni del drone stesso, rendendolo adatto a diverse situazioni e applicazioni. I droni impiegano fondamentalmente due categorie principali di motori:

- elettrici, largamente utilizzati nei modelli sia *consumer* che professionali grazie alla loro elevata efficienza energetica, al peso ridotto e alla risposta rapida ai comandi. La loro funzione è convertire l'energia elettrica immagazzinata nelle batterie del drone in energia meccanica, così da generare la spinta necessaria per il drone. Possono essere accelerati o arrestati rapidamente, agevolando manovre agili e precise, e non emettono gas nocivi, risultando una scelta ecocompatibile ideale per impieghi urbani, fotografia aerea e mappatura;
- a combustione interna, usati nei droni di maggiori dimensioni o quelli destinati a missioni militari che richiedono potenza elevata e prolungata autonomia. Sebbene offrano prestazioni superiori in termini di capacità di carico e durata del volo, hanno una minore efficienza energetica e generano emissioni nocive, limitandone l'impiego a contesti in cui la potenza è prioritaria rispetto all'efficienza e all'impatto ambientale.

I motori elettrici possono essere ulteriormente classificati in due varianti: *brushed* (con spazzole) e *brushless* (senza spazzole). La prima presenta una struttura più semplice, utilizzando spazzole per condurre la corrente elettrica all'interno del motore, e costi contenuti, ma richiede manutenzione periodica a causa dell'usura delle spazzole, che possono produrre scintille e generare rumore meccanico. La seconda, invece, utilizza un controllo elettronico per la rotazione dei magneti all'interno del motore, è più silenziosa, duratura ed efficiente, ma più costosa e richiedono un *controller* esterno dedicato.

Per poter volare, il drone ha bisogno di un sistema in grado di contrastare la forza di gravità generando spinta e portanza ed è per questo che è dotato di rotori. Ogni motore è collegato a un rotore e, in base al numero di questi ultimi, il drone appartiene ad una categoria diversa: nel caso di tricottero sono 3, quadricottero sono 4, esacottero sono 6 oppure se si tratta di un ottocottero sono 8. Le caratteristiche progettuali dei rotori riguardano il diametro, il numero di pale, il passo e la velocità di rotazione e influenzano in maniera determinante le prestazioni del drone.

Capitolo 4

Impronta e impatto acustico

Il rumore è una delle componenti più rilevanti dell'inquinamento ambientale associato al trasporto aereo, in quanto influisce direttamente sulla qualità della vita delle comunità circostanti. A differenza di altre forme di inquinamento, il rumore si percepisce in modo soggettivo e spesso discontinuo, ma può produrre effetti persistenti in termini di disturbo, stress e riduzione del benessere psicofisico. Per affrontare in modo efficace questa problematica, è necessario comprendere non solo come il rumore si genera, ma anche come si propaga, come viene misurato e quali strumenti sono disponibili per monitorarlo.

All'interno di questo contesto, è utile distinguere tra impronta acustica e impatto acustico. L'impronta acustica si riferisce alla distribuzione spaziale e temporale del rumore generato, cioè descrive dove e quando il rumore si manifesta e con quale intensità. L'impatto acustico, invece, riguarda le conseguenze di questa impronta sull'ambiente circostante e sulla popolazione esposta e misura il disturbo percepito e gli effetti potenzialmente negativi, attraverso specifici indicatori normativi e tecnici. Mentre l'impronta ha una natura oggettiva e descrittiva, l'impatto implica una componente soggettiva e valutativa, spesso legata a soglie di accettabilità e a interventi di mitigazione.

Questo capitolo si propone di introdurre i principi fondamentali dell'acustica, partendo dalla descrizione delle grandezze fisiche che caratterizzano l'onda sonora e dal concetto di decibel, fino ad arrivare alla distinzione tra suono e rumore. Un'attenzione particolare è dedicata all'anatomia dell'orecchio umano, soprattutto agli effetti che l'esposizione al rumore può generare sull'apparato uditivo. Infine il capitolo si concentra sull'analisi dei meccanismi di propagazione del suono e sui principali fattori che ne influenzano la propagazione nell'ambiente.

4.1 I concetti fondamentali di acustica

4.1.1 Suono come fenomeno fisico

Il suono è una perturbazione meccanica che si propaga in un mezzo elastico sotto forma di onde longitudinali, cioè le particelle del mezzo si muovono parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda. Queste onde si generano in seguito alla vibrazione di una sorgente sonora, la quale trasmette energia al mezzo circostante causando una successione di compressioni e rarefazioni delle particelle, oscillanti attorno alla loro posizione di equilibrio. Questo meccanismo produce variazioni di pressione che, se comprese all'interno del campo di udibilità umano, sono percepite come suoni.

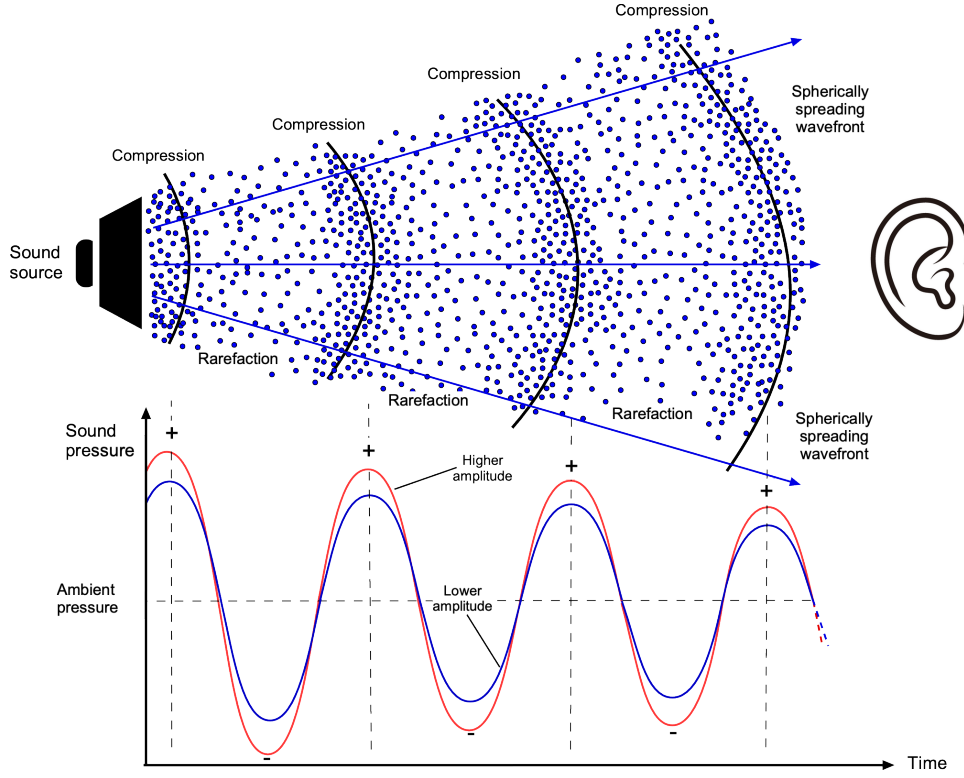


Figura 4.1: *Sound is an energy wave that travels by compressing and rarefying the air molecules*^[12]

Durante la propagazione di un'onda sonora, l'energia acustica viene temporaneamente immagazzinata nel mezzo attraversato, in particolare il passaggio dell'onda causa una perturbazione dello stato di equilibrio delle molecole, generando una temporanea redistribuzione della loro energia interna. Nei gas come l'aria, le molecole rispondono quasi istantaneamente a queste sollecitazioni perciò, in prima approssimazione, non si hanno perdite di energia durante la propagazione del suono. Questo comportamento rende possibile trattare il fenomeno come un processo adiabatico, cioè privo di scambi di calore e attriti, e pertanto reversibile. Tuttavia, nella realtà, una piccola parte dell'energia acustica viene comunque assorbita a causa della viscosità dell'aria e dei fenomeni di rilassamento molecolare.

In condizioni di entropia costante, caratteristica di un processo adiabatico, la velocità del suono in un mezzo è definita dalla radice quadrata del rapporto tra la variazione di pressione p e quella di densità ϱ :

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\varrho}} \quad (4.1)$$

Nei processi adiabatici, pressione e densità sono collegate dalla relazione:

$$p\varrho^{-\gamma} = \text{costante} \quad (4.2)$$

Differenziando quest'espressione, si ottiene che in un processo isoentropico il rapporto $\frac{dp}{d\varrho}$ è pari a:

$$\ln p - \gamma \ln \varrho = \ln(\text{cost}) \Rightarrow \frac{dp}{p} - \gamma \frac{d\varrho}{\varrho} = 0 \Rightarrow \left(\frac{dp}{d\varrho} \right)_{S=\text{cost}} = \gamma \frac{p}{\varrho} \quad (4.3)$$

Se si considera un gas ideale, la legge dei gas perfetti lega pressione, densità e temperatura nel modo seguente:

$$p = \rho RT \quad (4.4)$$

dove R rappresenta la costante specifica del gas. Sostituendo il risultato 4.3 nella formula della velocità del suono e sfruttando la legge dei gas perfetti, si arriva alla forma finale:

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (4.5)$$

Questa equazione mostra come la velocità del suono sia una variabile termodinamica che dipende dalla temperatura del gas e dal suo rapporto tra i calori specifici.

Le proprietà fondamentali che caratterizzano un'onda sonora sono il periodo, la frequenza, la lunghezza d'onda, l'ampiezza e la velocità di propagazione.

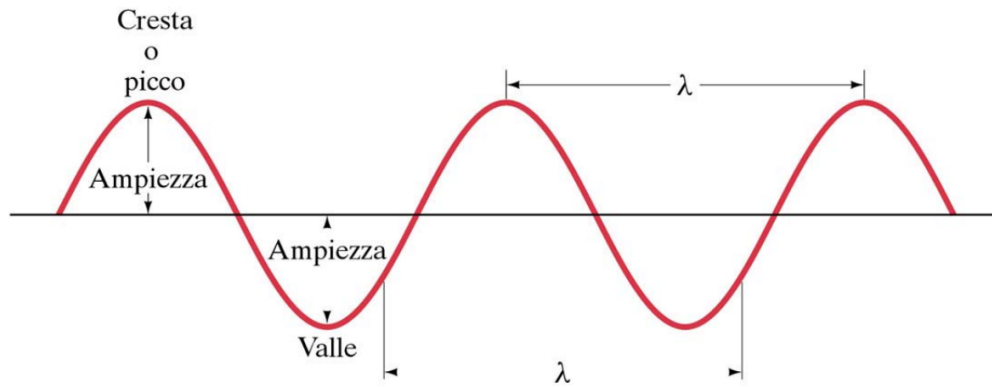


Figura 4.2: Rappresentazione di un'onda sinusoidale^[31]

Il periodo (T) rappresenta il tempo necessario affinché un'onda acustica completi un'oscillazione intera, cioè ritorni allo stesso stato da cui era partita, dopo aver attraversato una fase di compressione e una di rarefazione. Dal punto di vista fisico, il periodo descrive la durata temporale di un ciclo completo del moto ondoso e si misura in secondi (s).

La frequenza (f) rappresenta il numero di oscillazioni complete in un secondo, cioè il numero di fronti d'onda che raggiungono un osservatore nell'unità di tempo. Nel Sistema Internazionale, questa grandezza si misura in Hertz (Hz), in onore del fisico Heinrich Hertz che per primo studiò le onde elettromagnetiche, dove 1 Hz corrisponde a un'oscillazione al secondo. Questa caratteristica è strettamente legata al periodo in quanto è pari al suo inverso:

$$f = 1/T \quad (4.6)$$

più breve è il periodo, maggiore sarà la frequenza del suono, mentre più grande è il periodo, maggiore sarà la frequenza.

Inoltre, la frequenza è direttamente collegata alla percezione dell'altezza tonale: suoni a bassa frequenza vengono percepiti come gravi, mentre suoni ad alta frequenza sono percepiti come acuti. L'intervallo di frequenze udibili dall'orecchio umano va indicativamente da 20 Hz a 20.000 Hz: al di sotto di questo intervallo si parla di infrasuoni mentre al di sopra si parla di ultrasuoni, percepibili da alcune specie animali.

La lunghezza d'onda (λ) rappresenta la distanza percorsa dall'onda durante un singolo periodo e, in termini spaziali, equivale alla distanza tra due punti identici consecutivi dell'onda. Si può anche interpretare la lunghezza d'onda come lo spazio occupato, in un determinato istante, da

una sequenza completa di compressione e rarefazione del mezzo attraverso cui si propaga il suono. Questa grandezza è legata alla frequenza e alla velocità di propagazione del suono nel mezzo tramite la relazione:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.7)$$

un suono a bassa frequenza avrà una lunghezza d'onda maggiore rispetto a un suono ad alta frequenza.

L'ampiezza (A) corrisponde alla massima variazione di pressione rispetto al valore di equilibrio che il mezzo presenta quando viene attraversato dall'onda sonora. In termini grafici, essa corrisponde alla massima altezza raggiunta dalla cresta dell'onda (il punto più alto) oppure alla massima profondità della valle (il punto più basso) rispetto all'asse di equilibrio. Questa grandezza è direttamente proporzionale all'energia trasportata dall'onda e determina l'intensità del suono percepito: onde con ampiezza maggiore trasportano più energia e producono suoni più forti, mentre onde con ampiezza minore generano suoni più deboli. In pratica, è proprio l'ampiezza a modulare la percezione del volume del suono, anche se tale percezione è influenzata da altri fattori, come la sensibilità dell'orecchio umano a diverse frequenze.

La velocità di propagazione (v) è la velocità con cui un qualunque punto del profilo dell'onda si sposta nello spazio. È importante distinguere questa grandezza dalla velocità con cui le particelle del mezzo oscillano localmente attorno alla loro posizione di equilibrio: il moto delle particelle è oscillatorio e non comporta trasporto netto di materia, mentre la velocità dell'onda rappresenta la velocità con cui l'energia e la perturbazione sonora si propagano nel mezzo. Questa velocità di propagazione dipende strettamente dalle proprietà fisiche del mezzo attraversato. Nel caso dell'aria, a 20°C di temperatura e in condizioni di pressione atmosferica standard, essa è pari a circa 343 m/s. All'aumentare della temperatura, la velocità del suono tende ad aumentare, poiché le particelle del mezzo diventano più energiche e trasmettono più rapidamente le perturbazioni, ed è influenzata anche da pressione e umidità relativa.

Infine, proprietà fondamentali del suono sono il tono e il timbro. Il tono definisce l'acutezza o la gravità di un suono, che è detto acuto se ha un tono alto oppure grave se ha un tono basso, ed è legato alla rapidità delle vibrazioni della sorgente sonora, perciò, a parità di intensità e durata, un tono più elevato implica un maggior numero di compressioni e rarefazioni che attraversano un punto nello stesso intervallo di tempo.

Oltre al tono, il suono è caratterizzato anche dal timbro, ovvero la qualità che consente di distinguere tra loro suoni della stessa altezza e intensità prodotti da sorgenti diverse. Il timbro dipende dalla composizione spettrale dell'onda, ossia dalla presenza di armoniche, e in generale più ricca è la struttura armonica, più complesso sarà il timbro percepito. Un suono puro, al contrario, è costituito da una sola frequenza e rappresenta un tono semplice, privo di armoniche: è un'idealizzazione, ma può essere generato artificialmente, ad esempio in laboratorio o mediante sintesi elettronica.

4.1.2 Unità di misura e scala logaritmica

L'intensità dei suoni percepiti dall'orecchio umano può variare su un intervallo estremamente ampio, perciò, per quantificare questi valori in maniera più pratica, si utilizza una scala logaritmica che consente di rappresentarli in un range numerico gestibile. L'unità più comunemente adottata in acustica è il decibel (dB) che è un decimo di bel (B), il quale esprime il rapporto tra due grandezze omogenee ed è un'unità di misura adimensionale. L'origine del bel risale agli studi condotti nei primi decenni del XX secolo negli Stati Uniti nel contesto delle telecomunicazioni, dove veniva impiegato per quantificare la perdita di potenza lungo le linee telefoniche. L'unità prende il nome da Alexander Graham Bell, l'inventore del telefono, a cui è stato dedicato il bel, tuttavia, nella pratica si preferisce il decibel poiché risulta più adatto alla rappresentazione delle variazioni tipiche di molte grandezze fisiche.

Il decibel è ampiamente impiegato in numerosi ambiti scientifici e tecnici, tra cui l'acustica e l'elettronica. Esistono diverse scale di decibel, a seconda della grandezza misurata e del valore di riferimento adottato, e in acustica si usano comunemente le scale dB(SWL), dB(SPL) e dB(SIL).

Per quanto riguarda la scala della potenza sonora dB(SWL), dato un valore di potenza sonora W e un valore di riferimento della soglia di udibilità $W_0 = 10^{-12} W$, il livello di potenza acustica in decibel si calcola con la formula:

$$L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (4.8)$$

In termini di pressione, si passa alla scala della pressione sonora dB(SPL) e, quando si confrontano quantità proporzionali alla radice quadrata della potenza come $p \propto \sqrt{W}$, si ottiene che:

$$L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (4.9)$$

Il valore di riferimento per la pressione sonora è solitamente $p_0 = 20 \mu Pa = 2 \cdot 10^{-5} Pa$, che corrisponde alla soglia di udibilità dell'orecchio umano. Infine, per legare il livello di intensità acustica in dB e l'intensità si usa la scala dell'intensità sonora dB(SIL), che prevede un valore di riferimento della soglia di udibilità $I_0 = 10^{-12} W/m^2$:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (4.10)$$

Il livello di pressione sonora SPL (*Sound Pressure Level*) rappresenta una delle misure fondamentali per quantificare l'intensità di un suono ed è largamente utilizzato anche nel contesto del rumore aeronautico. Il SPL è la misura in decibel della deviazione dalla pressione dell'aria provocata dal passaggio di un'onda sonora ed è calcolato tramite la formula:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad (4.11)$$

dove p_{rms} è il valore efficace (*root mean square*) della pressione sonora misurata, mentre p_0 è il valore di riferimento corrispondente alla soglia dell'udito per l'orecchio umano medio, pari a $20 \mu Pa$ in aria. Poiché la pressione acustica oscilla nel tempo e nello spazio, non si considera un valore istantaneo, ma piuttosto una media efficace che è lo scarto quadratico medio del livello di pressione in un certo intervallo di tempo e che restituisce una misura stabile nel tempo. Il valore p_{rms} rappresenta la media quadratica delle variazioni di pressione acustica in un certo intervallo di tempo ed è calcolato come:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt} \quad (4.12)$$

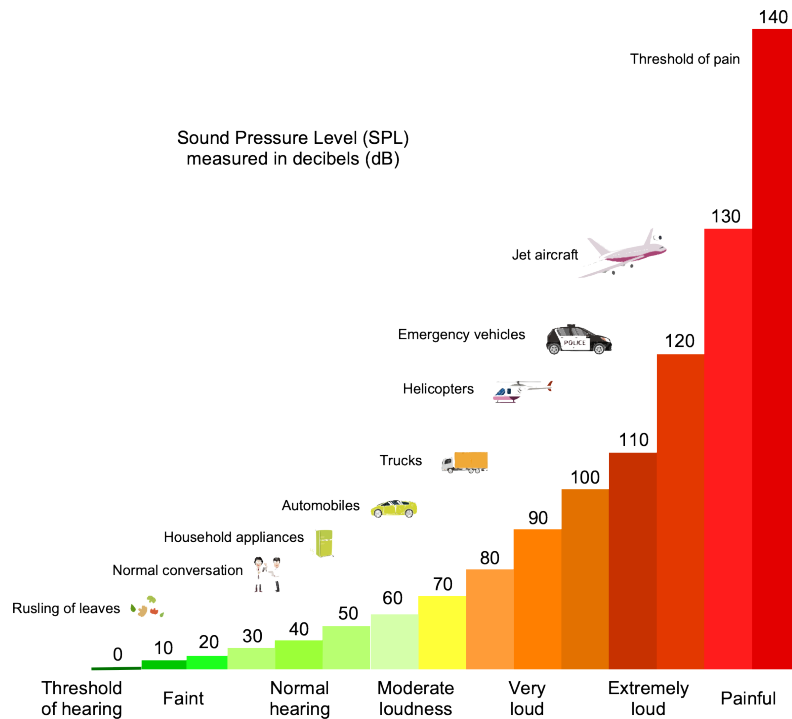


Figura 4.3: *The intensity of sound and noise is quantified using the decibel (dB) scale*^[12]

La scala logaritmica può risultare poco intuitiva, poiché non segue un andamento lineare: ad esempio, un incremento di 3 dB rappresenta in realtà un raddoppio del livello fisico misurato, mentre un aumento di 10 dB equivale a una decuplicazione. È quindi importante ricordare che la scala dei decibel non è lineare: un suono di 20 dB non è due volte più intenso di uno di 10 dB, bensì 10 volte più intenso. Nonostante ciò, la scelta di una scala logaritmica presenta due vantaggi fondamentali:

- consente di gestire con facilità grandezze che coprono un intervallo estremamente ampio di valori, dato che l'orecchio umano può percepire suoni compresi tra 0 e circa 200 dB. I fenomeni acustici possono variare su scale estremamente ampie, perciò per poterli rappresentare in modo pratico ed efficace, sia a livello numerico che grafico, si utilizza una scala logaritmica così da evitare l'uso di valori troppo elevati. Questa scelta è anche coerente con il funzionamento dell'udito umano, che percepisce le variazioni di intensità sonora in modo approssimativamente proporzionale al logaritmo dell'intensità del suono;
- semplifica molti calcoli in quanto moltiplicare due quantità corrisponde a sommare i rispettivi valori in decibel, mentre dividere equivale a sottrarli.

4.1.3 Campo di udibilità

Il campo di udibilità definisce l'intervallo di frequenze e di intensità entro cui il suono può essere percepito dall'orecchio umano. Questo campo è delimitato inferiormente dalla soglia di udibilità, ovvero il livello minimo di pressione sonora necessario affinché un suono venga avvertito, e superiormente dalla soglia del dolore, oltre la quale lo stimolo acustico è talmente intenso da generare una sensazione dolorosa. Le frequenze percepibili dall'uomo si collocano, in media, tra i 20 Hz e i 20.000 Hz, mentre i livelli di intensità si estendono da circa 0 dB corrispondente alla soglia uditiva fino a 120 dB, valore oltre il quale il suono diventa insopportabile.

Tuttavia, la risposta dell'orecchio umano non è uniforme rispetto a tutte le frequenze. La sensibilità uditiva non è lineare rispetto alla frequenza ma presenta un massimo tra 1.000 Hz e 4.000 Hz, una gamma che corrisponde alle frequenze del linguaggio parlato. Questa maggiore percezione è legata anche a fenomeni fisici come la risonanza del condotto uditivo, che ha una lunghezza tale da amplificare naturalmente le onde sonore intorno ai 3.000 Hz. Al contrario, le basse frequenze cioè gli infrasuoni al di sotto dei 20 Hz e le alte frequenze cioè gli ultrasuoni al di sopra dei 20.000 Hz non risultano percepibili. Va inoltre considerato che l'estensione del campo uditivo non è identica per tutti: essa dipende da fattori individuali come l'età, la salute dell'apparato uditivo e l'esposizione a rumori intensi nel tempo. In particolare, la capacità di percepire le alte frequenze tende a decadere progressivamente con l'età, secondo il fenomeno fisiologico di presbiacusia detto anche di audizione senile.

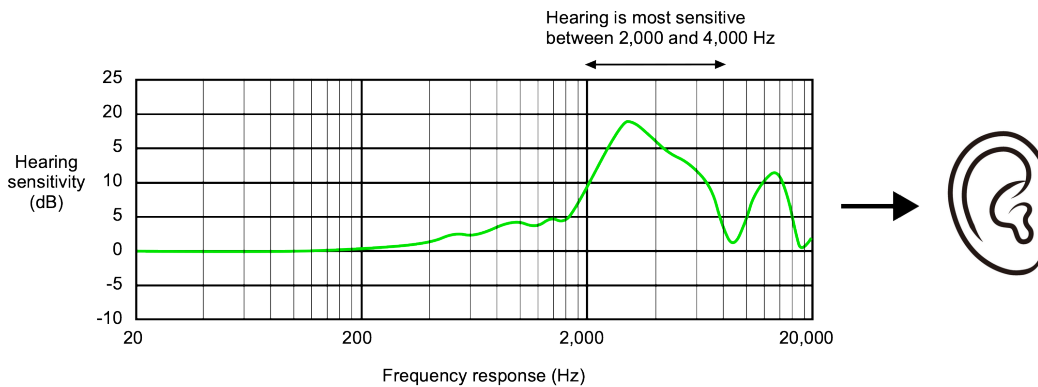


Figura 4.4: *The human ear's frequency response is nonlinear and most sensitive to sounds between 1,000 Hz and 4,000 Hz*^[12]

Per rappresentare graficamente la sensibilità dell'orecchio umano alle varie frequenze, si utilizzano le cosiddette curve isofoniche che uniscono i punti caratterizzati da una certa frequenza ed intensità in cui il suono viene percepito con la stessa intensità soggettiva, anche se il livello fisico in dB è diverso. Questi contorni di uguale sensazione sonora costituiscono il grafico di Wegel, che viene descritto come: "Il campo uditivo normale è costituito, graficamente, da due curve paraboliche che delimitano un'area ovoidale. Tutti i toni percepibili dall'orecchio umano sono compresi in questa zona. Queste due curve paraboliche costituiscono rispettivamente la soglia di minima e di massima udibilità; la prima, a concavità superiore, si ottiene allorché il soggetto comincia a percepire un tono di determinata frequenza; la seconda, a concavità inferiore, si abbassa alle due estremità, unendosi alla curva della soglia minima a 16 Hz per le basse frequenze, a circa 18000 Hz per le alte frequenze. La curva di udibilità massima rappresenta la soglia oltre la quale la vibrazione acustica non è più percepita come suono ma come sensazione dolorosa" (L.Barone, G.Fanelli, A.M.Franco, 1996, p.54-55)^[32].

Si ottiene un piano cartesiano che sulle ordinate presenta i valori del livello di pressione sonora SPL, che vanno da 0 dB a 130-140 dB, mentre sulle ascisse i valori di frequenza, limitati tra 20 Hz e 20 kHz. L'interpretazione del diagramma è più intuitiva se l'altezza delle ordinate viene letta come numero di decibel dB minimo necessario affinché il suono raggiunga la soglia di udibilità.

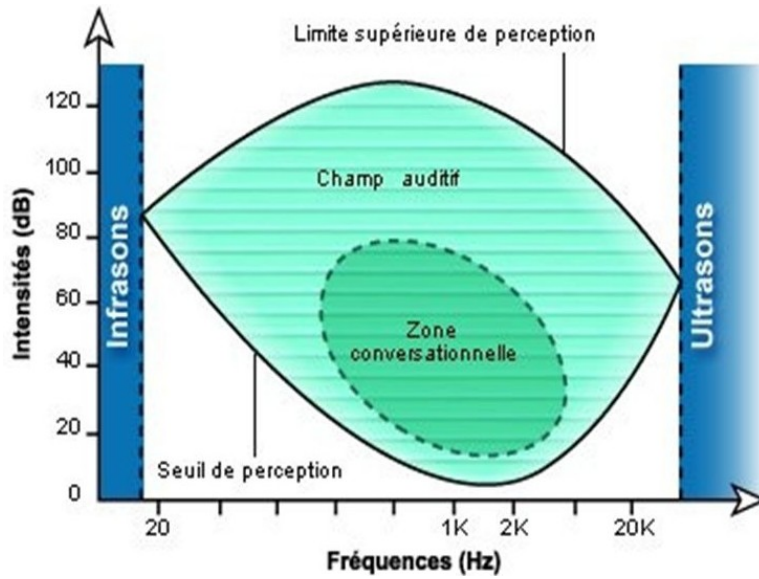


Figura 4.5: *Spectre audible de l'oreille humaine*^[33]

Dal grafico è evidente come la sensibilità dell'orecchio non sia lineare, cioè non è uniforme per tutte le frequenze udibili. È infine importante notare come l'area della parola si trovi nella parte centrale del campo di udibilità, che è quella più resistente alle malattie e all'usura, coerentemente con l'adattamento naturale nel salvaguardare la via di comunicazione orale.

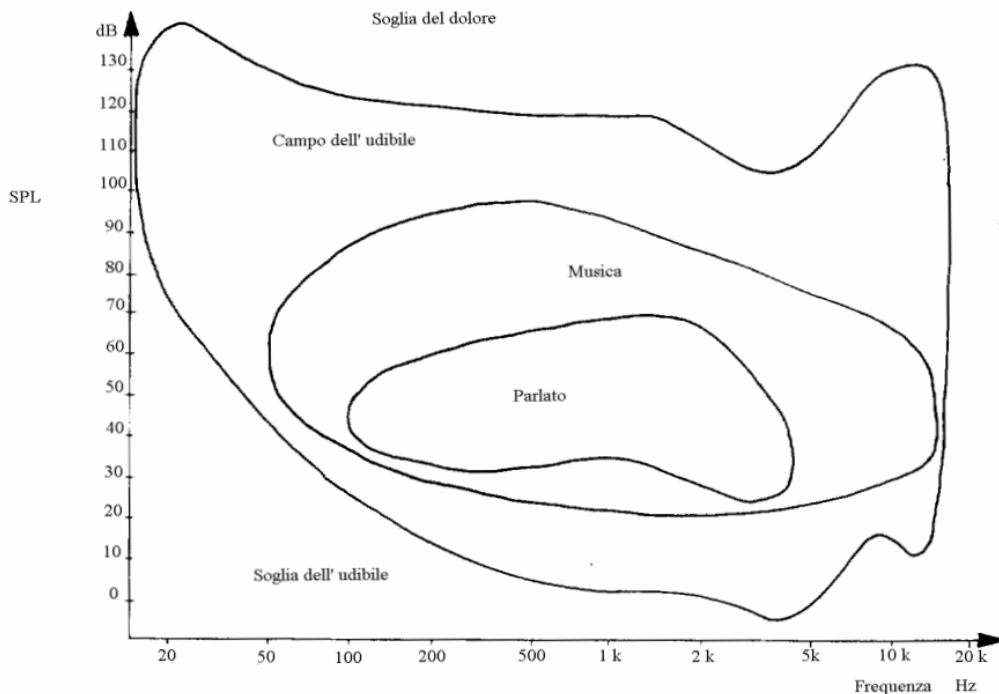


Figura 4.6: *Campo dell'udibile in funzione della frequenza*^[34]

La non uniformità dell'intensità sonora percepita da parte dell'orecchio umano per le diverse frequenze implica che due suoni con la stessa pressione sonora fisica possono essere percepiti con intensità molto diverse, a seconda della frequenza. Questo fenomeno è alla base delle curve isofoniche introdotte da Fletcher e Munson nel 1933 e successivamente perfezionate da Robinson e Dadson nel 1956, fino alla versione più aggiornata contenuta nella norma ISO 226:2023 *Normal equal-loudness-level contours*.

Le curve isofoniche sono curve di uguale sonorità che rappresentano, su un diagramma cartesiano, i livelli di pressione sonora necessari, in funzione della frequenza, affinché un suono sia percepito come ugualmente intenso rispetto a un tono puro a 1000 Hz. I due ricercatori condussero una serie di esperimenti psicoacustici su soggetti umani che prevedevano l'ascolto in cuffia di un tono puro a 1000 Hz, scelto come frequenza di riferimento, e successivamente di altri toni a frequenza variabile: ai partecipanti veniva richiesto di regolare l'intensità dei toni ascoltati affinché fossero percepiti ugualmente forti rispetto al tono di riferimento e, ripetendo questo procedimento per numerosi livelli di pressione e frequenze, vennero tracciate le cosiddette curve isofoniche.

La norma ISO 226:2023 definisce con precisione i livelli di sonorità da 0 phon (soglia dell'udibilità) fino a 120 phon (soglia del dolore), permettendo di visualizzare graficamente l'intervallo entro cui si collocano tutti i suoni udibili dall'essere umano. Trattandosi di uno standard internazionale, sono specificate le condizioni per cui risultano valide le curve isofoniche:

- a) il campo sonoro in assenza dell'ascoltatore è costituito da un'onda piana progressiva libera,
- b) la sorgente sonora si trova direttamente di fronte all'ascoltatore,
- c) i segnali sonori sono toni puri,
- d) il livello di pressione sonora è misurato nella posizione in cui si troverebbe il centro della testa dell'ascoltatore ma in assenza dell'ascoltatore,
- e) l'ascolto è binaurale, che si riferisce alla percezione dei suoni attraverso entrambe le orecchie, dove le differenze di intensità e fase dei suoni che raggiungono ciascun orecchio contribuiscono a creare un'unica esperienza sonora,
- f) gli ascoltatori sono persone otologicamente normali di età compresa tra i 18 e i 25 anni. Per persona otologicamente normale si intende: “una persona in uno stato di salute normale, priva di tutti i segni o sintomi di malattie dell'orecchio e di cerume ostruente nei canali uditivi e che non ha una storia di esposizione indebita al rumore, di esposizione a farmaci potenzialmente ototossici o di perdita dell'udito familiare”^[35].

Nel grafico corrispondente, X è la frequenza espressa in Hz, Y è il livello di pressione sonora espresso in dB e T_f è la *threshold of hearing* (soglia uditiva) cioè “il livello di un suono in corrispondenza del quale, in condizioni specifiche, una persona dà il 50% di risposte corrette di rilevamento su un certo numero di prove ripetute”^[35]. Più nello specifico, la curva tratteggiata T_f , anche individuata dalla sigla MAF (*Minimum Audible Field*), riporta la soglia di udibilità che a 1000 Hz vale 4,2 dB.

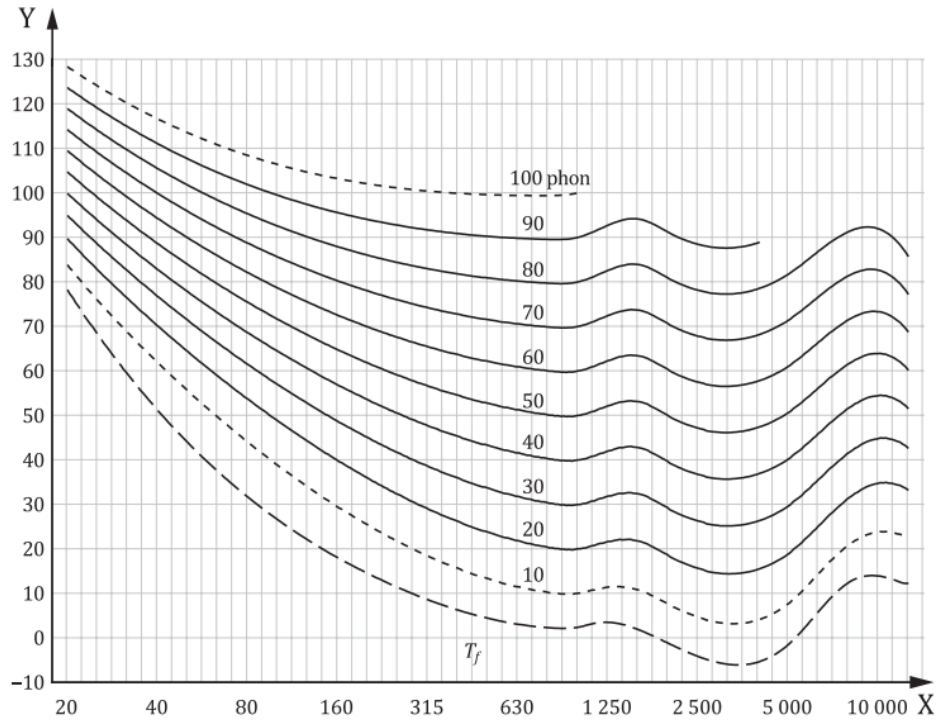


Figura 4.7: Normal equal-loudness-level contours for pure tones^[35]

Queste curve mostrano chiaramente come l'orecchio umano sia più sensibile alle frequenze comprese tra 2 kHz e 5 kHz, ovvero nella regione della voce umana, dove bastano livelli sonori molto bassi per innescare la percezione uditiva, mentre necessita di livelli di pressione più elevati per percepire con uguale intensità suoni a bassa o alta frequenza. In altre parole, a parità di dB SPL, un suono grave o molto acuto viene percepito come meno intenso rispetto a uno a frequenza intermedia. Ad esempio, un suono di 50 Hz deve essere emesso a circa 60 dB SPL per essere percepito con la stessa intensità di un suono a 10 dB SPL a 1000 Hz. È importante notare come le curve mostrino un minimo e cioè massima sensibilità attorno ai 4000 Hz, coincidente con la frequenza di risonanza del condotto uditivo umano. Un'ulteriore risonanza si verifica intorno ai 12000 Hz come il triplo della frequenza fondamentale, generando una decrescita nelle curve che attenua temporaneamente la perdita di sensibilità alle alte frequenze.

Sulla base di queste curve è stata definita una nuova unità psicoacustica che è il phon. L'unità di misura phon serve a esprimere il livello di sonorità percepita da un ascoltatore, in particolare un suono ha un livello di N phon se è percepito con la stessa intensità uditiva di un tono puro a 1000 Hz e N dB SPL. A questa frequenza di riferimento, infatti, i phon coincidono numericamente con i dB SPL. Tuttavia, alle altre frequenze, il livello in phon viene determinato seguendo le curve isofoniche e in questo modo i phon quantificano la percezione soggettiva della sonorità anziché la sola energia fisica del suono.

L'intensità sonora percepita (*loudness*) non deve essere confusa con l'intensità sonora oggettiva (*intensity*): la pressione acustica è una grandezza fisica, mentre il livello di sensazione sonora è soggettivo. Per questo motivo, dato che le curve isofoniche permettono di distinguere tra intensità fisica e intensità percepita, esse sono fondamentali nella psicoacustica e nel campo della valutazione dell'impatto acustico. Introdurre il concetto di sonorità soggettiva diventa cruciale nel giudicare il disturbo arrecato da una sorgente sonora, come nel caso del rumore aeroportuale.

Una conseguenza pratica dell'andamento delle curve isofoniche è la necessità di ponderare i livelli sonori in funzione della frequenza, per rendere le misurazioni strumentali coerenti con la percezione soggettiva. Per tenere conto della risposta non lineare del sistema uditivo, sono state introdotte le curve di ponderazione in frequenza, anche dette curve di compensazione. Queste curve sono ottenute invertendo matematicamente alcune curve isofoniche, con l'obiettivo di applicare un filtro che penalizzi maggiormente le frequenze per cui l'orecchio è meno sensibile, tipicamente basse e alte frequenze, rendendo la misura della pressione sonora più rappresentativa della percezione umana. Le principali curve di ponderazione definite sono:

- curva *A-weighted sound pressure*, nota come dBA o dB(A): è stata ricavata dal ribaltamento della curva isofonica corrispondente a 40 phon ed è la più utilizzata in assoluto perché simula la sensibilità dell'orecchio umano a bassi livelli sonori. Attenua fortemente le basse e alte frequenze, privilegiando il range centrale, dove l'udito è più sensibile. Le misure effettuate con questa ponderazione sono ampiamente utilizzate in ambito ambientale, lavorativo e normativo per valutare il rischio uditivo e il disturbo da rumore;
- curva *B-weighted sound pressure*, nota come dBB o dB(B): è stata ricavata dal ribaltamento della curva isofonica corrispondente a 70 phon ed è pensata per simulare la percezione del suono a livelli medi. Questa curva restituisce valori intermedi tra la curva A e la C, tuttavia è oggi pressoché in disuso per la scarsa corrispondenza con le esigenze pratiche di misura;
- curva *C-weighted sound pressure*, nota come dBC o dB(C): è stata ricavata dal ribaltamento della curva isofonica corrispondente a 100 phon e fornisce una risposta molto più lineare rispetto alle curve A e B. Ha la caratteristica di avere una risposta piatta nella parte centrale delle frequenze dello spettro udibile ed è frequentemente utilizzata per misurare i livelli di picco (*Peak Sound Pressure Level*) in campo industriale o militare;
- curva *D-weighted sound pressure*, nota come dBD o dB(D): sviluppata in tempi più recenti, è stata progettata specificamente per valutare il rumore generato dagli aeromobili, in quanto tiene conto delle componenti in alta frequenza tipiche dei motori a reazione.

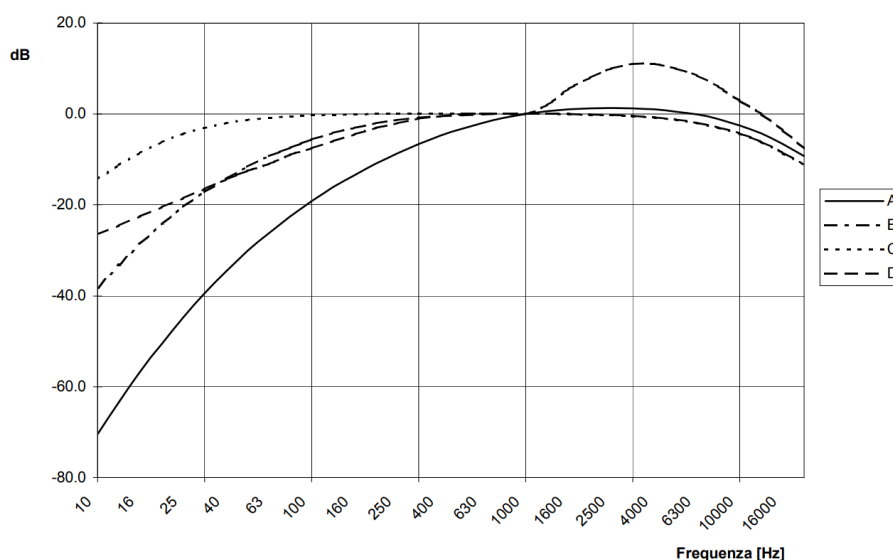


Figura 4.8: Curve di ponderazione^[34]

In seguito agli aggiornamenti dello standard ISO, la curva D di ponderazione dovrebbe essere utilizzata esclusivamente per motori a getto di tipo non bypass, oggi presenti solo su velivoli militari e non più sugli aerei commerciali. Per tale motivo, nelle misurazioni relative all'aviazione civile leggera si impiega attualmente la curva A, più aderente alla risposta dell'orecchio umano. Per la certificazione acustica degli aeromobili da trasporto commerciale, invece, è richiesto l'uso di una ponderazione più accurata, corretta per l'intensità sonora percepita, nota come EPNdB (*Effective Perceived Noise in Decibels*): questa misura si basa sulla curva D, ma ne costituisce una versione più sofisticata e adeguata alle esigenze di valutazione del rumore aeronautico.

È importante notare che i filtri di ponderazione sono normalizzati in modo che la loro risposta sia pari a 0 dB a 1000 Hz, ovvero una frequenza alla quale l'udito umano ha sensibilità massima. Questo punto di riferimento comune consente di confrontare coerentemente misure effettuate con ponderazioni diverse, dato che va sottolineato che l'uso delle curve di ponderazione rappresenta un tentativo di conciliare il dato oggettivo delle misure strumentali con la percezione soggettiva dell'essere umano.

Dal punto di vista tecnico, quando si desidera determinare la reale sensazione uditiva di un suono, si procede applicando la curva di compensazione al segnale acustico. Questo significa sottrarre a livello di pressione, non in dB, i valori della curva ponderata all'intensità di pressione del segnale e successivamente riconvertire il tutto in decibel. Il risultato è un livello sonoro corretto, che riflette in modo più accurato ciò che una persona media effettivamente percepisce.

4.1.4 Differenza tra suono e rumore

Per comprendere la differenza tra suono e rumore percepito bisogna tenere presente che la percezione uditiva umana è il risultato di un processo complesso, che inizia con la ricezione delle vibrazioni acustiche e termina con l'elaborazione delle informazioni sonore da parte del cervello. Comprendere come l'orecchio recepisce i suoni è fondamentale per distinguere tra i fenomeni acustici oggettivi, come le onde sonore misurabili fisicamente, e i fenomeni soggettivi, come il rumore percepito, distinzione basata, oltre che su parametri fisici, anche aspetti fisiologici, percettivi e psicologici.

Distinzione fisica e percettiva tra suono e rumore

Dal punto di vista fisico, sia il suono che il rumore sono onde di pressione che si propagano in un mezzo sotto forma di onde longitudinali. La distinzione principale risiede nella regolarità del segnale:

- il suono è generalmente associato a una vibrazione periodica o regolare, che produce una sensazione uditiva ben definita;
- il rumore è caratterizzato da una vibrazione irregolare, caotica o aleatoria, che non presenta una struttura armonica riconoscibile.

Dal punto di vista percettivo, la differenza risulta più complessa perché fortemente condizionata dalla percezione soggettiva dell'ascoltatore. Un suono viene classificato come rumore quando risulta sgradito, indesiderato o disturbante ma tale definizione è soggettiva, in quanto ciò che viene classificato come rumore dipende spesso dal contesto e dalla sensibilità individuale. Questo approccio soggettivo trova riscontro anche nelle normative, dove la distinzione tra suono e rumore assume una valenza molto specifica:

- la Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo definisce il rumore ambientale come: "l'insieme dei suoni indesiderati o nocivi in ambiente esterno prodotti dalle attività umane, compreso il rumore emesso da mezzi di trasporto, dovuto al traffico veicolare, al traffico ferroviario, al traffico aereo e proveniente da siti di attività industriali". Questo implica che

il rumore non è semplicemente un fenomeno acustico, ma un elemento che produce disturbo o effetti nocivi sull'ambiente e sulle persone esposte;

- il D.Lgs. 194/2005, che recepisce la direttiva sopracitata, ribadisce la stessa definizione di rumore ambientale con identico significato tecnico-giuridico;
- la Legge 26 ottobre 1995 n. 447 identifica l'inquinamento acustico come: "l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo ed alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi".

A queste definizioni si affianca il D.P.C.M. 14 novembre 1997, che stabilisce i valori limite di emissione e immissione del rumore prodotti dalle sorgenti sonore, suddividendo il territorio in classi acustiche (da I a VI, dalle più silenziose alle più rumorose). Questo decreto considera il rumore in relazione alla sua capacità di disturbare o arrecare danno alla popolazione esposta e costituisce una norma fondamentale per il controllo dell'inquinamento acustico in Italia. Nel contesto normativo europeo e italiano, viene quindi posto l'accento sul criterio del disturbo o del danno: ciò che determina la qualificazione di un suono come rumore ambientale non dipende soltanto da caratteristiche fisiche (intensità, frequenza, durata), ma anche dal fatto che esso venga percepito come indesiderato, con potenziale impatto sulla qualità della vita e sulla salute.

Per questo motivo, nelle valutazioni acustiche ambientali si ricorre sempre più spesso a indici psicoacustici e a misure ponderate, per cui la valutazione del rumore non si limita alla sola intensità sonora in decibel, ma richiede anche una considerazione degli effetti soggettivi che lo stesso suono può provocare, come l'irritabilità, la difficoltà di concentrazione o l'interferenza con le attività quotidiane. Questo concetto rispecchia la distinzione in ambito psicoacustico: il rumore è un fenomeno sonoro, ma è definito anche dalla percezione soggettiva e dal contesto d'ascolto. La disciplina della psicoacustica studia la relazione tra le caratteristiche fisiche del suono e la percezione soggettiva, cioè il legame tra gli stimoli acustici oggettivi e la risposta soggettiva dell'ascoltatore. Integrando conoscenze provenienti da psicologia, acustica, fisiologia, ingegneria e neuroscienze, mette in evidenza come la percezione del rumore dipenda da diversi parametri, quali:

- frequenza, timbro e intensità, che determinano rispettivamente la tonalità, la qualità e il volume percepito del suono;
- variabilità e prevedibilità, ovvero quanto il suono sia regolare e prevedibile;
- durata, che incide sulla tollerabilità in quanto i suoni intermittenti possono risultare più fastidiosi di quelli continui;
- contesto d'ascolto, come il luogo e il momento della giornata, che influenzano la soglia di disturbo percepito.

Un altro elemento centrale della psicoacustica è la ripetitività degli eventi sonori e la frequenza di esposizione: un singolo suono può essere ignorato o facilmente tollerato, ma la ripetizione sistematica può generare un accumulo di stress, irritazione, difficoltà di concentrazione e disturbi del sonno. Questo spiega perché le normative non si limitano a considerare il livello istantaneo del rumore, ma prendono in esame indicatori ponderati nel tempo che riflettono la percezione umana su base giornaliera, settimanale o annuale. L'obiettivo è quello di comprendere come il cervello interpreti i segnali uditivi ricevuti dall'orecchio, un fenomeno complesso in cui la componente soggettiva e contestuale gioca un ruolo determinante.

Suono puro, suono complesso e classificazione spettrale del rumore

In acustica, il suono puro rappresenta un'idealizzazione in quanto si tratta di un'onda sinusoidale perfettamente regolare, generata da una vibrazione singola e costante, senza distorsioni. In questo caso le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico o sinusoidale e il suono puro è la risultante acustica di una vibrazione armonica semplice, un'onda pura di decompressione e compressione. Tuttavia, nella realtà, la maggior parte dei suoni sono complessi, ovvero sono dati dalla somma di più onde sinusoidali ciascuna di data frequenza e intensità. Sono quindi il risultato della sovrapposizione di più frequenze e, in particolare, si parla di suono armonico o periodico se queste frequenze sono multipli interi di una frequenza fondamentale, mentre si parla di rumore se si ha un segnale disarmonico o caotico.

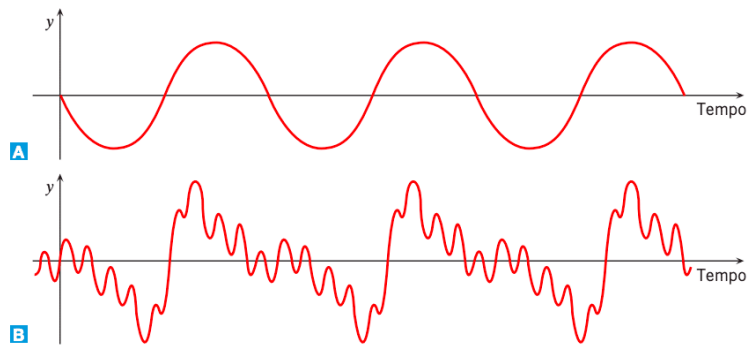


Figura 4.9: Rappresentazione temporale di un suono puro (A) e di un suono complesso (B)^[36]

Lo spettro sonoro rappresenta graficamente l'ampiezza delle componenti del segnale in funzione della frequenza e si può distinguere la frequenza fondamentale come la frequenza più bassa in un complesso periodico. Nel caso di un segnale complesso, lo spettro sonoro è rappresentato da un grafico che presenta sull'asse delle ascisse la frequenza di ciascuna componente e sull'asse delle ordinate il corrispondente livello di intensità (o di pressione acustica).

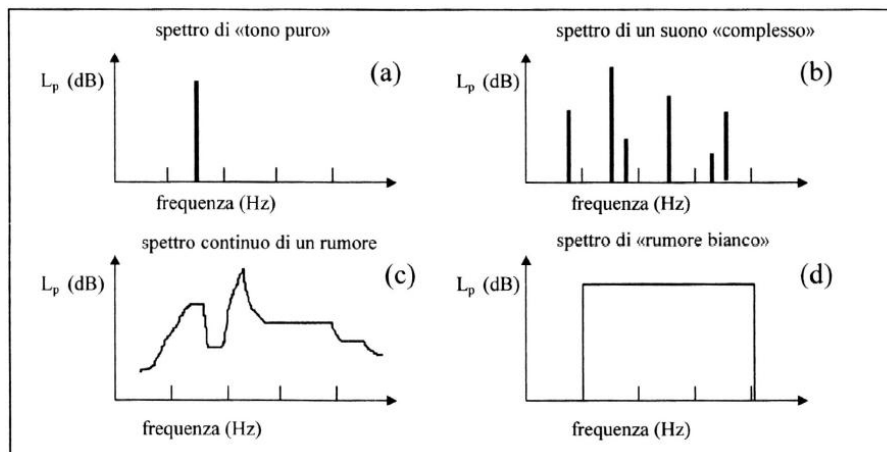


Figura 4.10: Spettri sonori^[37]

Dal punto di vista scientifico, il rumore può essere studiato analizzando il suo contenuto spettrale, ovvero la distribuzione dell'energia sonora nelle diverse frequenze. Questo approccio consente di classificare diversi tipi di rumore “colorato”, ciascuno con caratteristiche specifiche:

- rumore bianco, è caratterizzato dall'assenza di periodicità e dall'ampiezza costante su tutto lo spettro delle frequenze, pertanto il suo grafico è una linea orizzontale perché sono presenti tutte le frequenze alla stessa intensità. La presenza simultanea di tutte le frequenze udibili, distribuite in modo uniforme, risulta spesso fastidiosa all'ascolto in quanto è un suono ricco di alte frequenze. La definizione di “bianco” deriva per analogia dalla luce bianca, che contiene tutte le frequenze visibili dello spettro elettromagnetico;
- rumore rosa, nel quale le frequenze più basse predominano, l'intensità decresce di circa 3 dB per ottava e si presenta come un suono più morbido e naturale, spesso usato a scopo rilassante o per mascheramento acustico;
- rumore marrone (o browniano), enfatizza ulteriormente le basse frequenze rispetto al rumore rosa, con una riduzione di circa 6 dB per ottava, e ha un suono profondo e avvolgente;
- rumore rosso, è simile al marrone, ma senza una regola matematica precisa, e viene percepito come un rimbombo grave e penetrante, utilizzato spesso nella musica elettronica e nel sound design cinematografico;
- rumore blu, accentua le alte frequenze, l'intensità cresce di circa 3 dB per ottava e si presenta come con un suono sibilante e acuto;
- rumore violetto, è un'estremizzazione del rumore blu, con una crescita di intensità di circa 6 dB per ottava, ed è il più acuto e penetrante, spesso percepito come un suono molto fastidioso.

Si tenga presente che l'ottava è definita come: “l'intervallo tra due suoni tale che il suono più acuto abbia frequenza doppia del suono più grave”^[38].

4.2 Dall'anatomia dell'orecchio agli effetti del rumore

La comprensione degli effetti del rumore sulla salute umana parte dal funzionamento dell'apparato uditivo umano, ovvero dal modo in cui l'organismo riceve e interpreta le onde sonore. L'esposizione al rumore ambientale non solo costituisce un fastidio per gli individui, ma rappresenta un fattore di rischio per la salute, con conseguenze studiate ed approfondite sia a livello uditivo che extra-uditivo.

4.2.1 Apparato uditivo umano

L'orecchio umano, dal punto di vista anatomico, è costituito da tre parti principali:

1. orecchio esterno, composto dal padiglione auricolare e dal condotto uditivo, che ha il compito di raccogliere e convogliare le onde sonore verso le strutture interne;
2. orecchio medio, costituito dal timpano e dalla catena ossiculare, che trasmette e amplifica le vibrazioni del timpano attraverso i tre ossicini (martello, incudine e staffa) fino alla finestra ovale, trasformando le onde di pressione in vibrazioni meccaniche;
3. orecchio interno, contenente la coclea, che converte le vibrazioni in segnali elettrici, i quali viaggiano attraverso il nervo uditivo fino alla corteccia uditiva del cervello. Ciò è possibile grazie alla coclea, un organo a forma di spirale riempito di liquido al cui interno le cellule ciliate dell'organo del Corti rispondono selettivamente a diverse frequenze sonore.

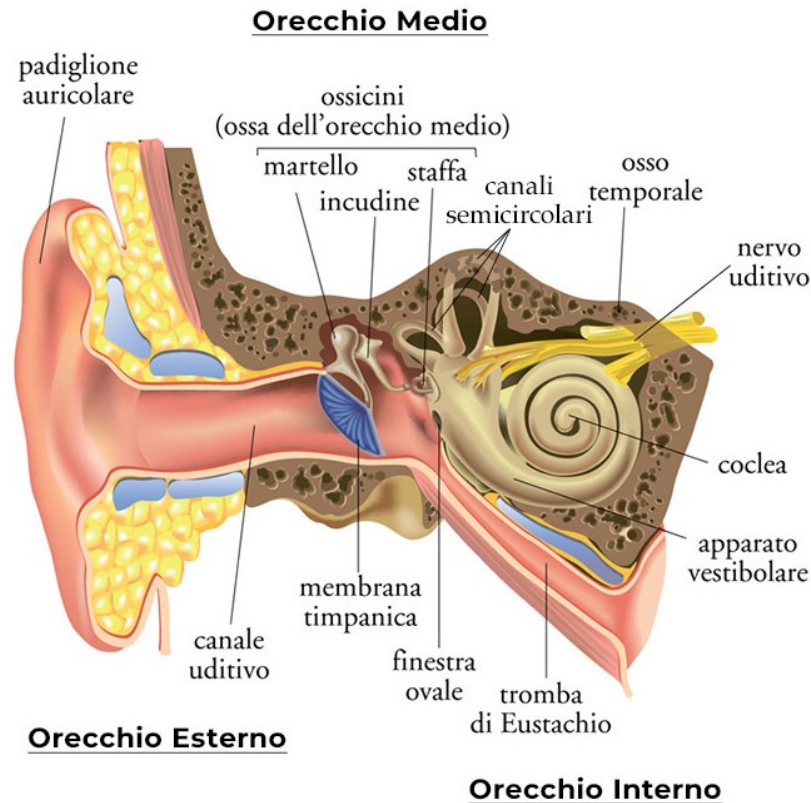


Figura 4.11: Anatomia dell'apparato uditivo^[39]

La trasduzione meccano-elettrica del suono avviene attraverso le cellule ciliate che, stimulate dalle onde di pressione nel fluido interno alla coclea, chiamato perilinfia, deformano i filamenti sottili sulla loro superficie, noti come stereociglia, e generano un potenziale elettrico. Questo segnale nervoso viaggia lungo il nervo vestibolococleare (l'ottavo dei dodici nervi cranici), un nervo specifico che connette l'orecchio al cervello, e raggiunge la corteccia uditiva primaria del lobo temporale, dove i vari segnali vengono elaborati e resi coscienti.

Non tutte le frequenze e intensità sonore vengono percepite allo stesso modo, in particolare l'orecchio umano è fortemente sensibile alle frequenze comprese tra 2.000 e 5.000 Hz, intervallo in cui si concentra la voce parlata. La capacità uditiva si estende, in media, da 20 Hz a 20 kHz e le diverse frequenze vengono codificate spazialmente lungo la membrana basilare della coclea a causa della sua forma. Infatti, la membrana basilare è più rigida verso la finestra ovale e più cedevole verso l'elicotrema, di conseguenza le alte frequenze eccitano la membrana nelle zone vicino alla base, mentre le basse frequenze la eccitano nella regione apicale. La risposta selettiva delle cellule ciliate permette quindi all'essere umano di distinguere suoni più gravi da quelli più acuti, pertanto il cervello è in grado di discriminare le varie frequenze.

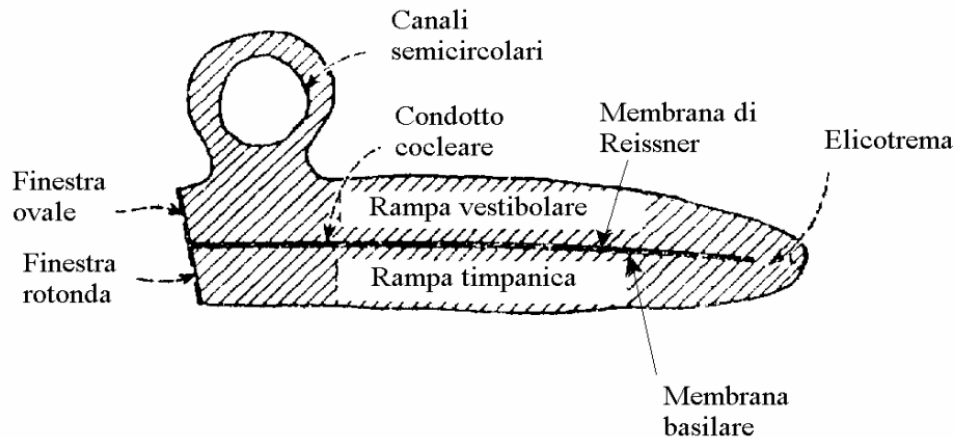


Figura 4.12: Sezione longitudinale della coclea srotolata^[34]

È importante sottolineare che la sensibilità o l'accuratezza della percezione del suono è funzione anche dello stato di salute dell'essere umano e della sua età. Fenomeni come la presbiacusia deteriorano la capacità di percepire le diverse frequenze, pertanto è importante approfondire su quale percentuale della popolazione, composta da bambini, adulti, anziani, l'esposizione risulta maggiore a causa di una capacità ricettiva acustica superiore.

4.2.2 Effetti del rumore sulla salute umana

L'esposizione prolungata o intensa al rumore può avere una serie di conseguenze negative per la salute, anche in assenza di danni uditivi immediati, incidendo sul benessere fisico ma anche mentale dell'individuo. I suoi effetti si manifestano sia a livello uditivo che extra-uditivo e sui diversi piani fisiologico, psicologico e cognitivo. La relazione dell'*European Environment Agency* (EEA), dal titolo *Environmental noise in Europe - 2020*, ha evidenziato come il rumore ambientale costituisca il secondo fattore di stress ambientale più impattante in Europa, dopo l'inquinamento atmosferico da particolato fine, in accordo con i dati dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS). Questo perché il rumore non rappresenta solo un fastidio, ma può costituire un reale fattore di rischio sanitario e di compromissione della sicurezza, influenzando milioni di persone.

I fattori che condizionano la gravità dell'impatto sonoro sono il livello di pressione sonora, il tempo di esposizione e la frequenza del rumore, e l'impatto può manifestarsi sotto 3 forme^[34]:

- come danno, che è l'alterazione, anche parziale, non reversibile dell'apparato uditivo e può essere specifico, se l'esposizione avviene per periodi prolungati a livelli di 75-80 dB(A) (tipico dell'ambiente lavorativo), o non specifico, se l'esposizione non è sufficientemente elevata ma può col tempo apportare danni al sistema uditivo (tipico dell'ambito urbano);
- come disturbo, che è l'alterazione reversibile delle condizioni psicofisiche dei soggetti esposti al rumore;
- come fastidio (*annoyance*), che è causato dal rumore ma anche dalla combinazione di fattori di natura psicologica e sociologica.

A questo proposito, si rivela molto utile la scala di lesività del rumore, proposta da Cosa e Nicoli, un modello che classifica il rumore in base al livello di pressione sonora in dB(A) e al tipo di effetto sulla persona. Questa classificazione è efficace perché non è solo una scala numerica di intensità

sonora, ma mette in relazione i decibel con effetti concreti, dalle fasi di semplice fastidio fino al danno acuto immediato.

pressione acustica (dBA)	caratteristica del danno uditivo
0 - 35	Rumore che non arreca né fastidio né danno
36 - 65	Rumore fastidioso e molesto, che può disturbare il sonno ed il riposo
66 - 85	Rumore che disturba ed affatica, capace di provocare danno psichico e neurovegetativo e in alcuni casi danno uditivo
86 - 115	Rumore che produce danno psichico e neurovegetativo, che determina effetti specifici a livello auricolare e che può indurre malattia psicosomatica
116 - 130	Rumore pericoloso: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e neurovegetativi
> 131	Rumore molto pericoloso: impossibile da sopportare senza adeguata protezione; insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno

Figura 4.13: Scala di lesività proposta da Cosa e Nicoli in relazione ai vari livelli acustici^[40]

Effetti uditivi

Il danno uditivo è l'effetto più diretto e documentato del rumore che si verifica soprattutto a carico delle cellule ciliate esterne dell'organo del Corti, le quali, una volta danneggiate, non possono rigenerarsi. L'esposizione a suoni di elevata intensità, superiore agli 85 dB, causa l'innalzamento della soglia uditiva, che può essere inizialmente temporaneo *Temporary Threshold Shift* (TTS) e potenzialmente reversibile, ma che può evolvere in forma permanente *Permanent Threshold Shift* (PTS) con compromissione irreversibile dell'udito, tipicamente che inizia attorno ai 4.000 Hz.

Il danno da rumore può evolvere in diversi stadi: prevede una fase iniziale di fatica con la presenza di acufeni e sensazione di ovattamento, una fase di latenza caratterizzata da una progressiva degenerazione neurosensoriale, una fase di consapevolezza della scomparsa della capacità uditiva e, infine, una fase di deficit che manifesta chiaramente la compromissione dell'ascolto e della comunicazione verbale. L'effetto dannoso è dovuto principalmente alla durata e all'intensità dell'esposizione, ma anche alle caratteristiche qualitative del suono e ai fattori individuali di suscettibilità. In particolare, il danno dipende dal prodotto tra intensità e tempo, pertanto resta invariato se ad ogni incremento di 3 dB, cioè raddoppio dell'energia, il tempo massimo di esposizione viene dimezzato.

La conseguenza principale degli effetti uditivi è la perdita uditiva, nota come ipoacusia, che consiste in un abbassamento delle capacità uditive. L'ipoacusia può essere classificata in tre categorie:

- trasmissiva, dovuta ad alterazioni meccaniche dell'orecchio esterno o medio, consiste in un impedimento "meccanico" che ostruisce la trasmissione del suono dalla zona esterna a quella interna delle orecchie ed è un deficit uniforme su tutte le frequenze;
- neurosensoriale, causata da danni a livello della coclea o del nervo acustico, interessa l'apparato che trasforma il segnale meccanico in segnale elettrico e lo conduce al cervello. La perdita è inizialmente più marcata per le alte frequenze;

- mista, una combinazione delle due precedenti, coinvolge sia le strutture di trasmissione che quelle di trasduzione e conduzione nervosa.

Effetti extra-uditivi

Biologicamente, il rumore, è considerabile come uno stressor associato a ripetuti cambi temporali nelle risposte biologiche, che può agire anche su altri sistemi e organi. Dal punto di vista neuro-endocrinologico è considerato una fonte di stress, dove quel che accade è che l'esposizione comporta "l'attivazione di aree encefaliche extrauditiva, deputate al controllo di funzioni endocrine ed autonome (ipotalamo, sostanza grigia), alla regolazione delle emozioni e dei livelli di attenzione (amigdala, locus coeruleus) ed alla elaborazione degli aspetti emozionali del dolore (talamo)"^[41].

In particolare, attraverso circuiti neurofisiologici, si innesca una risposta da stress che attiva il sistema nervoso autonomo e l'asse ipotalamo-ipofisi-surrene, provocando effetti misurabili sull'apparato cardiovascolare, come l'aumento della pressione arteriosa e tachicardia; sul sistema endocrino, con l'aumento della secrezione di cortisolo; sul sistema digerente, con l'incremento della secrezione salivare e gastrica; sul sistema nervoso con alterazioni nei tempi di reazione, riduzione della concentrazione e stanchezza psico-sensoriale. Nel corso degli anni, numerosi studi hanno dimostrato una correlazione tra esposizione a rumore e problemi di organi ed apparati diversi da quello uditivo, pertanto si può concludere che una costante esposizione al rumore può influire in modo determinante sulla qualità della vita.

Disturbi del sonno, psichici e del comportamento

L'esposizione al rumore è in grado di compromettere significativamente la qualità del sonno e lo stato di benessere psicologico, agendo attraverso complesse interazioni tra innumerevoli sistemi. Per quanto concerne il sonno, l'esposizione al rumore durante la notte compromette la qualità del sonno a seconda sia della frequenza degli eventi sonori (oltre 50 per notte), sia della loro intensità: suoni superiori a 30 dB disturbano maggiormente le fasi leggere del sonno, mentre livelli compresi tra 60 e 80 dB disturbano le fasi profonde. Gli stimoli acustici esterni possono interferire con le fasi fisiologiche del riposo provocando risvegli frequenti e alterando il ciclo circadiano e le ripercussioni più comuni includono stanchezza cronica, difficoltà di concentrazione e riduzione della vigilanza.

A livello neuropsicologico, l'esposizione cronica al rumore è correlata a disturbi psichici minori, come ansia, depressione lieve, disturbi dell'umore e cefalea tensiva, e nei contesti lavorativi più rumorosi si registrano anche sintomi come nausea, nervosismo e instabilità emotiva. Il fastidio cronico da rumore, detto *annoyance*, è definito come: "un sentimento di rancore, fastidio, disagio, malcontento od offesa che si manifesta quando uno stimolo rumoroso interferisce con qualsiasi pensiero, sensibilità o attività svolta"^[42]. Questo stato è influenzato sia dall'intensità e frequenza del rumore, sia dalla capacità soggettiva di adattamento (*coping*) alla situazione.

Particolare attenzione deve essere rivolta ai bambini, che risultano più vulnerabili agli effetti del rumore ambientale. L'esposizione in ambienti scolastici rumorosi è stata associata a un rallentamento dello sviluppo cognitivo, a difficoltà di apprendimento e a una riduzione del rendimento scolastico. Lo studio epidemiologico europeo RANCH (*Road Traffic and Aircraft Noise Exposure and Children's Cognition and Health*) ha evidenziato come l'esposizione cronica al rumore da traffico stradale e/o aereo è associata a ritardi nell'apprendimento a una diminuzione significativa nella capacità di lettura e peggiori performance nella memoria a lungo termine.

4.3 La propagazione del suono nell'ambiente

La propagazione del suono nell'ambiente non avviene in modo uniforme, ma è fortemente influenzata da molteplici fattori fisici e ambientali. Questo perché la propagazione del suono all'aperto è un

fenomeno tridimensionale, che dipende dall'interazione tra onde sonore e ambiente circostante: all'esterno il suono è soggetto a riflessioni, assorbimenti, rifrazioni e diffrazioni che ne alterano traiettoria, ampiezza e contenuto spettrale. Queste trasformazioni dipendono non solo dalle caratteristiche intrinseche della sorgente, quali livello sonoro, frequenze emesse, durata, direzionalità, ma anche da elementi esterni come le condizioni meteorologiche, la natura del terreno e la presenza di ostacoli. Questo significa che due eventi acusticamente identici alla sorgente possono essere percepiti in modo diverso e avere impatti differenti in funzione del contesto in cui si propagano.

4.3.1 Meccanismi fisici di propagazione del suono

I meccanismi fisici che condizionano la propagazione del suono in ambiente esterno intervengono fin dal momento della sua emissione e agiscono lungo il percorso tra la sorgente e il ricevitore, modificando la distribuzione spaziale ed energetica dell'onda sonora. I fenomeni principali sono la riflessione, l'assorbimento, la rifrazione e la diffrazione: ciascuno di essi ha effetti specifici e dipende da variabili diverse ed è solo attraverso la comprensione di tutti questi fenomeni che è possibile interpretare correttamente l'andamento del rumore ed effettuare simulazioni predittive attendibili.

Il caso teorico di propagazione in campo libero del suono è rappresentato dall'attenuazione geometrica, detta *spherical spreading*, ovvero quando un'onda sonora propaga in modo isotropo, con uguale intensità in tutte le direzioni a partire dalla sorgente, l'energia acustica si distribuisce su superfici sferiche sempre più ampie man mano che aumenta la distanza. Questo comporta una diminuzione dell'intensità sonora e in condizioni ideali, in assenza di variazioni, il livello di pressione sonora si riduce di circa 6 dB ogni volta che la distanza raddoppia. Tuttavia, nella realtà, diversi meccanismi fisici possono alterare in modo significativo la traiettoria e l'energia del suono durante il suo percorso.

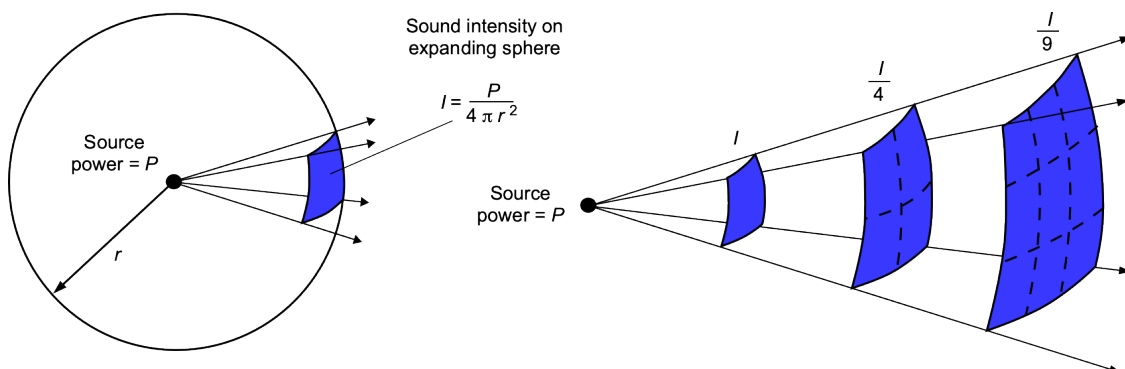


Figura 4.14: A sound disturbance produces a pressure wavefront that spreads spherically in time as it propagates away from the original disturbance^[12]

Riflessione

La riflessione è il fenomeno per cui un'onda sonora, incontrando una superficie solida, viene deviata nello stesso mezzo e perde parte dell'energia incidente, indipendentemente dalla natura della superficie. Affinché ciò si verifichi, non basta la sola presenza di un ostacolo ma è necessario che la dimensione relativa di quest'ultimo sia molto maggiore rispetto alla lunghezza dell'onda sonora che incide su di esso. Questo fenomeno è analogo alla riflessione della luce e segue leggi simili, in particolare la riflessione del suono è governata da due leggi fondamentali:

1. l'angolo di incidenza è sempre uguale all'angolo di riflessione;

2. il suono incidente, il suono riflesso e la normale alla superficie giacciono sullo stesso piano.

A seconda della forma della superficie solida, che può essere piana, concava o convessa, si ha un cambiamento nella direzione del fronte d'onda del suono riflesso. La riflessione del suono può manifestarsi in due forme principali, quali eco e riverbero, e per distinguerle si considera l'intervallo di tempo tra l'interruzione dell'emissione da parte della sorgente e il momento in cui il suono riflesso viene percepito.

Se questo intervallo è maggiore di 0,1 secondi, l'orecchio umano riesce a distinguere due suoni separati, cioè il suono riflesso viene avvertito come un evento distinto rispetto al suono diretto, e si parla di eco. In termini spaziali, questo comporta che affinché si generi un'eco percepibile, la distanza minima tra la sorgente sonora e la superficie riflettente deve essere di 17 metri: tale valore deriva dal fatto che, in aria a 20°C , il suono si propaga a circa 340 m/s ed essendo necessario un intervallo minimo di 0,1 secondi, in questo tempo l'onda sonora percorre circa 34 metri, corrispondenti a 17 metri nel tragitto di andata dalla sorgente all'ostacolo e 17 metri nel percorso di ritorno verso l'ascoltatore.

Se invece l'intervallo è inferiore a 0,1 secondi, l'orecchio non riesce a distinguere due segnali diversi e le onde sonore si sovrappongono: il risultato è un riverbero, ovvero un prolungamento del suono originario dovuto a riflessioni multiple e ravvicinate.

Assorbimento

L'assorbimento acustico, anche detto fonoassorbimento, è la capacità di un materiale di dissipare l'energia sonora convertendola in calore. Dal punto di vista acustico, quindi, è il processo mediante il quale parte dell'energia di un'onda sonora che colpisce un corpo, anziché essere riflessa dalla superficie, viene assorbita dal materiale e convertita in calore. La quantità di energia assorbita dipende dalle caratteristiche fisiche e strutturali del materiale, quali densità, porosità, rigidità e spessore, ma anche dalla frequenza del suono. In particolare, è possibile definire il coefficiente di assorbimento α del materiale come il rapporto tra l'energia acustica assorbita e l'energia acustica totale incidente sulla superficie di un materiale, che rappresenta una misura quantitativa della sua capacità di assorbimento e assume valori compresi tra 0 e 1, dove:

- $\alpha = 0$ indica una superficie perfettamente riflettente, che non assorbe alcuna energia sonora;
- $\alpha = 1$ rappresenta una superficie completamente assorbente, che assorbe tutta l'energia sonora incidente senza rifletterne.

L'assorbimento può avvenire per porosità, per risonanza di membrana o per risonanza di cavità (il cosiddetto risuonatore di Helmholtz) ed è influenzato anche dalla frequenza dell'onda: molti materiali assorbono selettivamente solo certe bande di frequenza e, in generale, le alte frequenze vengono assorbite più facilmente delle basse perché, avendo lunghezze d'onda più corte, interagiscono maggiormente con la superficie del materiale, dissipando più velocemente la loro energia.

Rifrazione

La rifrazione è la deviazione subita da un'onda sonora quando questa passa da un mezzo ad un altro, cioè si verifica quando il suono attraversa due mezzi diversi nei quali la sua velocità di propagazione cambia. La direzione di propagazione dell'onda sonora si modifica a causa del cambiamento delle proprietà fisiche del mezzo, in particolare la rifrazione può essere dovuta:

- alla densità del mezzo, dato che dal punto di vista fisico il suono viaggia più velocemente in mezzi più densi;
- alla rigidità del mezzo, in quanto le particelle dei mezzi più rigidi presentano dei legami più stretti e quindi la vibrazione si trasmette più velocemente;

- alla variazione di temperatura, visto che nelle zone più calde il suono viaggia più velocemente.

Diffrazione

La diffrazione consiste nel mutamento di direzione di un'onda sonora dovuto alla presenza di un ostacolo o di un'apertura lungo il suo percorso, permettendo al suono di aggirare l'ostacolo e di propagarsi anche nelle zone non direttamente esposte alla sorgente. La capacità di aggirare gli ostacoli da parte del suono dipende dalle dimensioni dell'ostacolo: se queste sono minori della lunghezza d'onda del suono incidente allora la diffrazione sarà significativa e l'onda sonora si ricostruisce dietro l'ostacolo, ma perdendo parte della sua energia, mentre se sono maggiori gran parte dell'onda viene riflessa e si genera una zona d'ombra acustica, cioè un'area dove il suono è attenuato.

Questo fenomeno ondulatorio dipende fortemente dalla frequenza e dalla lunghezza d'onda del suono:

- le onde a bassa frequenza, caratterizzate da lunghezze d'onda maggiori, superano con maggiore facilità gli ostacoli;
- le onde ad alta frequenza, caratterizzate da lunghezze d'onda minori, tendono invece a essere più direzionali e quindi sono più facilmente bloccate o riflesse dagli ostacoli.

Diversamente, nel caso di una fenditura, l'onda è in grado di passarci attraverso senza modificare la forma dei suoi fronti d'onda se la dimensione della fenditura è maggiore della lunghezza d'onda del suono. Al contrario, se la fenditura è stretta e di dimensioni minori della lunghezza d'onda, il fronte d'onda dell'onda incidente si deforma e diventa pressoché sferico, generando onde sonore più piccole.

4.3.2 Fattori meteorologici

Le condizioni atmosferiche influenzano in modo sostanziale la propagazione del suono all'esterno perché l'atmosfera costituisce un mezzo variabile nel tempo e nello spazio. Nell'ambiente all'aperto intervengono variabili dinamiche, come la temperatura, l'umidità dell'aria, la velocità e la direzione del vento, che non solo modificano la velocità di propagazione del suono, ma possono anche deviare, amplificare o attenuare l'energia sonora lungo il percorso che va dalla sorgente al ricevitore.

Temperatura e gradiente termico

Il suono si propaga nell'aria attraverso variazioni di pressione e la velocità con cui queste onde si muovono dipende dalla temperatura del mezzo, secondo la relazione:

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (4.13)$$

A parità di pressione, l'aria più calda è meno densa e permette una propagazione più veloce del suono, tuttavia, ciò che incide maggiormente sulla traiettoria delle onde sonore, è il gradiente termico verticale, ossia il modo in cui la temperatura varia con l'altitudine, che può influenzare la propagazione dei suoni sulle lunghe distanze.

In condizioni normali, la temperatura decresce con la quota, pertanto, il suono tende a rifrangersi verso l'alto, allontanandosi dal suolo e provocando un'attenuazione più rapida del livello sonoro percepito. Al contrario, in presenza di inversione termica, la temperatura cresce con la quota quindi le onde sonore si rifrangono verso il basso: questo effetto "a lente" fa sì che il suono si concentri vicino al suolo, aumentando la percezione del rumore anche a distanze elevate dalla sorgente.

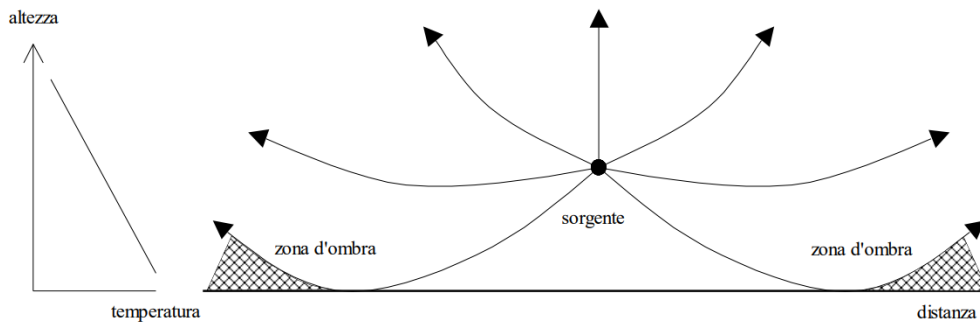


Figura 4.15: Gradiente di temperatura^[43]

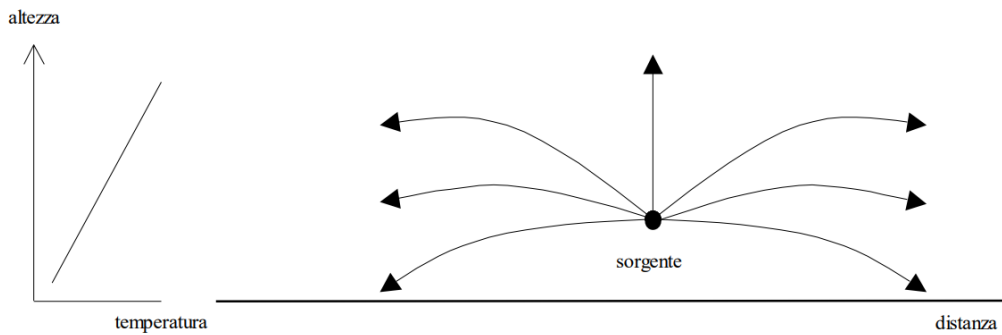


Figura 4.16: Inversione termica^[43]

Umidità

L'umidità dell'aria influisce in modo significativo sulla propagazione del suono, alterandone sia la velocità di trasmissione sia la chiarezza percepita: in generale, un livello più elevato di umidità tende a favorire la propagazione del suono e a migliorarne la percezione. All'aumentare dell'umidità relativa, la densità dell'aria diminuisce in quanto il vapore acqueo ha una massa molecolare inferiore rispetto ai principali componenti dell'aria, quali azoto e ossigeno, di conseguenza l'aria umida è meno densa rispetto all'aria secca. Questa riduzione della densità favorisce una propagazione sonora più efficiente, permettendo alle onde sonore di propagarsi con maggiore facilità, e l'aumento della velocità del suono nell'aria umida consente alle onde di mantenere la loro energia anche a distanze maggiori dalla sorgente.

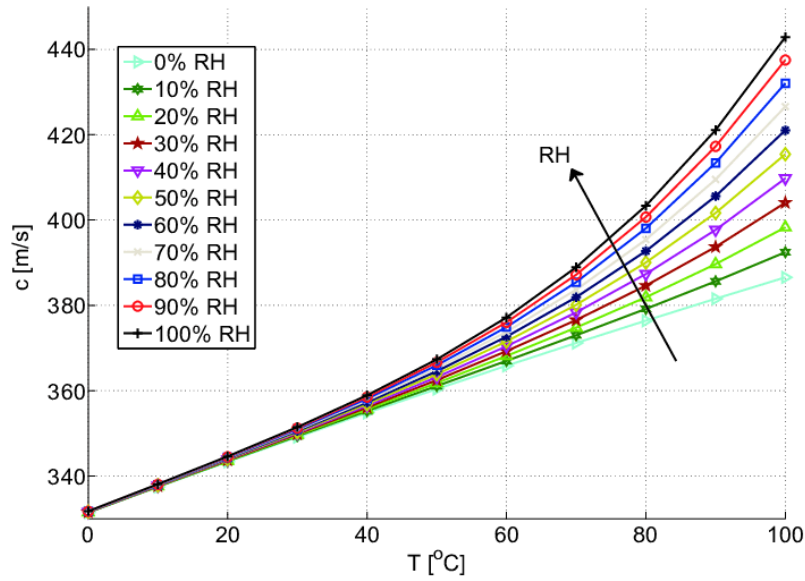


Figura 4.17: *Speed of sound vs. temperature and relative humidity*^[44]

Livelli adeguati di umidità possono anche migliorare la chiarezza e il timbro del suono, tuttavia, un'eccessiva umidità può aumentare l'assorbimento acustico, riducendo la trasmissione del suono e peggiorando la percezione.

È importante notare che l'umidità relativa ha un ruolo cruciale anche nell'assorbimento acustico, con effetti differenti a seconda della frequenza, che comporta una differente qualità del suono percepito a parità di sorgente. L'umidità influisce sul coefficiente di assorbimento dell'aria e, al crescere della frequenza, l'aumento dell'umidità incrementa l'attenuazione acustica e la dissipazione dell'energia sonora, perciò è alle basse frequenze che un'umidità maggiore permette alle onde sonore di propagarsi più efficacemente su distanze più grandi.

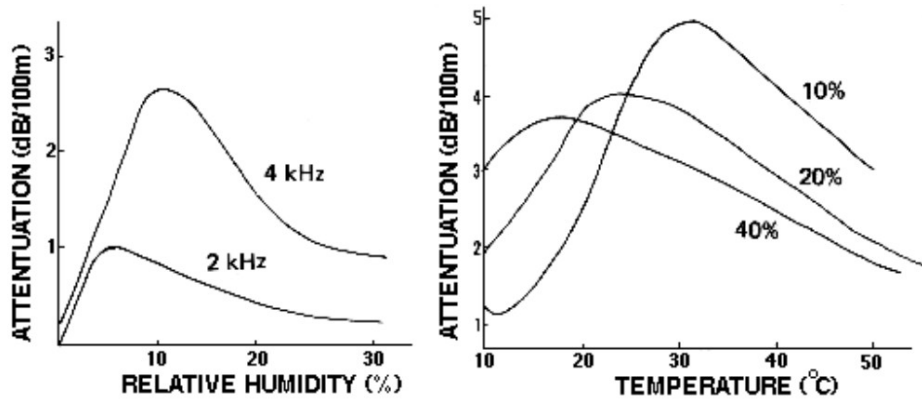


Figura 4.18: *Frequency dependence of attenuation as a function of relative humidity at 20°C (left), attenuation as a function of temperature for various percentages of relative humidity (right)*^[45]

Vento

Il vento è un altro parametro che altera la propagazione del suono, in particolare se è presente un gradiente verticale di velocità che aumenta con la quota. Il suono si propaga più efficacemente nella direzione del vento, detta condizione di *downwind*, cioè se il vento soffia nella direzione che va dalla sorgente del rumore al luogo di misurazione, mentre viene deviato verso l'alto e quindi attenuato se propaga nella direzione opposta, detta condizione di *upwind*. In particolare, quando il suono propaga controvento, si verifica una deviazione verso l'alto dei raggi sonori generando una zona d'ombra acustica al suolo, ovvero un'area in cui le onde sonore non riescono a raggiungerlo direttamente, per cui il rumore risulta assente.

Il gradiente di velocità genera asimmetrie nella distribuzione spaziale del rumore, per cui la percezione a terra di quest'ultimo può variare sensibilmente in funzione della direzione del vento rispetto alla traiettoria del velivolo. Per questo motivo, la legislazione pone dei limiti e impartisce raccomandazioni sull'accettabilità della velocità e della direzione del vento per le misurazioni acustiche. A seconda della velocità del vento e della distanza, nella condizione di sottovento il livello acustico rilevato può aumentare di pochi dB, mentre nella condizione sopravvento il livello può diminuire di diversi dB: la conseguenza è che la misura sottovento è preferibile, in quanto la deviazione è minima ed il risultato è più affidabile.

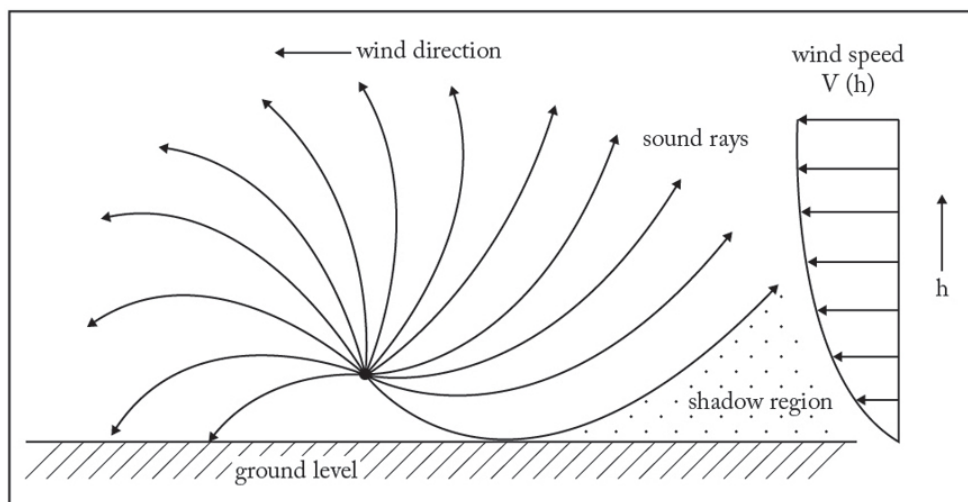


Figura 4.19: Effetto del vento^[46]

4.3.3 Effetti del terreno

La natura del suolo su cui propaga un'onda sonora gioca un ruolo determinante nell'evoluzione del suono stesso. Quando un'onda sonora incontra il suolo, parte della sua energia viene riflessa e parte viene assorbita ma la quantità dipende dal tipo di superficie: le superfici dure e lisce sono altamente riflettive e causano un'attenuazione minima dell'energia sonora, al contrario terreni porosi o vegetati assorbono una parte significativa dell'energia del suono, favorendo una naturale attenuazione. In particolare, i terreni duri comportano un aumento del livello del suono di 3 dB mentre i terreni misti possano determinare un'attenuazione di circa 3 dB, che può arrivare fino a 9 dB su superfici completamente porose. L'effetto è più marcato alle alte frequenze, mentre le basse tendono a propagarsi più facilmente.

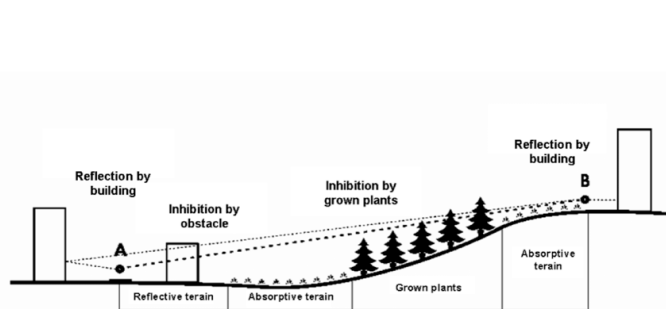


Figura 4.20: *Effect of environment on sound propagation*^[47]

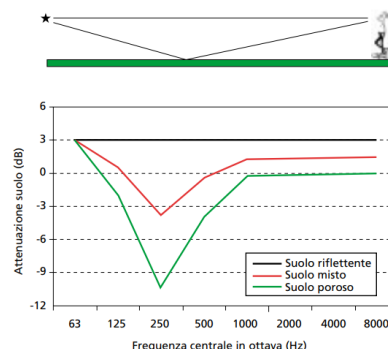


Figura 4.21: *Influenza della superficie del suolo*^[48]

Per una valutazione accurata, è fondamentale considerare le proprietà acustiche del terreno, descritte dall'impedenza acustica Z , ovvero il rapporto tra l'ampiezza della pressione sonora r e l'ampiezza della velocità delle particelle v di un'onda acustica che incide sulla superficie o sul mezzo ($Z = r / v$). La norma ISO Standard 9613-2 distingue tre tipi principali di superficie (duro, poroso e misto) e assegna a ciascuna zona tra la sorgente e il ricevitore un fattore di terreno G , che consente di quantificare la relativa attenuazione acustica.

Un altro meccanismo importante è il cosiddetto ground effect: quando sorgente e ricevitore sono vicini al suolo, l'onda sonora riflessa può interferire distruttivamente con l'onda diretta, portando a una riduzione del livello percepito. Questo avviene tipicamente a frequenze tra 200 e 600 Hz e su distanze di diversi metri.

4.3.4 Ostacoli e schermature

La presenza di ostacoli naturali o artificiali può modificare in modo significativo la propagazione del suono, creando zone d'ombra acustica in cui il livello di rumore risulta ridotto rispetto alle aree direttamente esposte alla sorgente. Le barriere acustiche vere e proprie, costituite da pareti non porose con densità superficiale superiore ad almeno 20 kg/m^2 , sono in grado di produrre un'attenuazione molto elevata, impedendo al suono di raggiungere direttamente il ricevitore. Il suono non passa direttamente attraverso tali barriere, ma raggiunge l'ascoltatore tramite percorsi indiretti: diffrazione sui bordi superiore e laterali, trasmissione attraverso il materiale e riflessione da superfici circostanti investite dal campo sonoro della sorgente.

L'efficienza di una barriera si misura tramite l'isolamento acustico DL , definito come la differenza di pressione sonora tra la condizione senza e con barriera. In condizioni ottimali, una barriera può raggiungere attenuazioni fino a circa 40 dB, limite imposto dalla diffusione atmosferica. L'effetto è massimo quando la barriera interrompe la linea di vista tra sorgente e ricevitore ed è più efficace se posta molto vicino a uno dei due. In presenza di barriere troppo basse o mal posizionate, queste possono peggiorare la situazione eliminando l'interferenza distruttiva naturale tra onde dirette e riflesses dal suolo. Dal punto di vista spettrale, le barriere sono particolarmente efficaci alle alte frequenze, mentre le basse frequenze tendono ad aggirare l'ostacolo per via della loro maggiore lunghezza d'onda, riducendo l'attenuazione. In ambito urbano, gli edifici possono agire come barriere efficaci, ma talvolta si verifica il cosiddetto effetto canyon: le riflessioni multiple tra facciate parallele aumentano la riverberazione e riducono l'attenuazione complessiva. In campo aeronautico la barriera ha un'efficacia nulla o quasi in quanto la sorgente acustica si trova in quota rispetto alla barriera presente al suolo.

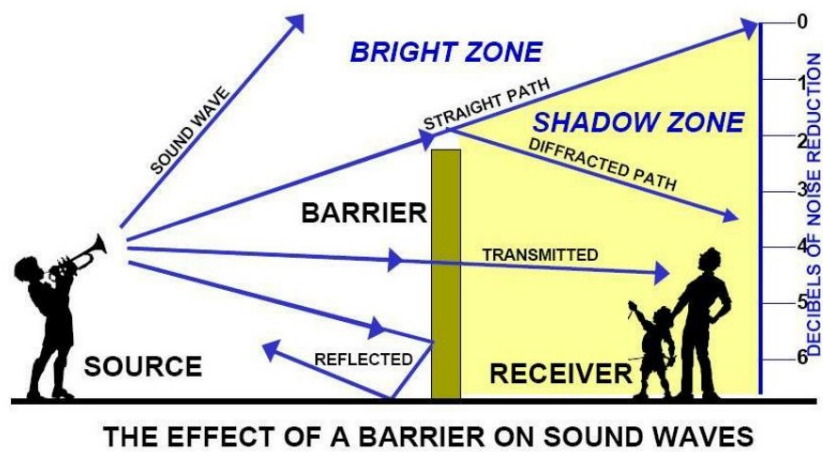


Figura 4.22: *The effect of a barrier on sound waves*^[49]

Capitolo 5

Caso di studio: l'Aeroporto di Torino-Caselle

Il seguente capitolo è dedicato al caso di studio per l'analisi acustica condotta nel presente lavoro di tesi, rappresentato dall'Aeroporto di Torino-Caselle. Tale aeroporto, situato a nord-ovest della città di Torino e gestito dalla società SAGAT S.p.A., rappresenta un contesto significativo sia per il volume di traffico misto sia per la vicinanza a zone residenziali potenzialmente esposte al rumore.

L'obiettivo è evidenziare le principali caratteristiche infrastrutturali e operative, analizzare il traffico aereo e i movimenti e approfondire le modalità di monitoraggio e gestione del rumore aeroportuale, con particolare riferimento agli strumenti normativi e alle procedure di contenimento adottate. Partendo da una panoramica storica dello scalo e della società di gestione, vengono descritti i dati ufficiali tratti dalla pubblicazione AIP Italy, per passare poi all'analisi dell'evoluzione del traffico e delle rotte commerciali e concludere con il tema del rumore.

5.1 La storia dell'aeroporto e della società di gestione aeroportuale

Le origini dell'aviazione torinese risalgono al primo Novecento quando il 13 gennaio 1909, all'Ippodromo di Mirafiori, ha luogo il primo volo di un aeroplano costruito in Italia. Nello stesso anno viene costituita la *Società Aviazione Torino*, uno dei primi Aeroclub italiani, che contribuì alla nascita del primo Aeroporto di Torino a Mirafiori, inaugurato ufficialmente nel 1911. Tra il primo e il secondo conflitto mondiale, l'Aeroporto di Torino diventa sede dell'*Aeroclub Torino* e della scuola di volo dei piloti dell'aviazione militare, la cui presenza diventa preponderante nel 1923 con la costituzione della Regia Aeronautica Italiana come forza armata autonoma.

“Con l'inizio degli anni Trenta Mirafiori non basta più. Il campo ... si è fatto troppo stretto per accogliere le attività militari, industriali e sportive. Diventa congestionato.”^[50] e si sceglie di creare un aeroporto destinato esclusivamente all'Aeronautica militare. L'espansione urbana di Torino esclude la possibilità di rimanere nel quartiere di Mirafiori e le ricerche di un'area più grande portano verso il nord della città, in particolare la zona fra Caselle e San Maurizio, già sede delle prove di bombardamento della IX e della X squadriglia del Battaglione aviatori. I lavori iniziano nel 1935 e procedono velocemente, tanto è vero che le nuove strutture aeroportuali vengono inaugurate ufficialmente il 27 marzo 1938, ma l'aeroporto ha vita breve: nel settembre 1943 viene occupato dalle truppe tedesche e diviene una base operativa dell'Aviazione nazionale repubblicana.

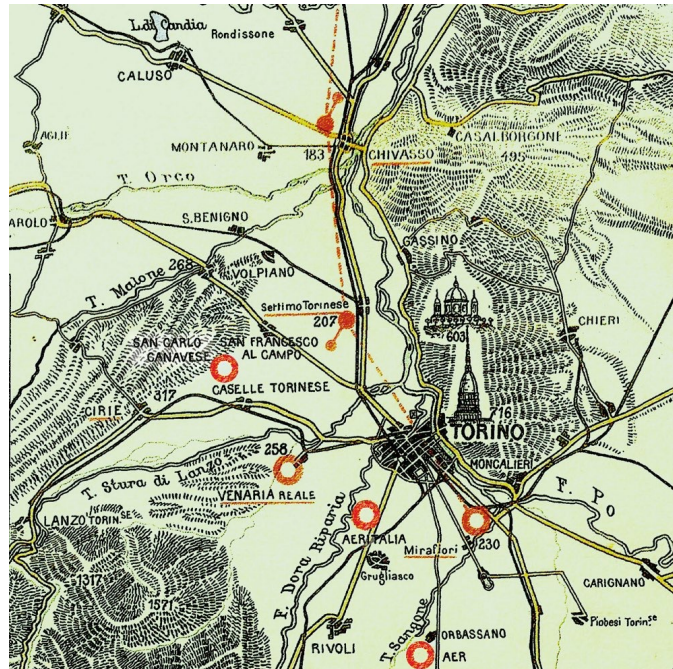


Figura 5.1: La mappa dei primi aeroporti torinesi^[51]

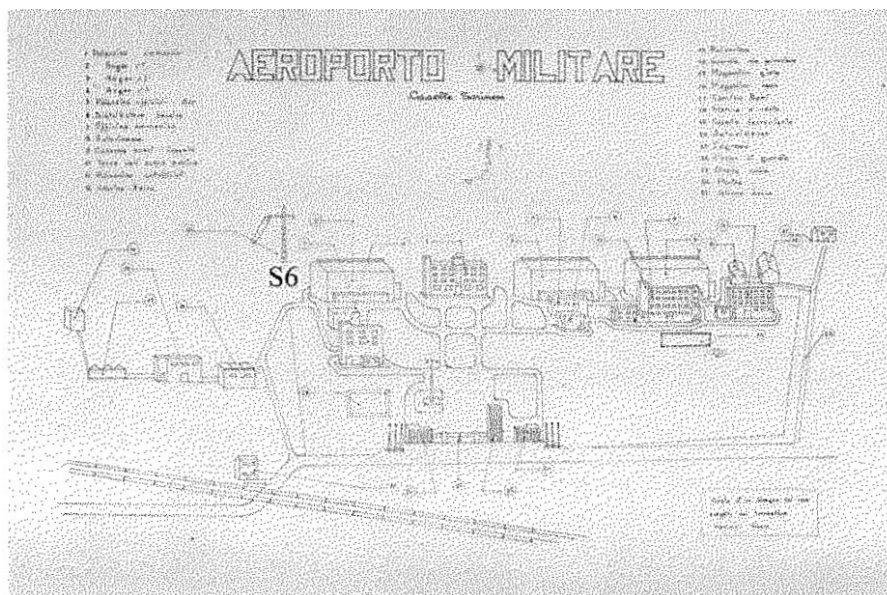


Figura 5.2: Pianta degli edifici dell'aeroporto militare di Caselle^[50]

La seconda guerra mondiale lascia una ferita profonda anche per l'aeroporto di Mirafiori, che fu bombardato nella notte del 13 luglio 1943 da aerei della RAF (*Royal Air Force*), subendo una parziale distruzione. Durante il secondo Dopoguerra, i resti dell'aeroporto sono ormai inutilizzabili e viene demolito nel 1951, diventando poi sede del Parco Gustavo Colonnetti dal 1977, mentre

l'aviazione commerciale si sposta presso l'aeroporto dell'Aeritalia. Con sede in corso Francia, questo campo era nato nel 1917 per il collaudo degli aerei della Società Anonima per Costruzioni Aeronautiche ing. Ottorino Pomilio & C. e venne ceduto nel 1927 alla FIAT, che cambiò il nome in "FIAT Aeronautica d'Italia S.A.", da cui nacque l'abbreviazione "Aeritalia". L'aeroporto dell'Aeritalia diventa il principale scalo aereo cittadino di Torino dal secondo conflitto mondiale in poi e al termine della guerra l'aeroporto viene completamente ripristinato, con la ripresa dei voli commerciali di linea.

Il 4 maggio 1949 "una spaventosa tragedia si abbatte sulla città. ... Il grande trimotore ... proveniente da sud, si trovava sulla giusta rotta per atterrare in corso Francia, ma era ad una quota troppo bassa per sorvolare la collina proprio sulla basilica di Superga. ... E fu la catastrofe." [50]. L'impatto contro i muraglioni sul retro della Basilica di Superga causò la morte istantanea di tutte le trentuno persone a bordo dell'aereo della squadra di calcio del Grande Torino e questo grave incidente rese necessaria la realizzazione di un aeroporto moderno adatto ad accogliere i velivoli da trasporto civile sempre più grandi.

Il piano del nuovo aeroporto di Caselle, assieme al preventivo di spesa, viene presentato nel Comune di Torino il 7 febbraio 1950 e approvato un mese più tardi dal Ministero dell'Aeronautica, dando inizio ai lavori di costruzione del nuovo aeroporto civile al servizio dell'area metropolitana sul sedime del primo aeroporto militare, nel territorio dei comuni di Caselle Torinese e San Francesco al Campo. Il 30 luglio 1953 viene inaugurato l'aeroporto "Città di Torino", spesso indicato come "Caselle" dal nome del comune che ne accoglie la parte principale, costituito da una pista larga 60 m e lunga 1.800 m orientata sud-nord, che già nel 1954 viene prolungata a 2.350 m, e parallelamente la via di rullaggio, larga 23 metri, che separa la pista dal piazzale di 40 mila metri quadrati. Conclude il complesso un unico edificio sul lato nord del piazzale, occupato dalla "direzione di aeroporto, la sezione telecomunicazioni, il servizio meteorologico e la direzione dell'Aviazione civile" [50].



Figura 5.3: Documentazione per stabilire a Torino la sede del Mercato Comune Europeo [50]

Un Convair 340 bimotore dell'Alitalia inaugura il primo volo di linea Torino-Roma il 5 agosto 1953 e in questa prima fase la gestione fa capo all'Assessorato ai trasporti del Comune di Torino, segno di una forte regia pubblica nella fase di avvio. Il 6 marzo 1956 viene costituita la SAGAT, *Società Azionaria per la Gestione dell'Aeroporto di Torino*, a cui il Comune affida la gestione dell'aeroporto torinese, con un capitale sociale iniziale fissato a 200 milioni di lire e suddiviso in 20 mila azioni da 10 mila lire ciascuna. Questo passaggio segna l'avvio della crescita dello scalo e si inserisce nel più ampio processo di modernizzazione dei trasporti torinesi: dall'unica linea aerea attiva che collegava Torino con Roma, viene istituita nel 1958 una linea aerea internazionale con Londra e nello stesso anno con Parigi, seguite nel 1962 dal collegamento con Francoforte.



Figura 5.4: Il primo logo della SAGAT^[50]



Figura 5.5: Il secondo logo della SAGAT^[50]

Tra la fine degli anni '80 e primi anni '90 lo scalo conosce una fase di profondo rinnovamento infrastrutturale, a partire dalla pista di volo che nel 1981 raggiunge i 3000 metri di lunghezza, diventando una delle piste più lunghe e sicure d'Italia. Successivamente vengono ampliati i piazzali a nord e a sud dell'aerostazione, ricavando 7000 metri quadrati per l'aviazione generale, e l'aerostazione, che nel 1984 viene estesa utilizzando il capannone usato per lo smistamento bagagli e i metri quadri delle sale partenze nazionali e internazionali vengono duplicati. Fondamentale per la definizione degli interventi da apportare sulle strutture dell'aeroporto è la definitiva stesura del Master Plan nel 1982, che prevede “il potenziamento delle strutture tecniche per il volo, quelle per il movimento delle merci, una nuova aerostazione arretrata rispetto a quella esistente, l'utilizzo della ferrovia Torino-Ceres per il collegamento rapido alla città e nuove strutture stradali che dall'aeroporto si inseriscano nel sistema di strade tangenziali di Torino e quindi anche nella rete autostradale che fa capo alla città.”^[50]. Nell'ottobre 1986 la Commissione lavori pubblici e trasporti del Senato autorizza la privatizzazione della gestione aeroportuale, inizialmente prevista fino al 2015 e successivamente estesa al 2035, conferendo così una solida base economica agli ingenti investimenti previsti dal Master Plan.

Tra i numerosi lavori di rinnovamento e ampliamento, i due interventi di maggiore rilievo sono strettamente connessi all'organizzazione di eventi sportivi di portata internazionale. Il primo risale al 1989, in vista del campionato mondiale di calcio ospitato in Italia nel 1990, ma si conclude definitivamente nel dicembre 1993, con la demolizione della vecchia torre di controllo e l'apertura di una nuova aerostazione, dotata di sei pontili di imbarco per l'accesso diretto agli aeromobili e di un parcheggio multipiano collegato ai terminal di arrivi e partenze. In questo modo, l'aeroporto raggiunge una capacità di 3 milioni di passeggeri l'anno ed è connesso direttamente al parcheggio

moltiplicano, capace di ospitare quasi 3.000 posti auto. Il secondo grande intervento fu portato a termine il 30 gennaio 2006, dopo due anni di lavori di riqualificazione, in preparazione ai XX Giochi olimpici invernali del 2006 e permise di potenziare in maniera significativa le strutture aeroportuali, ampliando l'aeroporto per gestire l'incremento del traffico passeggeri per un costo complessivo di 90 milioni di euro.

Intervento	Descrizione	Dati principali
Nuova aerostazione	Terminal moderno e tecnologicamente avanzato	Capacità di oltre 5 milioni di passeggeri l'anno
Ampliamento area imbarchi	Struttura panoramica con vetrata	9.300 m^2 con vetrata di oltre 3.500 m^2 , 22 gate e 16 postazioni sicurezza
Terminal per passeggeri charter	Edificio dedicato, collegato alla nuova autostazione bus	24 check-in e autostazione da 100 posti bus
Collegamento parcheggio multipiano	Passerelle aeree con il terminal	2 passerelle da 33 m con accesso diretto al secondo livello aerostazione
Centro logistico bagagli (BHS)	Struttura con sistemi di smistamento radiogeni avanzati	13.800 m^2
Aviazione Generale	Nuovo edificio su tre livelli per voli business/VIP	4.700 m^2 , piazzali di sosta 21.000 m^2

Tabella 5.1: Principali interventi di ammodernamento dell'Aeroporto di Torino per il 2006

Nel 2008 vengono autorizzati nuovi interventi migliorativi nella sala arrivi, con l'obiettivo di rendere più efficienti i percorsi di uscita dei passeggeri, e nel 2007 e nel 2008 l'Aeroporto di Torino, intitolato allo statista "Sandro Pertini" all'inizio degli anni 2000, ha vinto il prestigioso riconoscimento *ACI Europe Best Airport Awards* nella categoria sotto i 5 milioni di passeggeri l'anno, conseguendo di nuovo lo stesso risultato nel 2022 e nel 2024. Infine, con un investimento di circa 3,5 milioni di euro, il 24 luglio 2019 è stata inaugurata la rinnovata area arrivi dell'Aeroporto di Torino-Caselle, che è stata ampliata di circa il 21% offrendo ambienti più spaziosi e accoglienti e promuovendo una riqualificazione estesa su oltre 4.455 metri quadrati.

SAGAT, inizialmente interamente di proprietà pubblica, ha attraversato un lungo e graduale percorso di privatizzazione nel tempo. La prima tappa risale al dicembre 2000, quando è stata ceduta una quota del 41,33% del capitale azionario, poi a partire dal gennaio 2013 l'azionista di maggioranza è diventato F2i Sgr S.p.A., oggi conosciuto come 2i Aeroporti S.p.A., e la sua partecipazione è continuata a crescere negli anni successivi, fino ad acquisire, nel 2023, il 100% delle azioni di SAGAT.

In qualità di gestore aeroportuale, SAGAT è il soggetto cui è affidata la responsabilità della gestione, manutenzione e sviluppo dell'aeroporto. Una delle aree più rilevanti della sua attività è la gestione Airside, cioè quella parte dell'aeroporto destinata alle operazioni aeronautiche. Essa comprende la progettazione, la manutenzione e il controllo delle infrastrutture operative, delle piste di volo, dei raccordi e dei piazzali di sosta, nonché la gestione della segnaletica, dei sistemi di illuminazione e degli impianti di radioassistenza. Rientrano in questo ambito anche il coordinamento delle operazioni di rullaggio e parcheggio e la supervisione dei servizi di handling a terra. Accanto alla gestione Airside, il gestore aeroportuale è responsabile anche della gestione Landside, che riguarda le aree accessibili al pubblico e ai passeggeri. Questo ambito include la supervisione dei

terminal, delle aree check-in e d'imbarco, dei parcheggi, oltre alla regolamentazione delle attività commerciali e dei servizi presenti in aeroporto.

5.2 I dati AIP (*Aeronautical Information Publication*) Italy

L'*Aeronautical Information Publication* (AIP) è la pubblicazione ufficiale con cui ogni Stato mette a disposizione della comunità aeronautica internazionale tutte le informazioni necessarie per la pianificazione e l'esecuzione dei voli nel proprio spazio aereo. Si tratta di un manuale molto esteso, strutturato in sezioni e costantemente aggiornato, che raccoglie norme, procedure operative, caratteristiche degli aeroporti e dei servizi disponibili. In Italia la sua redazione e diffusione è affidata all'ENAV S.p.A., l'ente nazionale preposto alla fornitura dei servizi di navigazione aerea civile, nel rispetto delle regole stabilite dall'ICAO nell'*Annex 15* e dalle disposizioni di ENAC.

Tradizionalmente, l'AIP era diffuso in formato cartaceo o in file PDF scaricabili, risultando spesso ingombrante e poco pratico. Per questo motivo, dal 27 luglio 2023 l'Italia ha adottato l'eAIP (*Electronic Aeronautical Information Publication*), una versione digitale e interattiva che consente agli utenti di consultare direttamente online le sezioni di interesse.

La struttura e i contenuti delle AIP seguono uno schema uniforme stabilito a livello internazionale sotto la supervisione dell'ICAO. Generalmente, il documento è organizzato in tre sezioni principali, ciascuna delle quali è ulteriormente suddivisa in capitoli specifici che trattano dettagliatamente aspetti diversi. Le tre sezioni principali sono:

- GEN (*General*), che include le informazioni generali su regolamenti, procedure amministrative, contatti e organizzazione dei servizi aeronautici;
- ENR (*En Route*), che comprende i dati sulle rotte di volo, sugli spazi aerei regolamentati e sull'assistenza radar;
- AD (*Aerodromes*), che presenta le caratteristiche dettagliate degli aeroporti e degli eliporti.

L'AIP costituisce dunque il punto di riferimento unico e vincolante per piloti, compagnie aeree e operatori, garantendo l'accesso a dati ufficiali, verificati e costantemente aggiornati sulle infrastrutture e le procedure di volo in Italia così da garantire sicurezza delle operazioni di volo, standardizzazione e tutela legale in caso di dispute o indagini. Le informazioni riportate di seguito sono state ricavate dall'eAIP Italy, Parte 3 - AEROPORTI (AD), sezione AD 2 Aeroporti Certificati, AD 2 LIMF - TORINO Caselle^[52], successivamente integrate con i contenuti del Manuale di Aeroporto redatto dalla SAGAT S.p.A. in qualità di Gestore Aeroportuale, ai sensi dell'art. 705 del Codice della Navigazione e del Regolamento (UE) 139/2014.

5.2.1 Caratteristiche generali

L'Aeroporto di Torino-Caselle, identificato con il codice ICAO LIMF e il codice IATA TRN, costituisce lo scalo principale della città di Torino e dell'intera area metropolitana. Il sedime aeroportuale occupa una superficie di circa 290 ettari e insiste sui comuni di Caselle Torinese, San Maurizio Canavese e San Francesco al Campo, a 15 km a nord di Torino. Precisamente, la "Direzione e distanza dalla città" riportata nell'AIP Italy è di 8 NM (miglio nautico internazionale) NNW (a nord-nord-ovest) dal centro cittadino, in una posizione strategica rispetto al capoluogo piemontese e agli abitati circostanti, che garantisce un collegamento diretto con le principali direttrici di trasporto della regione.

Le strutture aeroportuali sono suddivise diversamente tra i tre Comuni, in particolare l'aerostazione, la zona avio-magazzini e la parte sud della pista di volo e di rullaggio insistono sul territorio

del Comune di Caselle, la porzione nord della pista di volo ed alcune strutture a terra insistono sul territorio del Comune di San Maurizio Canavese, infine una piccola porzione nord del sedime aeroportuale insiste sul territorio del comune di San Francesco al Campo. L'abitato di Caselle Torinese è situato immediatamente a sud della pista di volo e viene sorvolato prevalentemente dai velivoli in fase di avvicinamento per l'atterraggio sulla pista 36. Sul lato nord si trova invece il comune di San Francesco al Campo, esposto principalmente alle operazioni di decollo dalla stessa pista. Nella zona orientale dell'aeroporto, in corrispondenza circa della metà della pista, è ubicata la frazione di Malanghero, appartenente al Comune di San Maurizio Canavese, che risulta interessata dal rumore generato da entrambe le tipologie di operazioni aeree, sia in arrivo sia in partenza.



Figura 5.6: Inquadratura Territoriale su orto-foto e comuni limitrofi (Manuale di Aeroporto - Parte C - Caratteristiche dell'aeroporto)

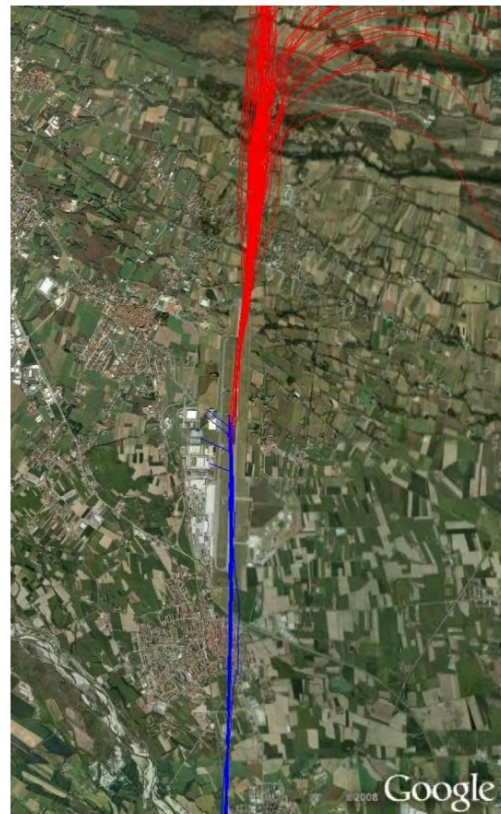


Figura 5.7: Tracce radar degli atterraggi (in blu) e dei decolli (in rosso)^[53]

Dal punto di vista geografico, l'aeroporto si trova a una quota di 989 piedi sul livello del mare (AMSL *Above Mean Sea Level*), corrispondenti a circa 302 metri, con una temperatura di riferimento pari a 30,5 °C. Le coordinate geografiche ufficiali della posizione del punto di riferimento dell'aerodromo ARP (*Aerodrome Reference Point*) sono 45°12'09''N e 007°38'58''E, posizione che deve essere definita in maniera permanente e riportata con un grado di precisione almeno al secondo più vicino di latitudine e longitudine. Questo punto non viene scelto arbitrariamente, ma deve essere collocato, per quanto possibile, in prossimità del centro geometrico dell'area destinata alle operazioni di atterraggio e decollo. Nella sua individuazione è inoltre "necessario considerare l'eventuale sviluppo futuro dell'aeroporto, in modo che il riferimento resti valido e coerente anche in caso di ampliamenti o modifiche infrastrutturali"^[54].

Presso l'Aeroporto di Torino è consentito il traffico sia IFR (*Instrument Flight Rules*), ossia i voli condotti secondo le regole del volo strumentale, sia VFR (*Visual Flight Rules*), cioè i voli eseguiti secondo le regole del volo a vista con riferimento visivo alle condizioni esterne. Ciò garantisce la massima flessibilità operativa, consentendo l'utilizzo dello scalo sia in condizioni meteorologiche favorevoli sia in scenari che richiedono il supporto delle apparecchiature di bordo e di terra per la navigazione.

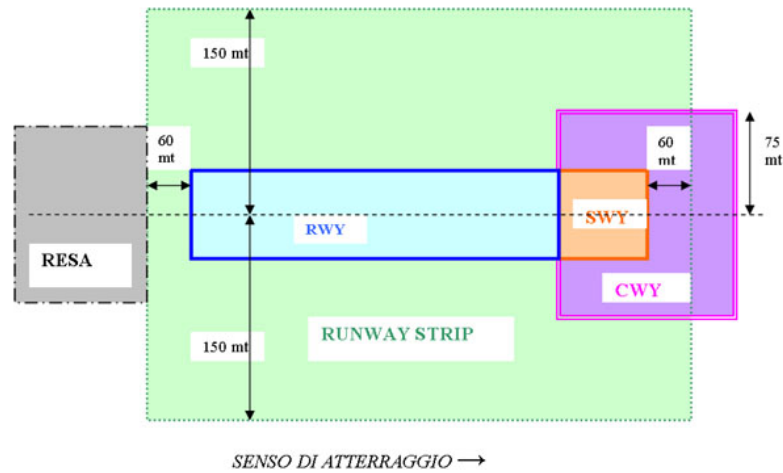
In base alla classificazione stabilita dall'Annesso 14 dell'ICAO, ogni aeroporto possiede un codice di riferimento alfanumerico di due caratteri, dove il primo è numerico e si riferisce alle caratteristiche della pista mentre il secondo è alfabetico e si riferisce alle caratteristiche degli aeromobili. L'Aeroporto di Torino è di classe 4E in quanto la pista ha una lunghezza superiore a 1800 m e gli aeromobili che operano possono avere al più un'apertura alare maggiore o uguale a 52 m ma inferiore a 65 m e distanza esterna tra i carrelli principali maggiore o uguale a 9 m ma inferiore a 14 m. Questo codice riflette le caratteristiche fisiche delle piste e delle infrastrutture collegate, indicando che lo scalo è in grado di accogliere aeromobili di grandi dimensioni e ha una lunghezza di pista idonea alle operazioni di lungo raggio. In particolare, secondo la Nota Informativa NI-2021-005 dell'ENAC, l'aeromobile di riferimento per lo scalo è il Boeing 747-400 (*most demanding*), mentre l'aeromobile critico è rappresentato dal Boeing 737-800. In via eccezionale, lo scalo può inoltre accogliere aeromobili di codice F, sebbene attualmente tale possibilità sia limitata, come stabilito dalla procedura interna PO18, ai soli Boeing 747-8I/F e Antonov AN-124.

Un ulteriore elemento di rilievo è rappresentato dalla categoria degli aerodromi ai fini del soccorso e della lotta antincendi, che si basa sugli aerei più lunghi che normalmente utilizzano l'aerodromo e la loro ampiezza di fusoliera. Nel caso specifico, l'aeroporto è classificato come CAT 8 che prevede una lunghezza fuori-tutto dell'aeromobile da 49 metri fino a 61 metri esclusi e una larghezza massima della fusoliera di 7 metri.

5.2.2 Caratteristiche infrastrutturali

L'Aeroporto di Torino-Caselle è dotato di un'unica pista di atterraggio e decollo orientata lungo l'asse nord-sud e denominata RWY 18/36, secondo il codice QFU che rappresenta l'orientamento magnetico di una pista di volo, mentre il rilevamento vero QTE (*true bearing*) è rispettivamente di 182.57° nel caso della RWY 18 e 002.57° nel caso della RWY 36. La pista ha una lunghezza di 3.300 metri e una larghezza di 60 metri, con superficie in asfalto (ASPH).

La soglia della pista (*runway threshold*) è l'inizio della parte della pista utilizzabile per l'atterraggio e generalmente coincide con l'inizio stesso della pista, ma in questo caso è in una posizione differente, in particolare la posizione della soglia è spostata in avanti per la RWY 18 di 726 metri mentre per la RWY 36 di 350 metri. Questo avanzamento è legato alla presenza di ostacoli urbani a Sud e di ostacoli orografici a Nord, così da garantire che, in fase di sorvolo, gli aeromobili mantengano una quota più elevata rispetto alla superficie ostacoli, rispettando i requisiti di sicurezza. Le soglie delle RWY 18/36, inoltre, presentano leggere differenze di elevazione: la RWY 18 è posta a 981,5 ft, mentre la RWY 36 a 933,7 ft, per cui la pista presenta una pendenza longitudinale media del 0,59% a salire, da sud verso nord. Non è presente un'area di arresto a fine pista SWY (*stopway*), ma è presente una *runway strip* di dimensioni pari a 3.420 x 300 metri a verde, cioè una striscia di sicurezza della pista che è una porzione rettangolare di terreno mantenuta sgombra da qualsiasi ostacolo e disposta in asse con la pista stessa, sviluppandosi simmetricamente ai suoi due lati. Alle estremità della pista si trovano le RESA (*Runway End Safety Area*), un'area di sicurezza intesa a ridurre il rischio di danni in caso di uscita di pista degli aeromobili, di 240 x 150 metri a verde per la RWY 18 e parzialmente in conglomerato bituminoso e parzialmente a verde per la RWY 36, a causa della presenza del cavo *Bliss Bak* 12.

Figura 5.8: Caratteristiche di un sistema pista^[55]

Ad ovest della pista sono collocati la maggior parte degli edifici ed impianti, così come i piazzali di sosta e manovra degli aeromobili e le piste di rullaggio (*taxiways*). Il collegamento tra pista e *taxiway* è realizzato attraverso sette raccordi identificati mediante un codice alfabetico a partire da nord, secondo la notazione internazionale: Alfa, Bravo, Charlie, Delta, Echo, Foxtrot e Golf. Per quanto riguarda i piazzali (*apron*), l'Aeroporto di Torino dispone di diverse aree operative tutte in conglomerato cementizio.

Le vie di rullaggio (TWY) sono realizzate tutte in conglomerato bituminoso ma sono anch'esse caratterizzate da differenti dimensioni. Le principali *taxiway* A, B e C hanno una larghezza di 30 metri, mentre le *taxiway* D, E, F, H, L e Y presentano una larghezza standard di 23 metri. Una configurazione particolare è quella della TWY G, larga 28 metri, e infine c'è la TWY J, larga 30 metri, che risulta permanentemente chiusa.

Figura 5.9: Planimetria dell'aeroporto^[53]

5.2.3 Caratteristiche operative

Le caratteristiche operative dell'Aeroporto di Torino-Caselle sono descritte in modo dettagliato nell'AIP Italy e nel Manuale di Aeroporto, fornendo un quadro completo di come vengono svolte le diverse operazioni. Per quanto riguarda le *Obstacle Free Zone* (OFZ), si tratta di volumi tridimensionali di spazio aereo sotto i 150 ft, circa 46 metri, immediatamente adiacenti alla pista che proteggono il transito degli aeromobili da e verso la pista, vanno mantenuti liberi da ostacoli e costituiscono un requisito fondamentale per garantire la sicurezza durante le operazioni di decollo e, soprattutto, durante gli avvicinamenti strumentali di precisione. All'Aeroporto di Torino, la RWY 18 è classificata come non strumentale, quindi non dispone di una OFZ dedicata. Al contrario, la RWY 36 è una pista di precisione categoria III, il livello più elevato previsto dagli standard ICAO, ed è utilizzata per avvicinamenti strumentali ad alta accuratezza anche in condizioni di scarsa visibilità, pertanto è dotata di una OFZ così da garantire che lo spazio aereo immediatamente al di sopra della pista sia completamente libero da ostacoli durante le fasi di atterraggio.

L'Aeroporto di Torino-Caselle dispone di una capacità operativa tale da gestire sia il traffico commerciale sia quello di aviazione generale, con un'area di sosta degli aeromobili articolata in 31 parcheggi dedicati ai voli di aviazione commerciale e 8 parcheggi riservati ai voli di aviazione generale. Per quanto riguarda la capacità della pista, lo scalo è in grado di gestire un numero massimo di 14 arrivi e 14 partenze all'ora, con una capacità complessiva di 28 movimenti all'ora. È inoltre previsto un vincolo di massimo 7 movimenti ogni 15 minuti, al fine di mantenere la regolarità delle operazioni e assicurare il rispetto degli standard di sicurezza.

Un passaggio fondamentale nella storia operativa dello scalo torinese è stato l'introduzione del sistema di atterraggio strumentale ILS (*Instrument Landing System*). Nel luglio 1985 è stato installato un impianto ILS SEL 4000 che ha reso possibile il mantenimento di elevati standard di sicurezza nelle operazioni di volo, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. Il 15 novembre 1986, a seguito delle verifiche tecniche, l'aeroporto viene dichiarato dall'AAAV (Azienda Autonoma di Assistenza al Volo), che allora era l'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo, idoneo ad accogliere atterraggi con procedure ILS di categoria II, che garantivano operazioni sicure anche in presenza di visibilità fortemente ridotta. Negli anni successivi l'impianto è stato ulteriormente perfezionato e nel 1992 il sistema viene aggiornato e potenziato raggiungendo la configurazione di categoria IIIB, attualmente la più avanzata, che presenta una DH (*Decision Height*) inferiore a 15 metri o senza altezza di decisione e una RVR (*Runway Visual Range*) inferiore a 175 metri ma non al di sotto di 50 metri.

Di fondamentale importanza è l'elenco e la localizzazione degli ostacoli, orografici o naturali, presenti nelle aree aeroportuali e nelle zone circostanti che possono costituire un potenziale pericolo per le operazioni di volo. La pubblicazione di tali informazioni serve per garantire la sicurezza della navigazione aerea attraverso la corretta definizione delle *Obstacle Limitation Surfaces* (OLS), superfici immaginarie che delimitano lo spazio aereo entro cui non devono penetrare ostacoli. Tali superfici, definite in conformità con l'Annesso 14 dell'ICAO e le EASA CS ADR-DSN, comprendono la superficie di avvicinamento, la superficie di decollo, le superfici di transizione, le superfici orizzontali interne ed esterne e la superficie conica. Una volta fissate tali superfici in funzione della tipologia di aeroporto, si procede a individuare gli elementi che eventualmente le forano: l'imposizione delle OLS ha la finalità di prevenire la creazione di nuovi ostacoli che possano interferire con le operazioni e, al tempo stesso, di definire le procedure operative. Ogni oggetto che eccede tali limiti viene classificato come ostacolo penetrante e determina restrizioni operative o la necessità di adottare misure mitigative, come l'adeguamento delle procedure strumentali, l'installazione di segnalazioni luminose o, in alcuni casi, la rimozione o riduzione dell'ostacolo stesso.

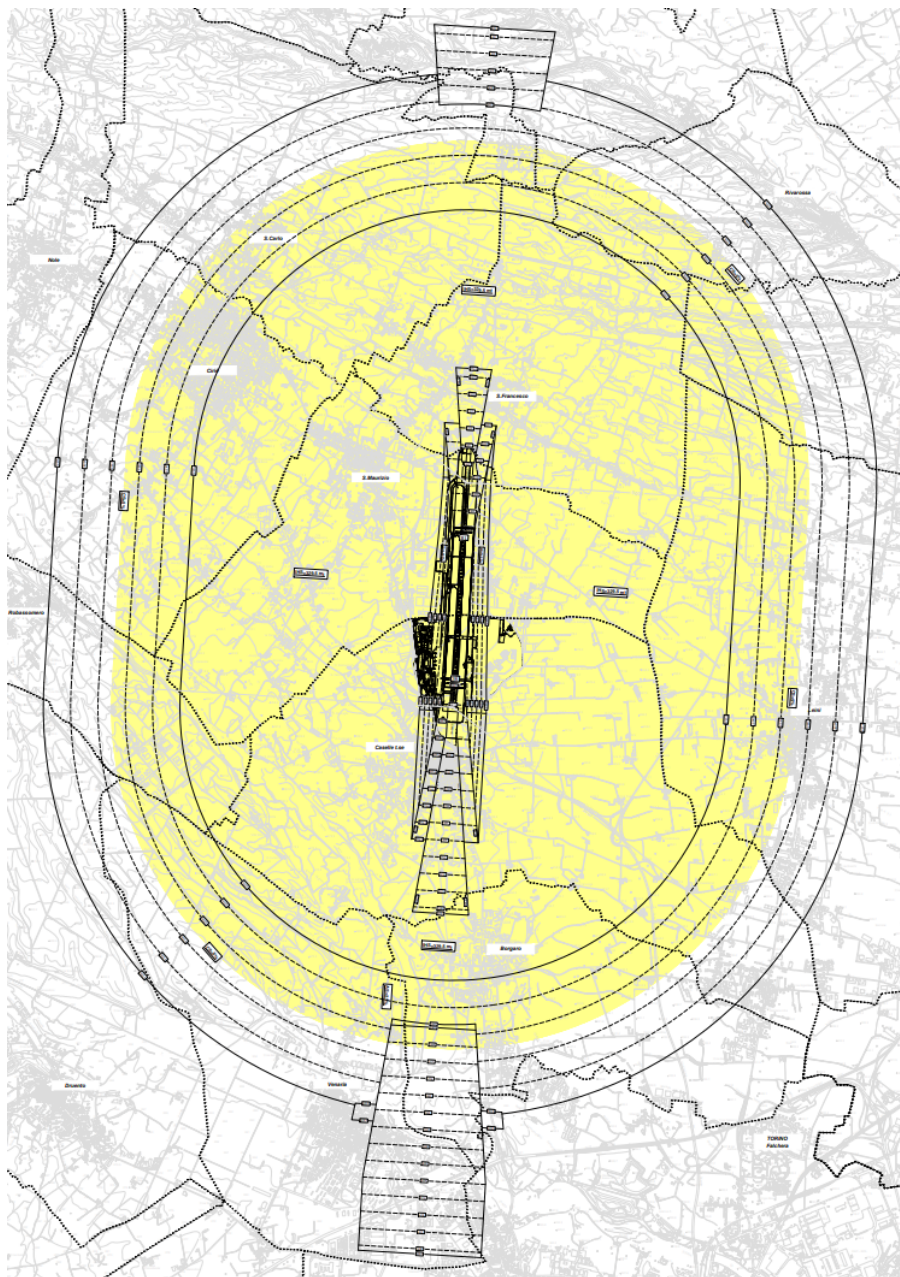


Figura 5.10: Superficie di inviluppo e superficie VFR (Manuale di Aeroporto - Parte C - Allegato PC12 - Mappe di Vincolo-PG-02 rev01.pdf)

5.2.4 Servizi di supporto operativo

Le operazioni di volo presso l'Aeroporto di Torino-Caselle sono garantite da una serie di servizi di supporto che consentono lo svolgimento sicuro ed efficiente delle attività aeronautiche. Il servizio meteorologico dell'Aeroporto di Torino-Caselle fa uso della stazione meteorologica di Torino Caselle, identificata con il codice ICAO LIMF e con il codice WMO 16059. Quest'ultimo codice è assegnato dalla *World Meteorological Organization* (WMO) ed è costituito da cinque cifre:

le prime due identificano la nazione in cui è presente la stazione meteorologica, mentre le ultime tre cifre numeriche identificano univocamente la stazione meteorologica in esame. L'aeroporto è supportato dall'ARO/CBO (*ATS Reporting Office con capacità di Central Briefing Office*) di Milano, che ha il compito di raccogliere, verificare e diffondere informazioni operative essenziali per il volo, tra cui quelle meteorologiche, in collaborazione con le autorità di controllo del traffico aereo. Parallelamente, l'ufficio meteo associato Italy MFU rappresenta la struttura tecnica responsabile della raccolta e dell'elaborazione dei dati meteorologici, sia di osservazione che di previsione. Questo ufficio fornisce bollettini METAR e TAF, rapporti sulle condizioni atmosferiche locali e analisi di fenomeni meteorologici H24.

L'Aeroporto di Torino può essere occasionalmente interessato da fenomeni di *wind shear* orografico, in particolare dovuti al Föhn. Tali episodi si manifestano prevalentemente con cielo sereno e venti provenienti da nord-ovest, specialmente nei mesi di dicembre e gennaio, e possono influenzare le fasi critiche di decollo e atterraggio. Inoltre, vengono considerate operativamente significative le nubi con base inferiore a 15.700 ft e tutti i cumulonembi o cumuli torreggianti, indipendentemente dall'altezza della base, in quanto tali formazioni possono impattare le operazioni di volo.

Per quanto riguarda le luci di avvicinamento, la RWY 18 non è equipaggiata con un sistema strumentale, è presente soltanto l'illuminazione della soglia con barre laterali verdi (*wing bars*), senza luci sull'asse centrale di pista o sistemi avanzati. Al contrario, la RWY 36 dispone di un sistema di categoria II/III lungo 900 metri, con luci ad alta intensità (LIH), conforme agli standard ICAO per piste di precisione. Entrambe le testate sono inoltre dotate di indicatori ottici di pendenza di avvicinamento, cioè sistemi luminosi di avvicinamento PAPI a quattro luci bicromatiche per lato, tarati su un angolo di 3°, in particolare per la RWY 18 è classificato come "OBS non strumentale" e prevede un *Minimum Eye Height over Threshold* (MEHT) di 16 metri, mentre per la RWY 36 un MEHT di 24,7 metri. In merito all'illuminazione di pista, anche questa presenta differenze significative tra le due *runways*. La RWY 18 è priva di luci di asse pista (RCL) e dispone unicamente di luci di bordo pista bianche, che diventano gialle negli ultimi 600 metri e rosse nella zona di fine pista. La RWY 36, invece, è dotata di luci di asse pista ad alta intensità, disposte ogni 15 metri per un'estensione di 2400 metri, che negli ultimi 300 metri assumono una configurazione alternata bianco/rosso, per diventare interamente rosse al termine della pista, mentre le luci di bordo pista seguono lo stesso schema cromatico della RWY 18. Infine, relativamente alla sicurezza di fine pista, entrambe le testate sono contrassegnate da luci rosse, che segnalano con chiarezza il termine della *runway*.

5.2.5 Vincoli ambientali

Dal punto di vista morfologico, il sedime aeroportuale si sviluppa nella pianura a nord di Torino, un'area favorevole alle operazioni di volo per l'assenza di ostacoli naturali rilevanti. Tuttavia, l'Aeroporto di Torino-Caselle si colloca in un contesto complesso, in cui convergono esigenze di sviluppo infrastrutturale ma allo stesso tempo anche necessità di tutela del territorio. I vincoli derivano principalmente da due fattori: la prossimità a centri abitati e la presenza di aree agricole e naturali di interesse ambientale.

La vicinanza con nuclei urbani quali Caselle Torinese, San Maurizio Canavese e San Francesco al Campo, oltre che con l'area metropolitana di Torino, comporta la necessità di adottare restrizioni operative, orari di limitazione e procedure di decollo/atterraggio dedicate per contenere l'inquinamento acustico. Tali misure rispondono sia alle normative italiane ed europee in materia di rumore aeroportuale, sia a specifici studi di impatto ambientale che valutano la compatibilità dello scalo con le zone residenziali circostanti. L'implementazione di procedure antirumore (*noise abatement procedures*) e il monitoraggio continuo tramite centraline acustiche costituiscono strumenti fondamentali per mitigare gli effetti del traffico aereo sulle popolazioni residenti.

Oltre ai vincoli di tipo acustico, va considerata anche la presenza di aree agricole e di importanza ambientale, che limitano le possibilità di espansione futura dello scalo. Il territorio circostante è infatti caratterizzato da una combinazione di zone urbanizzate, terreni agricoli e aree verdi, che richiedono un'attenta pianificazione per garantire la sostenibilità ambientale delle attività aeroportuali. Questi aspetti incidono non solo sulla possibilità di ampliamento infrastrutturale, ma anche sulla gestione delle superfici e delle rotte di volo, affinché l'operatività non comprometta la qualità dell'ambiente e del paesaggio.

5.3 Il traffico aereo, i movimenti e le rotte commerciali

L'Aeroporto di Torino-Caselle rappresenta il principale scalo aereo del Piemonte e svolge un ruolo fondamentale anche per la Valle d'Aosta, configurandosi come un'infrastruttura strategica per il Nord-Ovest italiano. La sua posizione geografica, a breve distanza dal capoluogo piemontese e al centro di una rete di collegamenti autostradali e ferroviari, lo rende un punto di accesso privilegiato sia per la mobilità locale, sia per i flussi nazionali e internazionali.

Negli ultimi anni lo scalo ha conosciuto un costante incremento del traffico, consolidandosi come punto di riferimento non solo per i viaggi di linea e charter, ma anche per l'aviazione generale e alcune operazioni di carattere militare. La diversificazione della tipologia di voli consente all'aeroporto di adattarsi alle diverse esigenze di trasporto e dall'analisi dei movimenti e delle rotte emerge una spiccata stagionalità, legata sia al turismo estivo internazionale sia alle destinazioni sciistiche invernali, che richiamano un elevato numero di passeggeri dal Nord Europa. In parallelo, l'apertura di nuove rotte e l'ampliamento delle frequenze verso le principali città italiane ed europee hanno rafforzato il ruolo di Torino-Caselle come hub regionale competitivo.

Nel seguito verranno approfondite le principali caratteristiche del traffico aereo dell'aeroporto, attraverso un'analisi articolata in diverse dimensioni: la tipologia di traffico servito, la portata media annua di movimenti e le variazioni stagionali, nonché i vettori che operano sullo scalo e i principali collegamenti nazionali e internazionali.

5.3.1 Tipologia di traffico

L'aeroporto presenta una tipologia di traffico eterogenea, in cui la componente prevalente è rappresentata dal traffico commerciale di linea. Questa fascia del settore è operata da aeromobili narrow-body di media capacità, tra i quali il Boeing 737-800 e l'Airbus A320 che nelle diverse varianti costituiscono i modelli più diffusi. Questi velivoli sono ampiamente impiegati dalle principali compagnie low-cost e tradizionali che collegano Torino con gli altri scali europei e con le principali destinazioni italiane. Accanto a questa componente, è presente il traffico charter dei voli neve, con una concentrazione marcata nei mesi invernali, legata all'afflusso di turisti diretti alle località sciistiche alpine.

Un'ulteriore quota del traffico è costituita dall'aviazione generale e business aviation, favorita dalla vicinanza con i poli economico-industriali piemontesi e dalla presenza di importanti centri direzionali a Torino. Jet privati di piccole e medie dimensioni operano regolarmente da Caselle, contribuendo alla flessibilità dello scalo. Rilevante è la flotta utilizzata dalla *Turin Flying Academy* composta da 7 velivoli ad elica, in parte prodotti dalla Piper Aircraft Corp. e in parte dalla Diamond Aircraft Industries, ma tutti certificati IFR/VFR.

Per quanto riguarda il segmento cargo, questo riveste oggi un ruolo marginale, con un numero limitato di movimenti annuali, a causa della concentrazione del traffico merci su Malpensa che ha limitato le prospettive di crescita e sviluppo del settore presso l'Aeroporto di Torino. Accanto a questo, lo scalo ospita anche voli militari, operazioni delle forze dell'ordine, voli di Stato e diplomatici, che contribuiscono alla varietà delle attività svolte. Un ruolo significativo è inoltre

svolto dai velivoli Leonardo, dal momento che la pista di Caselle supporta anche attività militari e industriali, in virtù della presenza di più stabilimenti Leonardo nell'intorno del sedime aeroportuale.

5.3.2 Andamento dei movimenti

Secondo i dati di traffico pubblicati da Assaeroporti o Associazione Italiana Gestori Aeroporti^[56], nel 2024 l'Aeroporto di Torino-Caselle si è posizionato al tredicesimo posto a livello nazionale per volume di passeggeri, con circa 4,69 milioni di viaggiatori transitati nell'arco dell'anno. Considerando invece il numero complessivo di movimenti aerei, che comprendono sia i decolli sia gli atterraggi, l'aeroporto occupa l'undicesima posizione con circa 44 mila operazioni registrate. Infine per quanto concerne il traffico cargo, il ruolo dello scalo risulta più contenuto: con 473 tonnellate di merce movimentata, Torino si posiziona al ventesimo posto tra gli aeroporti italiani.

Aeroporto	Nazionali	%	Internazionali	%	Di cui UE	%	Transiti Diretti	%	Totale Commerciale	%	Aviazione Generale e al	%	TOTALE	%
TOTALI	72.138.306	5,8	145.838.533	13,8	97.741.635	13,6	468.969	0,9	218.445.808	11,0	632.578	77,2	219.078.386	11,1
Roma Fiumicino(*)	10.465.603	19,8	38.216.020	21,0	22.620.804	21,0	197.415	12,5	48.879.038	20,7	324.696	541,9	49.203.734	21,4
Milano Malpensa	4.418.250	-12,9	24.317.638	16,8	13.258.934	19,6	160.684	-6,8	28.896.572	10,9	13.796	6,6	28.910.368	10,9
Bergamo	3.754.153	1,7	13.590.786	10,7	10.177.486	7,9	5.927	7,5	17.350.866	8,6	2.707	27,8	17.353.573	8,6
Napoli	3.727.940	-8,1	8.903.941	7,1	6.637.545	6,7	7.641	-14,0	12.639.522	2,1	10.956	-35,8	12.650.478	2,1
Catania	7.532.347	9,6	4.798.280	24,5	4.277.822	42,4	9.560	-1,9	12.340.187	15,0	6.343	-7,5	12.346.530	15,0
Venezia(*)	2.220.148	-3,5	9.347.761	3,8	6.137.389	3,1	6.377	-26,2	11.574.286	2,3	16.070	8,0	11.590.356	2,3
Bologna	2.655.735	9,0	8.104.421	7,8	5.779.276	6,4	4.531	-31,9	10.764.687	8,1	11.285	12,0	10.775.972	8,1
Milano Linate	5.597.681	16,5	5.000.978	9,5	4.169.557	9,1	1.775	-7,4	10.600.434	13,1	50.556	-3,6	10.650.990	13,0
Palermo	6.139.550	7,6	2.763.779	16,3	2.358.421	15,9	12.980	-5,9	8.916.309	10,1	5.292	-3,5	8.921.601	10,1
Bari(*)	3.367.749	3,0	3.886.303	22,0	3.328.499	18,6	13.158	-0,9	7.267.210	12,3	5.931	16,7	7.273.141	12,3
Pisa	1.338.754	3,2	4.191.570	10,4	2.595.993	11,4	4.655	10,9	5.534.979	8,6	12.029	0,8	5.547.008	8,6
Cagliari	3.792.534	5,2	1.360.901	9,6	1.084.346	10,5	2.666	36,5	5.156.101	6,4	5.111	-0,9	5.161.212	6,3
Torino	2.292.292	5,1	2.388.795	2,2	1.679.530	1,1	4.787	-5,8	4.685.874	3,6	8.103	9,4	4.693.977	3,6
Olbia	2.167.647	18,5	1.684.634	18,3	1.232.985	19,2	822	30,5	3.853.103	18,4	30.132	8,6	3.883.235	18,3

Figura 5.11: Passeggeri progressivi fino a Dicembre 2024 (Su Base 2023)^[56]

Aeroporto	Nazionali	%	Internazionali	%	Di cui UE	%	Totale Commerciale	%	Aviazione Generale e alt	%	TOTALE	%
TOTALI	526.121	4,1	978.254	10,9	687.867	9,1	1.504.375	8,4	216.683	1,5	1.721.058	7,5
Roma Fiumicino(*)	84.756	15,8	224.027	18,7	144.716	19,6	308.783	17,9	6.814	49,1	315.597	18,4
Milano Malpensa	30.141	-15,7	177.246	10,9	108.210	11,6	207.387	6,0	7.124	11,8	214.511	6,2
Milano Linate	48.262	9,8	42.562	6,7	35.257	5,0	90.824	8,4	27.236	-1,0	118.060	6,1
Bergamo	24.914	0,8	83.623	10,3	62.122	7,8	108.537	8,0	1.434	17,3	109.971	8,1
Venezia(*)	14.544	-4,6	66.506	3,3	47.392	2,9	81.050	1,8	7.801	14,1	88.851	2,7
Napoli	25.426	-9,7	56.313	5,8	41.689	5,8	81.739	0,4	4.759	-37,7	86.498	-2,8
Bologna	17.064	7,2	60.586	4,8	44.326	3,8	77.650	5,3	5.614	13,6	83.264	5,9
Catania	48.502	8,4	30.868	23,3	26.927	39,7	79.370	13,8	3.160	-6,6	82.530	12,8
Palermo	43.584	6,1	18.675	18,0	15.654	18,2	62.259	9,4	2.832	-0,8	65.091	8,9
Bari(*)	23.262	0,7	25.614	23,9	21.370	20,5	48.876	11,7	5.422	-14,8	54.298	8,3
Torino	14.438	2,7	19.031	0,3	14.343	-43,6	33.469	1,3	10.536	2,6	44.005	1,6
Roma Ciampino(*)	1.327	5,3	21.794	-0,7	13.484	-8,9	23.121	-0,4	19.308	-1,2	42.429	-0,7

Figura 5.12: Movimenti progressivi fino a Dicembre 2024 (Su Base 2023)^[56]

Aeroporto	Merci Avio	%	Merci Superficie	%	Totale Merci	%	Posta	%	TOTALE	%
TOTALI	1.178.038,1	15,2	19.953,4	19,7	1.197.991,5	15,3	51.244,1	7,8	1.249.235,6	14,9
Milano Malpensa	726.571,1	9,2	0,0	0,0	726.571,1	9,2	5.069,7	-18,9	731.640,8	8,9
Roma Fiumicino(^)	265.856,6	44,5	0,0	0,0	265.856,6	44,5	5.723,0	-2,1	271.579,6	43,0
Venezia(^)	54.694,0	25,9	6.863,5	77,5	61.557,5	30,2	39,9	-7,3	61.597,3	30,1
Bologna	45.465,9	10,4	10.905,0	11,0	56.370,9	10,5	0,2	-52,6	56.371,0	10,5
Brescia(^)	12.502,6	-8,8	0,0	-100,0	12.502,6	-9,5	26.065,2	21,7	38.567,8	9,4
Bergamo	22.964,4	8,8	0,0	0,0	22.964,4	8,8	0,0	0,0	22.964,4	8,8
Roma Ciampino(^)	14.536,6	4,6	0,0	0,0	14.536,6	4,6	0,1	-99,4	14.536,7	4,5
Pisa	12.766,5	1,2	148,9	-7,6	12.915,4	1,1	52,0	92,2	12.967,4	1,3
Napoli	8.672,4	-14,2	794,4	-0,2	9.466,7	-13,1	0,2	-59,7	9.467,0	-13,1
Ancona	6.569,0	-5,8	3,2	4,8	6.572,2	-5,8	0,1	0,0	6.572,3	-5,8
Catania	1.343,2	-50,2	0,0	0,0	1.343,2	-50,2	3.802,8	-2,3	5.146,0	-21,9
Cagliari	613,0	-69,4	0,0	0,0	613,0	-69,4	3.410,0	-1,6	4.023,0	-26,4
Bari(^)	53,0	-32,9	0,0	0,0	53,0	-32,9	2.266,0	-5,5	2.319,0	-6,3
Taranto-Grottaglie(^)	2.216,0	29,5	0,0	0,0	2.216,0	29,5	0,0	0,0	2.216,0	29,5
Milano Linate	1.381,8	-10,1	0,0	0,0	1.381,8	-10,1	741,2	33,2	2.123,0	1,4
Lamezia Terme	146,4	23,3	0,0	0,0	146,4	23,3	1.626,8	4,9	1.773,2	6,2
Palermo	233,0	-48,6	0,0	0,0	233,0	-48,6	1.212,0	-3,0	1.445,0	-15,1
Olbia	96,1	-19,2	0,0	0,0	96,1	-19,2	1.226,4	56,3	1.322,4	46,4
Genova	39,3	-29,2	786,8	-35,1	826,1	-34,8	0,8	-56,9	826,9	-34,8
Verona(^)	815,9	87,9	0,0	0,0	815,9	87,9	0,0	0,0	815,9	87,9
Torino	89,1	19,4	384,7	-31,8	473,7	-25,8	0,0	0,0	473,7	-25,8
Brindisi(^)	224,0	-50,0	0,0	0,0	224,0	-50,0	0,0	0,0	224,0	-50,0

Figura 5.13: Cargo progressivi fino a Dicembre 2024 (Su Base 2023)^[56]

Nel corso degli ultimi decenni, l'aeroporto ha assistito a un'evoluzione significativa dei propri volumi di traffico. A partire dal 1996, anno in cui per la prima volta furono registrati oltre i 2 milioni di passeggeri, lo scalo ha progressivamente incrementato i propri flussi fino a raggiungere i 3,95 milioni nel 2019, accompagnati da un numero annuo di movimenti aerei superiore alle 43 mila operazioni. Tale crescita è stata favorita non solo dall'ampliamento delle rotte nazionali e internazionali ma soprattutto dall'ingresso sul mercato di compagnie aeree low-cost, che hanno contribuito a rafforzare il ruolo dello scalo come punto di riferimento per il bacino Nord-Ovest italiano.

La crisi pandemica del 2020 ha interrotto bruscamente questa tendenza, determinando un drastico calo dei volumi: il traffico passeggeri si è ridotto del 64%, fermandosi a 1,4 milioni di viaggiatori, in linea con il crollo del settore a livello globale. La ripresa dello scalo è stata graduale ma rapida in quanto già nel 2021 i passeggeri sono saliti a 2,07 milioni (+46,8% rispetto al 2020), per poi accelerare nel 2022 toccando i 4,19 milioni (+103%). Dopo il calo dovuto alla pandemia da Covid-19, il biennio 2023-2024 ha rappresentato per lo scalo torinese non solo il pieno recupero dei livelli pre-Covid ma anche il loro superamento, portando a una ripresa più consistente rispetto alla media nazionale ed europea. Nei primi nove mesi del 2023, infatti, il traffico passeggeri è cresciuto del +14,7% rispetto al 2019 (anno di riferimento per il settore), a fronte di un incremento medio in Italia pari a +1,6% e addirittura di una contrazione a livello europeo (-3,9%) e mondiale (-2,7%). Ottobre e novembre 2023 hanno segnato i valori mensili più alti di sempre, portando al superamento del record annuale di traffico già a inizio dicembre, con oltre 4,53 milioni di passeggeri trasportati. L'anno successivo il traffico ha ulteriormente consolidato il trend positivo, raggiungendo nel 2024 i 4,69 milioni di passeggeri (+3,6% sul 2023) e i 44.005 movimenti, valori prossimi ai massimi storici già raggiunti nel 2017. I movimenti si sono stabilizzati su valori prossimi a quelli massimi storici, sostenuti dall'aumento delle rotte point-to-point e dall'apertura di nuove connessioni internazionali.

ANNO YEAR	N° PASSEGGERI NO. OF PASSENGERS	ANNO YEAR	N° PASSEGGERI NO. OF PASSENGERS
1953	3.483	1975	519.182
1954	12.742	1976	524.795
1955	21.363	1977	593.812
1956	24.786	1978	611.809
1957	39.748	1979	624.457
1958	38.158	1980	649.699
1959	52.603	1981	728.456
1960	71.983	1982	750.837
1961	95.379	1983	821.876
1962	112.814	1984	830.850
1963	126.362	1985	906.437
1964	139.880	1986	930.047
1965	147.005	1987	1.071.205
1966	150.902	1988	1.161.288
1967	179.449	1989	1.288.002
1968	242.030	1990	1.467.843
1969	338.252	1991	1.401.250
1970	417.603	1992	1.633.699
1971	465.157	1993	1.631.181
1972	467.284	1994	1.758.936
1973	517.684	1995	1.836.000
1974	515.814	1996	2.009.000

Figura 5.14: Movimento dei passeggeri 1953-1996^[50]

TRAFFICO PASSEGGERI													
Anno	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	TOT
2013	256.862	251.752	283.835	255.685	260.621	271.987	285.113	269.502	273.759	261.745	238.387	251.039	3.160.287
2014	266.969	267.388	294.766	270.509	297.841	296.379	332.116	304.432	309.331	277.005	248.069	267.181	3.431.986
2015	273.531	282.862	309.705	308.141	305.091	335.412	350.572	324.484	327.808	300.326	268.149	280.343	3.666.424
2016	298.806	321.833	346.471	312.453	331.793	344.008	364.466	345.742	350.210	328.576	293.054	313.496	3.950.908
2017	327.356	335.644	376.805	350.588	349.838	363.002	388.502	367.396	371.427	347.842	288.536	309.620	4.176.556
2018	318.941	327.546	366.789	346.722	335.869	337.565	363.923	341.458	358.011	347.013	307.296	333.790	4.084.933
2019	339.432	337.770	374.578	319.456	313.028	332.445	344.751	320.271	341.058	319.984	289.788	319.597	3.952.358
2020	333.274	313.742	66.446	1.487	2.619	23.994	128.377	171.484	161.872	120.850	30.453	52.774	1.407.372
2021	42.837	21.989	33.427	59.414	91.318	188.599	269.201	312.091	267.049	240.084	263.990	276.107	2.066.306
2022	223.584	246.342	308.031	350.993	378.361	403.401	426.572	427.338	416.968	380.398	288.811	343.282	4.193.881
2023	361.868	336.658	376.369	392.297	393.118	408.880	414.949	401.226	381.643	395.234	313.372	356.271	4.531.885
2024	363.024	351.647	399.677	385.140	398.609	407.275	416.501	401.566	412.862	407.744	352.177	396.415	4.693.977

TRAFFICO MOVIMENTI													
Anno	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	TOT
2013	3.714	3.570	3.953	3.620	3.999	3.753	3.879	3.068	3.585	3.720	3.404	3.391	43.656
2014	3.770	3.367	3.642	3.294	3.685	3.713	3.931	3.269	3.808	3.533	3.259	3.191	42.462
2015	3.579	3.446	3.925	3.730	3.851	3.997	4.092	3.340	3.720	3.576	3.488	3.517	44.261
2016	3.650	3.737	3.990	3.656	3.966	4.092	4.279	3.536	4.121	4.049	3.832	3.589	46.497
2017	3.761	3.452	3.970	3.878	4.158	4.315	4.625	4.015	4.319	4.207	3.627	3.528	47.855
2018	3.695	3.562	3.958	3.816	3.768	4.010	4.090	3.533	3.914	3.929	3.521	3.715	45.511
2019	3.943	3.798	4.148	3.371	3.605	3.657	3.783	3.237	3.819	3.516	3.327	3.450	43.654
2020	3.701	3.477	1.257	107	459	1.042	2.010	2.223	2.498	2.024	1.255	1.355	21.408
2021	1.172	787	1.297	1.405	1.616	2.506	2.944	3.005	3.259	2.839	3.073	3.229	27.152
2022	2.906	2.759	3.467	3.410	3.882	3.798	4.149	3.720	4.122	3.708	3.189	3.441	42.551
2023	3.541	3.371	3.848	3.615	3.636	3.862	3.832	3.485	3.524	3.769	3.255	3.568	43.306
2024	3.719	3.543	3.763	3.572	3.662	3.777	3.969	3.310	3.709	3.756	3.403	3.822	44.005

Figura 5.15: Traffico passeggeri e movimenti 2013-2024^[57]

Un elemento distintivo del traffico aereo presso lo scalo torinese è la marcata stagionalità dei flussi. L'estate 2023 ha rappresentato un risultato record, con oltre 2,8 milioni di passeggeri movimentati nel trimestre estivo (+25% rispetto all'estate 2019), il miglior risultato di sempre, mentre la stagione invernale ha beneficiato di un significativo afflusso di turisti stranieri diretti alle località sciistiche alpine, sostenuto dai collegamenti charter provenienti in particolare dal Nord Europa.

Un fattore determinante di questa crescita è stato il rafforzamento dei flussi incoming, ossia l'arrivo di passeggeri residenti in Paesi esteri e altre regioni italiane diretti a Torino e al Piemonte. Nel 2023 sono stati registrati 1,34 milioni di arrivi internazionali, pari a un incremento del +72% rispetto al periodo pre-pandemico. Ciò ha modificato sensibilmente la composizione della domanda: per la prima volta la quota di incoming ha raggiunto il 50,2% del totale, contro il 41,6% del periodo precedente alla crisi sanitaria. Il 2024 ha rafforzato questa tendenza, portando lo scalo a registrare il nuovo record storico di 4,69 milioni di passeggeri (+3% sul 2023, +18% sul 2019) grazie sia al traffico nazionale, che ha raggiunto i 2,3 milioni di passeggeri, sia al traffico internazionale, con

2,4 milioni. L'avvio del 2025 ha segnato per l'Aeroporto di Torino un risultato particolarmente positivo, con i mesi di gennaio e febbraio che hanno stabilito nuovi record storici di traffico: nei primi due mesi dell'anno sono transitati dallo scalo 786.407 viaggiatori, con un incremento del 10% rispetto al periodo gennaio-febbraio dell'anno precedente, a conferma di una crescita costante della domanda. Le prospettive per i prossimi mesi appaiono favorevoli grazie all'apertura di nuove rotte e al rafforzamento dei collegamenti introdotti nel 2024, che dovrebbero consentire di superare i volumi complessivi raggiunti nello scorso anno.

Nazionali	%	Internazionali	%	di cui UE	%	Transiti Diretti	%	Totale Commerciale	%	Aviazione Generale e altri	%	Totale	%
1.369.408	7	1.505.669	4,8	1.019.880	3,3	2.060	-34,6	2.877.137	5,8	4.864	8,9	2.882.001	5,8

Tabella 5.2: Passeggeri gennaio - luglio 2025 (su base 2024)^[56]

Merci Avio	%	Merci Superficie	%	Totale Merci	%	Posta	%	Totale	%
114,5	486,3	187,6	-25,2	302,1	11,8	0	0	302,1	11,8

Tabella 5.3: Cargo gennaio - luglio 2025 (su base 2024)^[56]

Per far fronte a questa crescita, l'aeroporto ha avviato negli ultimi anni un piano di investimenti infrastrutturali pari a 15 milioni di euro. Gli interventi hanno riguardato sia il miglioramento dell'esperienza passeggeri, con nuovi pontili d'imbarco, lounge, parcheggi e sistemi di sicurezza innovativi, sia l'incremento della sostenibilità ambientale, con la realizzazione del più grande impianto fotovoltaico su tetto in un aeroporto italiano e l'introduzione di una flotta di mezzi elettrici, che rappresentano già oltre il 40% del totale. Grazie a questi sviluppi, l'Aeroporto di Torino-Caselle ha consolidato il proprio ruolo di porta di accesso internazionale al Piemonte e al Nord-Ovest italiano, non soltanto come infrastruttura per la mobilità aerea, ma anche come motore di crescita socio-economica per l'intera regione.

5.3.3 Compagnie aeree e principali rotte nazionali e internazionali

Per la stagione Winter 2025/2026, l'Aeroporto di Torino ospiterà un totale di 21 compagnie aeree per quanto riguarda gli operatori di voli di linea, quali: Aer Lingus, Air Baltic, Air Dolomiti, Air France, Air Nostrum, Alitalia Group, British Airways, Dan Air, easyJet, Fly One, Jet2.com, KLM, Lumiwings, Neos, Royal Air Maroc, Ryanair, Scandinavian, Turkish Airlines, Volotea, Vueling Airlines e Wizz Air. A questi si aggiungono gli operatori di voli charter, come Alba Star, Atlantic Airways, Copenhagen Air Taxi, LOT, Norwegian Air e Thomson Airways, che verranno definiti nel periodo invernale.

Figura 5.16: Voli stagione Winter 2025/2026^[58]

Il numero delle tratte servite è incrementato parallelamente con l'aumento dei passeggeri: nel 2023 le rotte dirette invernali sono passate da 36 a 44 in inverno (+22% rispetto al 2018/2019) mentre quelle estive da 31 a 40 (+29% rispetto al 2019). Un ruolo chiave è stato svolto dall'apertura della base Ryanair nel novembre 2021, che ha contribuito in modo decisivo a rafforzare l'accessibilità internazionale grazie all'assegnazione stabile di due aeromobili basati. L'introduzione di circa 18 nuove rotte, 16 delle quali internazionali, e l'innalzamento del numero complessivo a 32 destinazioni, di cui 23 estere e 9 nazionali, con 123 voli settimanali, ha rappresentato una svolta storica per Caselle, ampliando l'offerta di voli low cost e potenziando l'interconnessione del territorio piemontese con il resto d'Europa. La creazione dell'hub ha trasformato Torino da aeroporto a tendenza prevalentemente stagionale, turismo invernale e traffico business, a scalo attivo e competitivo durante tutto l'anno.

L'espansione della connettività continua nel 2024 e nel 2025, segnando l'ingresso di Torino in una nuova fase di sviluppo infrastrutturale e commerciale. Per l'inverno 2024/25 Ryanair ha annunciato un piano storico per Torino, con due aerei basati, 30 rotte tra cui nuove destinazioni quali Crotone, Reggio Calabria e Salerno, e maggiori frequenze su rotte già servite come Barcellona, Bruxelles e Londra-Stansted. Per l'inverno 2025/26, la compagnia irlandese ha programmato l'aggiunta di un terzo aereo basato, portando a 32 le destinazioni disponibili, con due nuove rotte verso Liverpool e Pescara, e un aumento del 30% dei voli settimanali, arrivando a 368.

Un ulteriore salto avviene nell'estate 2024, con l'inaugurazione di un collegamento giornaliero verso Istanbul operato da Turkish Airlines: partito il 10 luglio, il volo offre connessioni con oltre 348 destinazioni in Medio Oriente, Asia e Americhe attraverso lo snodo del vettore turco.

Le principali direttrici di traffico dall'Aeroporto di Torino riflettono un equilibrio tra collegamenti nazionali consolidati e una crescente apertura internazionale. Sul fronte domestico, le rotte più frequentate restano quelle verso Roma e Catania, seguite da Napoli, Palermo e Bari, che rappresentano un asse fondamentale per la mobilità tra Nord e Sud Italia. Negli ultimi anni l'offerta si è arricchita con nuove destinazioni come Comiso, Crotone, Reggio Calabria e Salerno, ampliando la connettività con il Mezzogiorno e contribuendo a diversificare i flussi di passeggeri. A livello internazionale, i mercati di riferimento continuano a essere Gran Bretagna, Spagna e Francia, a cui

seguono Albania, Paesi Bassi, Belgio e Germania. Le mete più richieste sono Barcellona, Londra, Parigi, Monaco e Tirana, ma parallelamente stanno emergendo nuove direttrici in crescita come Lituania, Irlanda, Danimarca e Repubblica Ceca, a testimonianza di un progressivo ampliamento delle aree servite. La novità di maggiore rilievo del 2024 è stato l'avvio del collegamento giornaliero con Istanbul, che ha aperto la strada verso Medio ed Estremo Oriente. Questa evoluzione ha rafforzato il ruolo di Torino-Caselle come hub competitivo su scala europea, capace di sostenere flussi turistici incoming durante tutto l'anno e di contribuire alla crescita socio-economica della regione.

5.4 Il monitoraggio del rumore e la zonizzazione acustica

Il tema del rumore rappresenta uno degli aspetti più rilevanti nella gestione di un'infrastruttura aeroportuale moderna, in quanto incide direttamente sulla qualità della vita delle comunità circostanti e costituisce un parametro fondamentale per garantire la sostenibilità delle operazioni di volo. Nel caso dell'Aeroporto di Torino-Caselle, il monitoraggio e la regolamentazione del rumore si configurano come strumenti essenziali per conciliare lo sviluppo dello scalo con la tutela dell'ambiente e della salute pubblica.

5.4.1 Sistema di monitoraggio acustico

L'Aeroporto di Torino-Caselle è dotato, dall'agosto 2008, di un Sistema di Monitoraggio del Rumore Aeroportuale, istituito in conformità al D.M. del 20 maggio 1999, che permette di analizzare in maniera continua e sistematica i livelli sonori generati dalle operazioni di volo e di valutare il loro impatto sulle aree circostanti. Tale sistema è costituito da otto centraline fisse di rilevamento acustico, distribuite nei comuni limitrofi lungo le principali traiettorie di sorvolo degli aeromobili, e da una postazione mobile, attualmente non operativa. In occasione della riunione del 16 gennaio 2013, la Commissione Aeroportuale ha deliberato la ricollocazione della postazione LIMF09 presso il parco giochi di San Maurizio Canavese, al fine di migliorare la copertura acustica sul lato ovest dell'aeroporto. Nel corso del 2015 tale postazione è stata definitivamente sostituita con la nuova LIMF10, pertanto al presente il sistema di monitoraggio opera con otto postazioni fisse che sono:

Nome postazione	Indirizzo	Comune	Nome descrittivo
LIMF01	Via G. Bosco	San Francesco al Campo	Parco Giochi
LIMF02	Via Ghetto	San Francesco al Campo	Cimitero
LIMF03	Via San Maurizio	San Francesco al Campo	Chiesetta di San Giacomo
LIMF04	Via A. Bona	Caselle Torinese	Pozzo Bona
LIMF05	Strada San Maurizio	Caselle Torinese	Nefoipsometro
LIMF06	Via Prato Fiera	Caselle Torinese	Piezometro dell'acquedotto
LIMF07	Via Davietti Goggia	San Maurizio Canavese	Ex-scuola Malanghero
LIMF09	Via Croce 1/V	San Maurizio Canavese	Vigili del fuoco
LIMF10*	Parco Giochi	San Maurizio Canavese	Parco Giochi

*La postazione LIMF10 sostituisce la LIMF09 a partire dall'anno 2016

Figura 5.17: Ubicazione delle postazioni di misura^[53]



Figura 5.18: Posizione centraline fonometriche al 2025

Le postazioni fonometriche misurano il livello sonoro equivalente ponderato A con passo temporale di un secondo (o inferiore) e costante di tempo Fast. I dati acquisiti vengono marcati temporalmente, trasmessi via GPRS al centro di elaborazione e successivamente processati dal software dedicato, che ha la funzione di correlare le registrazioni acustiche con i tracciati radar dei movimenti aerei così da poter attribuire con precisione ogni evento di rumore al velivolo che lo ha generato. Il sistema di monitoraggio ha diversi obiettivi di rilievo:

- il calcolo degli indici acustici normativi, tra cui il Livello di Valutazione del Rumore Aeroportuale (LVA) previsto dalla legislazione italiana;
- la validazione dei modelli previsionali di impatto acustico ottenuti mediante il software Integrated Noise Model (INM);
- la verifica del rispetto delle procedure antirumore applicate alle operazioni di volo;

- la gestione dei rapporti con la comunità locale, tramite un modulo dedicato alla raccolta e al trattamento dei reclami per disturbo da rumore.

I dati acquisiti vengono resi disponibili sotto forma di report tecnici, a supporto delle attività della Commissione Aeroportuale e per l'elaborazione dei Piani d'Azione ai sensi del art. 4 del D.Lgs. n. 194 del 2005. La gestione e il corretto funzionamento del sistema sono affidati a SAGAT S.p.A., mentre la validazione periodica delle misurazioni è svolta da ARPA Piemonte, che effettua verifiche indipendenti e campagne parallele di monitoraggio acustico.

5.4.2 Piani di classificazione acustica comunale

La normativa italiana sull'inquinamento acustico trova il suo principale riferimento nella Legge del 26 ottobre 1995 n. 447 "Legge Quadro sull'inquinamento acustico", che introduce gli strumenti base della pianificazione acustica. Il successivo DPCM del 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore" stabilisce la suddivisione del territorio comunale in sei classi acustiche in funzione della destinazione d'uso prevalente. A ciascuna classe corrispondono valori limite di emissione, immissione, attenzione e qualità, espressi in termini di Leq (livello sonoro equivalente) e distinti per periodo diurno (06:00-22:00) e notturno (22:00-06:00). L'obiettivo è quello di prevenire, controllare e ridurre l'inquinamento acustico, garantendo al tempo stesso la compatibilità tra le diverse destinazioni d'uso del territorio.

È importante sottolineare che i valori limite assoluti di immissione in funzione della classe acustica valgono solo all'esterno dell'intorno aeroportuale, definito dalla zonizzazione aeroportuale a seconda del contributo di inquinamento acustico prodotto dal traffico aereo. Questo significa che le regole sui limiti di rumore fissate per gli aeroporti non si applicano direttamente all'interno delle aree aeroportuali, ma solo nelle zone esterne, una volta che queste aree sono state definite e delimitate. Le fasce di rispetto, indicate come zone A, B e C, fungono da "cuscinetto" tra l'aeroporto e il territorio circostante. Solo dopo aver stabilito i confini di queste zone diventano effettivamente applicabili i limiti di rumore previsti dalla normativa pertanto all'interno delle fasce si applicano le regole specifiche per gli aeroporti, mentre all'esterno si applicano i limiti generali di legge.

VALORI LIMITE DI IMMISSIONE - Leq in dB(A)		
CLASSI DI DESTINAZIONE D'USO DEL TERRITORIO	TEMPI DI RIFERIMENTO	
	Diurno (06:00-22:00)	Notturno (22:00-06:00)
I - Aree particolarmente protette	50	40
II - Aree prevalentemente residenziali	55	45
III - Aree di tipo misto	60	50
IV - Aree di intensa attività umana	65	55
V - Aree prevalentemente industriali	70	60
VI - Aree esclusivamente industriali	70	70

Figura 5.19: Valori limite di immissione DPCM 14/11/1997^[53]

	DESTINAZIONE D'USO DEL TERRITORIO
CLASSE I	Aree particolarmente protette: rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione (aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc).
CLASSE II	Aree prevalentemente residenziali: rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali.
CLASSE III	Aree di tipo misto: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici.
CLASSE IV	Aree di intensa attività umana: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.
CLASSE V	Aree prevalentemente industriali: rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni.
CLASSE VI	Aree esclusivamente industriali: rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi

Figura 5.20: Classificazione del territorio comunale DPCM 14/11/1997^[53]

5.4.3 Zonizzazione acustica aeroportuale

La zonizzazione acustica rappresenta uno strumento di pianificazione fondamentale per garantire l'equilibrio tra l'operatività aeroportuale e la tutela delle comunità residenti nelle aree circostanti. Questa consiste nella suddivisione del territorio in fasce omogenee all'interno delle quali vengono stabiliti limiti massimi di rumorosità, definiti dalla normativa nazionale. Il D.M. del 31 ottobre 1997 "Metodologia di misura del rumore aeroportuale" ha introdotto l'indicatore acustico LVA (Livello di Valutazione del rumore Aeroportuale) per la misurazione del rumore aeroportuale, calcolato sulla base di tre settimane di maggior traffico aereo nell'arco dell'anno, e definito le procedure di misura e i criteri di valutazione per i tre periodi di riferimento (1 ottobre-31 gennaio, 1 febbraio-31 maggio, 1 giugno-30 settembre). Il LVA è utilizzato per la definizione delle curve isofoniche che delimitano le aree di maggiore esposizione al rumore da traffico aereo e definiscono le cosiddette zone di rispetto nell'intorno aeroportuale, suddivise in A, B e C, entro le quali si applicano specifici limiti di esposizione al rumore.

Nello specifico, all'interno delle curve isofoniche di riferimento valgono i seguenti limiti per il rumore aeroportuale:

- zona A, aree comprese tra 60 e 65 dB(A) di LVA, presentano una classe acustica pari alla terza o superiore, mentre quelle con classe acustica pari alla prima o seconda ricadono all'esterno di tale zona;
- zona B, aree con valori tra 65 e 75 dB(A) di LVA, dove ricadono edifici residenziali già esistenti;
- zona C, aree oltre i 75 dB(A) di LVA, collocate quasi esclusivamente all'interno del sedime aeroportuale.

All'esterno delle tre zone, l'indice LVA non può superare il limite di 60 dB(A). La zonizzazione acustica deve essere approvata dalla Commissione Aeroportuale, la quale è composta da "ENAC,

ENAV, Ministero dell'Ambiente, ARPA Piemonte, Regione Piemonte, Provincia di Torino, Comune di Caselle Torinese, Comune di San Francesco al Campo, Comune di San Maurizio Canavese, Compagnie aeree (AOC) e SAGAT^[59], così da diventare il riferimento ufficiale per la gestione del rumore e per eventuali piani di contenimento o interventi futuri.

Nel caso dell'Aeroporto di Torino-Caselle, la zonizzazione acustica attuale è stata definita attraverso il cosiddetto approccio pianificatorio, che combina i risultati delle curve isofoniche con le destinazioni d'uso del territorio stabilite dai piani regolatori e di classificazione acustica comunali, ed è stata approvata con voto unanime dalla Commissione Aeroportuale il 16 gennaio 2013. Queste curve consentono di visualizzare graficamente l'impatto del rumore prodotto da un determinato scenario di traffico aereo e la loro costruzione si basa su modelli previsionali, tra cui il software INM adottato da SAGAT S.p.A. e riconosciuto da ENAC come strumento di riferimento. La zonizzazione è riportata nell'immagine seguente, dove le aree evidenziate in verde sono la zona A, in giallo la zona B e in rosso la zona C, ed è possibile osservare come le zone A e B interessano un'area limitata del territorio dei comuni limitrofi, mentre la Zona C è del tutto confinata all'interno del sedime aeroportuale.

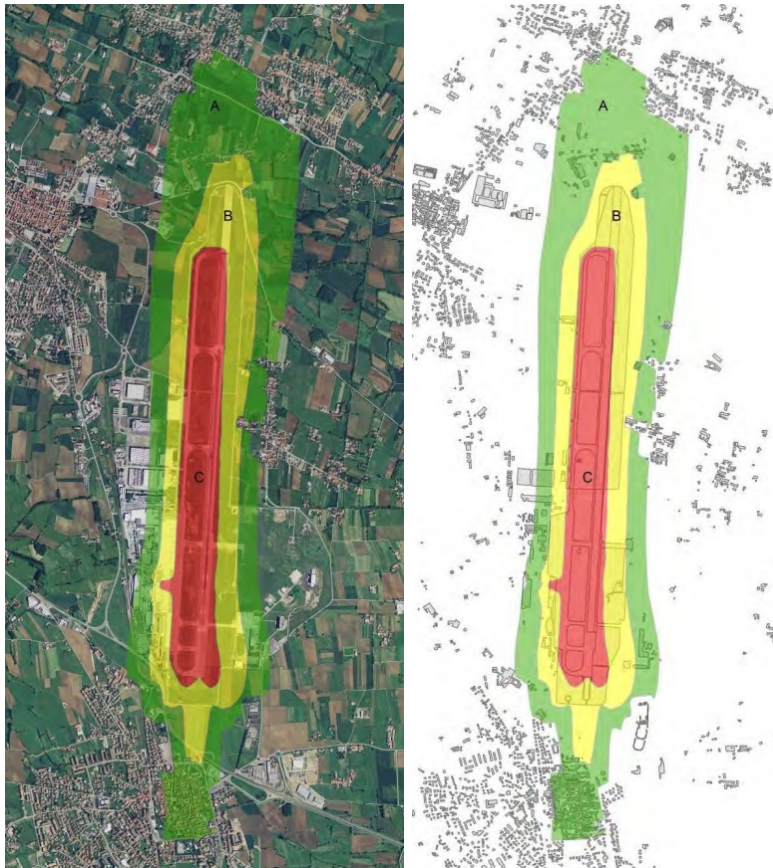


Figura 5.21: Zonizzazione Aeroportuale^[53]

La zonizzazione acustica viene verificata e aggiornata attraverso il Sistema di Monitoraggio del Rumore Aeroportuale, così da garantire un controllo costante dei limiti e una base oggettiva per la pianificazione territoriale. Infatti questo strumento è utilizzato sia per descrivere l'impatto acustico delle operazioni di volo, sia per orientare le scelte urbanistiche ed evitare nuovi insediamenti

residenziali o attività sensibili in aree esposte al rumore. Ai sensi della normativa vigente, i Piani di classificazione acustica dei Comuni devono essere aggiornati per garantire che le aree vicine all'aeroporto abbiano una classe di rumore compatibile con quello effettivamente presente. Secondo le verifiche svolte da ARPA Piemonte, i livelli di rumore previsti nella zona A di rispetto aeroportuale corrispondono a valori di immissione assoluta che possono essere assimilati a una classe IV nei piani comunali, pertanto tali piani devono essere aggiornati per recepire la zonizzazione aeroportuale approvata il 16 gennaio 2013.

5.4.4 Livelli di rumorosità aeroportuale in real-time

La possibilità di consultare in tempo reale i dati acustici registrati dal Sistema di Monitoraggio del Rumore Aeroportuale al momento non è resa pubblica ma è disponibile attraverso la piattaforma SARA (Sistema di Acquisizione del Rumore Aeroportuale) sviluppata da Softech, che rappresenta un'interfaccia di accesso e di visualizzazione dei dati fonometrici. Softech è una realtà imprenditoriale italiana nata nel 1991 nel settore autostradale e aeroportuale, con lo scopo di "supervisionare, monitorare e misurare tutto ciò che è in movimento e gli effetti che ne derivano: rumore, inquinamento, traffico e molto altro"^[60]. Tra i loro prodotti più affermati a livello nazionale e internazionale emerge SARA, nato nel 1999, un sistema modulare e scalabile per il monitoraggio e l'analisi ambientale in ambito aeroportuale e urbano. Questo sistema è in grado di raccogliere in modo continuo dati acustici e relativi alla qualità dell'aria dalle centraline di monitoraggio, elaborarli e correlare le misure con le attività aeronautiche.

Nel contesto di Torino-Caselle, la migrazione alla piattaforma SARA è stata accompagnata da specifiche attività di *revamping*, necessarie per consentire alle esistenti postazioni di misura, che costituiscono il sistema di monitoraggio, di interfacciarsi con il nuovo sistema di gestione SARA. La piattaforma consente di visualizzare su mappa interattiva la posizione delle centraline distribuite sul territorio circostante lo scalo, fornendo per ciascuna di esse l'andamento temporale dei livelli di pressione sonora rilevati. Attualmente il modulo di interfaccia tecnica è accessibile solo dietro credenziali, ma risulta evidente la sua funzione di supporto oggettivo per le attività di controllo e di pianificazione della Commissione Aeroportuale, oltre che di verifica delle procedure antirumore.

5.4.5 Procedure antirumore e restrizioni operative

Presso l'Aeroporto di Torino-Caselle sono in vigore specifiche procedure antirumore e misure di contenimento e abbattimento del rumore prodotto dagli aeromobili, finalizzate a contenere l'impatto acustico sulle aree residenziali circostanti. Queste procedure e restrizioni sono riportate nel provvedimento ENAC n. 336232/32 del 29/04/1998 e consistono in:

- la pista consente un utilizzo bidirezionale, tuttavia la RWY 36 è usata come pista preferenziale per decolli e atterraggi limitando l'utilizzo della RWY 18, così da ridurre il rumore al di sopra dei sobborghi situati a Sud dell'aeroporto. I piloti possono richiedere l'autorizzazione ad usare la pista 18 per il decollo o per l'atterraggio solo per particolari esigenze tecniche, di sicurezza o in caso di condizioni meteorologiche avverse;
- le procedure di decollo e salita iniziale SID (*Standard Instrument Departure*) per pista 36 (SID36) e pista 18 (SID18) sono limitate dalla configurazione del territorio e l'assetto urbanistico circostante, per cui l'aeromobile mantiene inizialmente la direzione della pista e poi raggiunti i 2500 piedi effettua una virata a destra verso Est;
- restrizioni sui voli notturni, pertanto nel periodo 23:00-06:00 i decolli e gli atterraggi sono vietati ad eccezione di sei voli schedati, voli di linea soggetti a ritardi, voli umanitari, di emergenza o di soccorso, mentre i voli di addestramento notturni sono totalmente proibiti;

- restrizioni nell'utilizzo dell'inversione di spinta (*reverse thrust*), che è consentito solo al minimo, mentre potenze superiori sono ammesse esclusivamente per motivi di sicurezza. Gli aeromobili in atterraggio notturno devono utilizzare l'intera lunghezza della pista, eccetto quelli con caratteristiche di arresto ridotto che non necessitano di reverse;
- restrizioni nell'uso dell'APU, che può essere acceso 5 minuti prima dell'orario di partenza per avviare i motori;
- restrizioni nello svolgimento delle prove motori, proibite nelle fasce orarie 23:00-06:00 e 14:00-16:00, mentre sul piazzale sono consentite solo prove al minimo.

Accanto alle misure di carattere operativo e regolamentare, il gestore SAGAT S.p.A. ha introdotto una politica di Incentivi di Sviluppo Traffico (IST), ossia contributi economici destinati ai vettori che si impegnano a sviluppare le proprie attività presso l'Aeroporto di Torino nel rispetto di determinati requisiti. Un elemento di particolare interesse per quanto riguarda l'impatto acustico è che l'erogazione di tali incentivi tiene conto anche del “tipo di aeromobile utilizzato (anche in considerazione della performance ambientale in termini di rumore, consumo di combustibile e ed emissioni)”^[61]. In questo modo, i vettori che adottano nella propria flotta aeromobili di nuova generazione e caratterizzati da minori livelli di rumorosità possono beneficiare di condizioni più favorevoli, con un duplice risultato: da un lato, incentivare la modernizzazione della flotta operante su Torino, dall'altro ridurre progressivamente l'impatto del rumore sulle comunità circostanti l'aeroporto.

Capitolo 6

Dati a disposizione e analisi dei risultati

Il presente capitolo illustra i dataset che sono stati utilizzati nel lavoro di ricerca e i principali risultati ottenuti dall'analisi integrata delle informazioni. L'obiettivo principale è quello di fornire una panoramica completa dei livelli di rumore aeroportuale in relazione ai movimenti aerei, ai dati acustici, alle condizioni meteorologiche e alle caratteristiche dei velivoli, sia attraverso analisi statistiche che rappresentazioni grafiche degli andamenti più significativi.

La descrizione dei dataset a disposizione permette di comprendere l'origine dei dati, le loro caratteristiche principali e la loro rilevanza ai fini dello studio. Successivamente, è stata descritta la costruzione del database, in particolare i software utilizzati, le strategie di importazione e di integrazione dei dati, nonché la struttura del database MySQL e gli script Python sviluppati, in modo da gestire la correlazione di una grande quantità di dati eterogenei. Infine, vengono presentati i risultati dell'analisi, evidenziando l'evoluzione della *fleet mix*, l'andamento temporale dei livelli sonori, il confronto tra velivoli appartenenti alla stessa classe ICAO o a classi differenti, nonché l'influenza delle condizioni meteorologiche e della tipologia di motore aeronautico che equipaggia ciascun velivolo.

6.1 L'origine e le caratteristiche dei dataset

L'analisi condotta in questo lavoro di tesi si fonda sull'integrazione di differenti tipologie di dati, ciascuna proveniente da sistemi specifici, che insieme compongono il dataset complessivo oggetto di studio. Il presente capitolo descrive le fonti e le caratteristiche dei dati che costituiscono il dataset analizzato nel biennio 2023-2024: la scelta di questo intervallo temporale consente di disporre di un campione sufficientemente esteso e aggiornato, in grado di rappresentare in modo realistico le condizioni operative e ambientali dell'Aeroporto di Torino-Caselle.

Per comprendere a fondo la metodologia applicata e la validità dei risultati, è fondamentale descrivere in maniera chiara le fonti dei dati e le loro caratteristiche. Le informazioni raccolte provengono da quattro ambiti principali:

- dati acustici, registrati tramite le centraline di monitoraggio distribuite sul territorio aeroportuale, per la valutazione dell'impatto del rumore;
- dati radar, derivanti dai sistemi di sorveglianza del traffico aereo, per la localizzazione e la traiettoria dei velivoli in movimento;

- dati meteorologici, rilevati dalle stazioni a terra, per comprendere il ruolo delle condizioni ambientali nella propagazione del suono;
- dati relativi ai velivoli, estratti dal database di scalo, per caratterizzare le singole operazioni di volo.

Per ciascuna tipologia di dato vengono illustrati la provenienza, le modalità di acquisizione, il formato e i criteri di pulizia ed elaborazione adottati. La descrizione delle diverse fonti non ha solo lo scopo di chiarire l'origine dei dati utilizzati, ma anche di evidenziare come la loro integrazione consenta un'analisi multidimensionale, in grado di mettere in relazione aspetti acustici, operativi e ambientali in un quadro coerente e rappresentativo della complessità del contesto aeroportuale.

6.1.1 Dati acustici

Origine dei dati acustici

I dati acustici utilizzati in questo lavoro sono stati messi a disposizione dal provider del servizio di gestione e manutenzione della rete fonometrica, che ha predisposto un archivio contenente le registrazioni provenienti dalle centraline acustiche installate attorno all'Aeroporto di Torino-Caselle. L'archivio, in formato tar, include i dati grezzi relativi agli anni 2023 e 2024, organizzati in due principali cartelle:

- *dayraw*, che contiene i file con i dati acustici grezzi;
- *slaeq*, che contiene file più compatti e di più immediata utilizzazione, che riportano i valori di *Short LAeq* in maniera continua nel tempo.

Nel dettaglio, i file di tipo *dayraw* sono in formato ASCII con campi separati da spazi. Ogni file è composto da una sezione di commenti, righe introdotte da "#", e da una sezione di dati numerici. L'intestazione specifica l'ordine dei campi, che va letto dalla prima riga, e include:

- **yyMMdd_HHmmss**, cioè il timestamp;
- **LAeqs**, che sta per *Short-term LAeq* ed è il livello equivalente su intervallo breve;
- **LAeq**, il livello equivalente ovvero il valore medio di riferimento;
- **LAfp**, il livello di *Fast Peak*;
- **LAip**, il livello di *Impulse Peak*.

Un estratto di esempio è riportato di seguito:

```
#yyMMdd_HHmmss LAeqs LAeq LAfp LAip
#
#SLM_START 250406_000057 1743890457
#type:HD2110 mode:profiles port:serial
#
250406_000000 46.1 64.2 47.8 59.8 47.8
250406_000001 44.3 64.2 45.1 56.9 45.1
250406_000002 42.0 64.2 42.7 54.0 42.7
```

I dati di tipo *slaeq* sono anch'essi in formato ASCII con valori separati da spazi, ma riportano un set più snello di informazioni, strutturato in questo modo:

- **dd mm yyyy**, la data;

- **HH:MM:SS**, l'orario;
- **LAeq**, il livello equivalente ma su intervallo breve quindi *Short-term LAeq* (da cui deriva il nome *slaeq*).

Un esempio di contenuto è il seguente:

```
#dd mm yyyy HH:MM:SS LAeq
03 04 2025 00:00:00 52.1
03 04 2025 00:00:01 48.9
03 04 2025 00:00:02 46.2
```

Questo formato, più leggero rispetto a quello *dayraw*, è stato pensato per semplificare le procedure di importazione ed elaborazione dei dati, riducendo la ridondanza di informazioni e rendendo più agevole il lavoro di analisi. Per tale ragione, la cartella *slaeq* è stata assunta come riferimento principale per lo sviluppo delle elaborazioni acustiche.

Entrambi le *directory* presentano una struttura organizzata in otto sottocartelle, corrispondenti alle otto centraline di monitoraggio attive (LIMF01, LIMF02, LIMF03, LIMF04, LIMF05, LIMF06, LIMF07 e LIMF10), e all'interno di ciascuna sottocartella sono disponibili i file giornalieri, uno per ogni giorno di registrazione. La sequenza dei file, tuttavia, non risulta sempre completa: in alcuni casi mancano intere giornate, mentre in altri i file presenti non contengono le attese 86.400 righe, corrispondenti al numero di secondi in un giorno, condizioni verosimilmente riconducibili a interruzioni o malfunzionamenti nei sistemi di registrazione. Per questa ragione è stata condotta una specifica verifica di completezza dei dati a disposizione esclusivamente sulla cartella *slaeq*, scelta come base per lo sviluppo delle analisi successive.

Per questo scopo è stato sviluppato un codice Python, che effettua una verifica sistematica sulla completezza dei dati. In particolare, il programma controlla che in ciascuna sottocartella relativa alle diverse centraline siano presenti 731 file, corrispondenti all'intervallo temporale compreso tra il 01/01/2023 e il 31/12/2024, tenendo conto che il 2024 è anno bisestile. Successivamente, per ogni giornata disponibile, il codice analizza se i dati coprano l'intero arco giornaliero, ossia dalle 00:00:00 alle 23:59:59, individuando così eventuali assenze parziali.

Nonostante ciò, il dataset raccolto è stato ritenuto sufficientemente rappresentativo per l'obiettivo dell'analisi: la quantità di informazioni disponibili consente infatti di caratterizzare in modo attendibile l'andamento del rumore aeroportuale e di sviluppare correlazioni significative con i dati radar e meteorologici.

Tipologia di fonometri e microfoni

Ogni postazione del sistema di monitoraggio acustico è equipaggiata con fonometri di classe 1, conformi alla normativa IEC 61672-1:2002, associati a microfoni a condensatore da 1/2 pollice di diametro. La strumentazione è principalmente costituita da fonometri HD2010UC o HD2110 della Delta OHM S.r.l., che vengono abbinati a microfoni 377B02 della PCB Piezotronics o MK223 della Microtech Gefell, in grado di garantire un'ampia dinamica di misura e un'elevata fedeltà nella registrazione del segnale acustico.

I fonometri HD2010UC e HD2110 sono strumenti pensati per il monitoraggio continuo e l'analisi di eventi acustici transitori, pertanto trovano applicazione nelle valutazioni del livello di rumore ambientale. Presentano una dinamica diversa, che consiste nell'intervallo di livelli sonori che lo strumento è in grado di misurare con precisione, dal suono più debole a quello più forte: l'HD2010UC ha una dinamica da 30 dBA fino a 143 dB Peak, mentre l'HD2110 da 23 dBA a 143 dB Peak. Questi valori garantiscono che il fonometro possa rilevare sia rumori di basso livello ambientale sia picchi acustici transitori in modo accurato, senza perdere informazioni o distorcere il segnale. I due fonometri differiscono anche per quanto riguarda il campo lineare, che rappresenta

l'intervallo di livelli sonori in cui il fonometro risponde in modo proporzionale al suono reale, garantendo che ogni aumento della pressione sonora corrisponda a un incremento proporzionale nella misura. In particolare l'HD2010UC ha un campo lineare di 80 dB, mentre l'HD2110 estende il campo lineare fino a 110 dB. Al di fuori di questo intervallo, la misura potrebbe essere meno precisa o richiedere compensazioni elettroniche del fonometro.

Per quanto riguarda la frequenza di campionamento di un fonometro, questa indica quante volte al secondo lo strumento misura e registra il segnale acustico per trasformarlo in dati digitali. Un fonometro registra il suono come un segnale elettrico continuo proveniente dal microfono e per poterlo salvare in formato digitale, il segnale deve essere campionato, cioè misurato a intervalli regolari. La frequenza di campionamento indica quindi quante volte al secondo viene effettuata questa misura e, nel caso dei fonometri HD2010UC e HD2110 della Delta OHM, lo strumento funziona come analizzatore statistico, campionando il segnale sonoro 8 volte al secondo con ponderazione A e costante FAST. Questo significa che ogni secondo il fonometro acquisisce otto valori del livello sonoro ponderato in frequenza secondo il modello A, adatto alla percezione umana, e li elabora con una velocità di risposta rapida che segue le variazioni sonore.

I microfoni PCB 377B02 e MK223 sono entrambi microfoni a condensatore, strumenti sensibili che trasformano le variazioni di pressione sonora in segnali elettrici attraverso una capsula che funziona come un condensatore elettrico: il suono fa vibrare una membrana sottile di fronte a una piastra fissa, questo cambia la capacità del condensatore e genera un segnale elettrico proporzionale alla pressione sonora. Questo tipo di microfono è particolarmente adatto per registrazioni di alta qualità, grazie alla sua elevata fedeltà e sensibilità. I due microfoni hanno entrambi una capsula da 1/2" e sensibilità di 50 mV/Pa ma presentano una risposta in frequenza diversa, da 3,15 Hz a 20 kHz per PCB 377B02 e da 3,5 Hz a 20 kHz per MK223, e un campo dinamico simile, rispettivamente fino a 147 dB e fino a 146 dB.

Tutti i dispositivi sono sottoposti a tarature periodiche presso laboratori SIT accreditati, ora chiamati LAT, che emettono certificati di taratura. Nel caso dei fonometri in questione, i certificati sono emessi dal Centro di Taratura LAT N° 124, riconosciuto da ACCREDIA, come allegato alle schede monografiche delle postazioni. L'importanza di questi certificati è quella di attestare che il fonometro ha superato con esito positivo le prove periodiche di classe 1 secondo la IEC 61672-3:2006, per le condizioni ambientali nelle quali sono state eseguite. La prova pubblica, effettuata da un'organizzazione indipendente secondo IEC 61672-2:2003, permette di dimostrare che il modello è completamente conforme alle prescrizioni della IEC 61672-1:2002, confermando la conformità alla classe 1.

6.1.2 Dati radar

Origine dei dati radar

I dati radar utilizzati provengono da ENAV S.p.A., la società che gestisce il traffico aereo civile in Italia. Si tratta di tracciati radar associati ai voli in arrivo e in partenza dall'Aeroporto di Torino-Caselle (LIMF), elaborati dai sistemi di sorveglianza radar installati a servizio dell'aeroporto e forniti in formato testuale. ENAV gestisce una rete nazionale di radar che consente la sorveglianza continua dello spazio aereo italiano e la gestione sicura dei voli, in particolare "su tutto il territorio nazionale si serve di 9 radar primari e 12 radar secondari per il controllo del traffico in rotta, 18 radar primari e 18 secondari per il controllo delle fasi di avvicinamento. Per il controllo sulla superficie aeroportuale in condizioni di bassa visibilità (di notte e con la nebbia) sono presenti 10 radar di terra e 3 sistemi di multilaterazione"^[62].

I radar primari e radar secondari svolgono ruoli complementari nel monitoraggio aereo, con il primario che fornisce dati di base e il secondario che arricchisce queste informazioni con dettagli aggiuntivi. Il radar primario (PSR *Primary Surveillance Radar*) emette segnali elettromagnetici verso un bersaglio e analizza i segnali da esso riflessi per determinare la posizione e la velocità

degli aeromobili. Può essere di tipo radar in Banda L, che prevede una copertura a lungo raggio (fino a 200 NM, circa 360 km) e viene utilizzato per il controllo in rotta, o di tipo radar in Banda S, che invece ha una copertura a corto raggio (fino a 60 NM, circa 110 km) ed è localizzato in prossimità degli aeroporti, molto usato per la fase di avvicinamento. Il radar secondario (SSR *Secondary Surveillance Radar*) è costituito da un interrogatore a terra che invia un segnale verso l'aeromobile e quest'ultimo ha a bordo un trasponder che, una volta ricevuto il segnale radar, risponde trasmettendo un segnale di risposta codificato con informazioni aggiuntive. L'SSR è normalmente accoppiato al PSR cioè le due antenne ruotano in sincronia, integrando le rispettive informazioni così da poter avere sullo schermo radar tutti i dati di posizione, quota, velocità e piano di volo di ciascun aeromobile.

Oltre ai radar primari e secondari utilizzati per la sorveglianza del traffico aereo in rotta e in avvicinamento, l'Aeroporto di Torino-Caselle è dotato anche di un radar di superficie (SMR *Surface Movement Radar*) impiegato per monitorare i movimenti al suolo dei velivoli e dei veicoli operativi, fornendo ai controllori di torre una rappresentazione dettagliata della situazione sul piazzale e lungo le vie di rullaggio. Recentemente, l'SMR è stato oggetto di un programma di ammodernamento volto a migliorarne l'affidabilità e l'integrazione con i sistemi più moderni di gestione del traffico aeroportuale. In parallelo è stato introdotto anche un sistema di multilaterazione (MLAT), integrato nell'A-SMGCS (*Advanced Surface Movement Guidance and Control System*), che sfrutta la presenza di trasponder a bordo degli aeromobili e di sensori distribuiti nell'area aeroportuale per calcolare con elevata precisione la posizione dei mezzi al suolo, anche in condizioni di visibilità ridotta.

L'integrazione tra SMR e multilaterazione rappresenta un importante passo avanti verso una gestione sempre più sicura ed efficiente del traffico a terra, riducendo i rischi di incursioni in pista e ottimizzando i flussi operativi. Dal punto di vista di questa ricerca, tali sistemi assumono ulteriore interesse perché i dati posizionali dettagliati che essi forniscono potrebbero, in prospettiva futura, essere impiegati anche per lo studio del rumore aeroportuale a terra, consentendo di correlare in maniera diretta le traiettorie dei velivoli durante rullaggio con le misurazioni acustiche delle centraline di monitoraggio.

Estrapolazione dati

Le informazioni trasmesse dall'ENAV sono salvate nella *directory* RADAR, che presenta una struttura organizzata in sottocartelle, una per ogni anno, all'interno delle quali sono disponibili i file giornalieri, uno per ogni giorno di registrazione. La sequenza dei file, tuttavia, non risulta perfettamente completa: dovrebbero essere presenti 731 file, corrispondenti all'intervallo temporale compreso tra il 01/01/2023 e il 31/12/2024, ma ne risultano solo 725, errore dovuto probabilmente a interruzioni del sistema di salvataggio. Ogni file contiene più righe, ciascuna delle quali descrive la traiettoria di un singolo volo, ma la struttura è compatta e non direttamente leggibile senza una fase di parsing: le informazioni sono codificate in stringhe con campi a lunghezza fissa e una sequenza di ping, che rappresentano i punti rilevati dal radar lungo la traiettoria.

Un esempio di riga è il seguente:

20230101052043DLA4HP	E195LIMFEDDF	-13	60	16052043	-13	71
18052047	-13	81	0052051	-13	92	21052055
23052058	-12	113	25052102	-12	123	26052106
28052110	-11	144	29052114	-11	155	30052118
31052121	-10	178	32052125	-10	189	33052129
34052133	-9	213	35052137	-9	226	37052140
39052144	-7	252	40052148			

Per rendere utilizzabili questi dati, è stato necessario sviluppare uno script in Python che:

1. legge le righe e suddivide i campi principali, quali data e orario, callsign, modello di aeromobile, aeroporto di provenienza e destinazione;
2. analizza la stringa dei ping, calcolando per ciascun punto le coordinate metriche, la quota e il tempo in UTC;
3. converte le coordinate planari in latitudine/longitudine a partire da un punto di origine noto, cioè l'ARP;
4. associa a ciascun ping la postazione di misura acustica più vicina, così da permettere correlazioni dirette tra traiettoria radar e centraline di monitoraggio.

Considerando l'esempio precedente, è possibile estrarre:

- timestamp iniziale, 20230101052043 diventa il 1° gennaio 2023, ore 05:20:43 UTC, che identifica l'istante in cui il volo viene registrato;
- callsign, DLA4HP, identificativo univoco del volo;
- tipo di aeromobile, E195, che è il codice ICAO del modello;
- aeroporto di origine e destinazione, LIMF è Torino-Caselle mentre EDDF è Francoforte;
- sequenza di ping radar, ciascuno composto da tre valori:
 - x e y, coordinate planari in 64esimi di miglia nautiche convertite successivamente in metri e georeferenziate in latitudine e longitudine tramite calcoli geodetici;
 - z, quota in centinaia di piedi, convertita in metri;
 - dt, timestamp relativa all'ennesima rilevazione in formato HHMMSS, che permette di ricostruire la traiettoria con risoluzione temporale al secondo.

Il risultato è il seguente:

`Callsign;Model;From;To;timestamp;posizione;quota[m];postazione_vicina;distanza[m]`

`DLA4HP;E195;LIMF;EDDF;2023-01-01 05:20:43;45.211256157109375,7.651017883346879;488;
LIMF07;993`

Questa elaborazione consente di trasformare un file radar grezzo in una traiettoria georeferenziata e sincronizzata temporalmente, in cui per ogni posizione e istante viene individuata la centralina di monitoraggio acustico più vicina. Il procedimento seguito consiste nel calcolare per ciascun ping radar la distanza con la centralina acustica più vicina, sfruttando una funzione geodetica (`geo_dist`) che restituisce la distanza orizzontale in metri, cioè la distanza dalla proiezione del velivolo in verticale sul piano terrestre, senza considerare l'altezza per ottenere la distanza in linea d'aria. Successivamente, ogni distanza calcolata viene confrontata con quella minima individuata fino a quel momento: se la nuova distanza è più piccola, oppure se si tratta della prima distanza calcolata, la funzione aggiorna il valore della distanza minima e memorizza l'identificativo della relativa centralina. Al termine di questo ciclo, la funzione individua la centralina più vicina a ciascun ping radar, restituendone l'ID e la distanza in metri. I risultati vengono salvati nella cartella "Risultati plot con radar_read" sotto forma di file "plot_LIMF202XXXXX.OUT" distinti per ognuna delle 725 giornate analizzate, contenenti i campi sopra descritti.

6.1.3 Dati meteo

Origine dei dati meteo

I dati meteorologici utilizzati nel presente lavoro provengono dall'archivio mantenuto dall'*Iowa Environmental Mesonet* (IEM), sviluppato presso l'*Iowa State University* dal Dipartimento di Agronomia. L'IEM raccoglie, archivia e rende disponibili osservazioni meteorologiche provenienti da una rete mondiale di stazioni aeroportuali automatiche, con l'obiettivo di fornire un accesso centralizzato a dati utili per la ricerca e la gestione aeroportuale. Le osservazioni derivano principalmente da sistemi ASOS (*Automated Surface Observing System*) e AWOS (*Automated Weather Observing System*), trasmesse secondo lo standard internazionale METAR (*METeoro logical Aerodrome Report*), che costituisce il formato di riferimento per la diffusione delle informazioni meteorologiche aeronautiche.

Nel caso specifico, sono stati selezionati i dati relativi alla stazione LIMF Torino, che raccoglie dati dal 1964, per il biennio 2023-2024, disponibili tramite la rete Italy ASOS. Ciò garantisce l'affidabilità e l'omogeneità delle informazioni, trattandosi di osservazioni standardizzate e utilizzate quotidianamente per la navigazione aerea. Infatti i sistemi ASOS, sviluppati negli Stati Uniti attraverso la collaborazione tra *National Weather Service* (NWS), *Federal Aviation Administration* (FAA) e *Department of Defense* (DoD), costituiscono la rete principale di osservazioni meteorologiche aeroportuali e sono progettati per fornire misure continue e affidabili 24 ore su 24, includendo diversi parametri meteorologici. L'AWOS, invece, rappresenta una versione meno complessa e generalmente adottata negli aeroporti di dimensioni minori: anche questi sistemi sono certificati FAA, ma forniscono parametri essenziali senza includere tipo e intensità delle precipitazioni e fattori che ostacolano la visibilità, quali nebbia e foschia.

In questo modo è stato possibile ottenere un insieme completo di variabili atmosferiche rilevanti per il monitoraggio acustico ambientale. Ogni record dei dati meteo include un identificativo della stazione (**station**) e un timestamp dell'osservazione (**valid**), insieme a misure standard di temperatura dell'aria (**tmpf**, in Fahrenheit) e punto di rugiada (**dwpf**, in Fahrenheit), entrambe registrate tipicamente a 2 metri di altezza. Vengono inoltre riportati i valori di umidità relativa (**relh**, %), la direzione del vento (**drct**, in gradi rispetto al nord vero) e la velocità del vento (**sknt**, in nodi). Alcune variabili aggiuntive includono le precipitazioni orarie (**p01i**, in pollici), la pressione altimetrica (**alti**, in pollici) e la pressione al livello del mare (**mslp**, in millibar), nonché la visibilità (**vsby**, in miglia) e le raffiche di vento (**gust**, in nodi). La copertura nuvolosa è registrata su quattro livelli (**skyc1-skyc4**) con le rispettive altitudini (**skyl1-skyl4**, in piedi), mentre i codici meteorologici (**wxcodes**) indicano fenomeni presenti al momento dell'osservazione. Per valutazioni di percezione termica vengono riportate le temperature apparenti (**feel**, Wind Chill o Heat Index, in Fahrenheit), mentre l'accumulo di ghiaccio è rilevato su intervalli di 1, 3 e 6 ore (**ice_accretion_1hr/3hr/6hr**, in pollici). Infine, vengono forniti dati sul picco di raffica del vento (**peak_wind_gust**), la sua direzione (**peak_wind_drct**) e l'orario di occorrenza (**peak_wind_time**), oltre all'osservazione meteorologica grezza in formato METAR (**metar**). Esempio:

```
station,valid,lon,lat,elevation,tmpf,dwpf,relh,drct,sknt,p01i,alti,mslp,vsby,gust,
skyc1,skyc2,skyc3,skyc4,skyl1,skyl2,skyl3,skyl4,wxcodes,ice_accretion_1hr,
ice_accretion_3hr,ice_accretion_6hr,peak_wind_gust,peak_wind_drct,peak_wind_time,
feel,metar,snowdepth
```

```
LIMF,2023-01-01 00:20,7.6494,45.2025,287.00,44.60,39.20,81.20,230.00,3.00,0.00,
30.47,M,4.35,M,SCT,M,M,3000.00,M,M,M,M,M,M,M,M,43.09,
LIMF 010020Z 23003KT 7000 SCT030 07/04 Q1032,M
```

N.B. "The value "M" represents either value that was reported as missing or a value that was set to missing after meeting some general quality control check, or a value that was never reported

by the sensor. The METAR format makes it difficult to determine which of the three cases may have happened.”^[63]

Elaborazione dati

Per rendere i dati meteorologici coerenti e utilizzabili nelle analisi, è stato sviluppato uno script Python che esegue una serie di conversioni e filtri:

- le temperature dell’aria e del punto di rugiada, originariamente espresse in gradi Fahrenheit, sono state convertite in gradi Celsius;
- la velocità e le raffiche del vento, fornite in nodi, sono state trasformate in metri al secondo;
- le precipitazioni e la pressione altimetrica, riportate in pollici, sono state convertite in millimetri;
- variabili come la direzione del vento e l’umidità relativa sono state mantenute, mentre altre colonne non essenziali sono state eliminate.

Il risultato è un dataset ridotto e più maneggevole, contenente solo le variabili di maggiore interesse quali stazione, timestamp, temperatura dell’aria, punto di rugiada, umidità relativa, direzione del vento e velocità del vento, espresse in unità di misura coerenti con il sistema internazionale. Esempio:

```
station,valid,tmpc,dwpc,relh,drct,vento_ms  
LIMF,2023-01-01 00:20:00,7.000000000000001,4.000000000000002,81.20,230.00,1.54332
```

6.1.4 Dati velivoli

Origine dei dati velivoli

I dati relativi ai velivoli sono stati acquisiti tramite il sistema di scalo, che costituisce lo strumento gestionale interno dell’Ufficio di Coordinamento Voli UCV presso l’Aeroporto di Torino-Caselle. Gli operatori dell’UCV inseriscono i dettagli dei velivoli su questa piattaforma informatica, in uso presso lo scalo per la raccolta, l’elaborazione e la distribuzione delle informazioni operative, e di notte vengono trasferiti sul software Oracle Business Intelligence (Oracle BI). All’interno di questo database è disponibile lo storico di tutti i movimenti aerei a partire dal 2015 fino ad oggi, con esclusione dei voli militari, e riguarda esclusivamente i voli civili a cui è stato effettivamente assegnato un parcheggio, escludendo quindi operazioni come i “touch and go”. Il sistema Oracle BI raccoglie i dati provenienti dal coordinamento voli e li rende disponibili in forma interrogabile, consentendo di filtrare e selezionare specifiche categorie di informazioni a seconda delle esigenze dell’analisi.

Per il presente studio, limitato al biennio 2023-2024, sono stati estratti i seguenti campi principali:

- **DATA**, la data del movimento aereo registrato;
- **CALL_SIGN**, l’indicativo di chiamata assegnato al volo, utilizzato nelle comunicazioni radio;
- **FLIGHT_CODE**, il codice commerciale del volo, che lega l’operazione alla compagnia aerea e alla rotta prevista;
- **AIRCRAFT_ICAO_MODEL**, il codice ICAO a quattro lettere che identifica in modo univoco il modello di aeromobile;

- **AIRCRAFT_MATRICULA**, la marca di nazionalità e di immatricolazione dell'aeromobile rappresentata da una stringa alfanumerica, utile per distinguere i singoli velivoli anche all'interno dello stesso modello;
- **NOISE**, la classe di certificazione acustica dell'aeromobile, definita in base agli standard ICAO *Annex 16* Volume I;
- **ARW**, la pista utilizzata per il decollo o l'atterraggio;
- **NATURE_CODE**, la natura del volo che può essere una partenza e un arrivo.

Esempio:

```
DATA,CALL_SIGN,FLIGHT_CODE,AIRCRAFT_ICAO_MODEL,AIRCRAFT_MATRICULA,NOISE,ARW,NATURE_CODE
2023-01-01,AFR37HN,AF/AFR 01102,E190,FHBL,3,36,A
2023-01-01,AFR57NZ,AF/AFR 01502,E170,FHBXC,3,36,A
2023-01-01,AFR65QP,AF/AFR 01103,E190,FHBL,3,36,P
2023-01-01,ANE19GY,YW/ANE 08770,CRJX,ECLJ,4,36,A
```

Oltre al sistema Oracle BI, l'Aeroporto di Torino-Caselle dispone anche di un'antenna ADS-B che, attraverso il sistema di trilaterazione integrato nell'A-SMGCS, consente di acquisire dati posizionali dettagliati di tutti gli oggetti, velivoli e veicoli, equipaggiati con transponder presenti sul sedime aeroportuale. Tali informazioni potrebbero, in prospettiva futura, essere impiegate anche per lo studio del traffico aeroportuale a terra, in particolare potrebbero permettere di correlare in maniera diretta le traiettorie dei velivoli nelle fasi di rullaggio, decollo e atterraggio con aspetti operativi di interesse, come la distanza percorsa prima dell'arresto in fase di atterraggio, la frequenza di utilizzo dei diversi raccordi di uscita e la distribuzione degli stand maggiormente impiegati.

Differenza tra ADS-B e multilaterazione

Dal 2023 l'Aeroporto di Torino-Caselle dispone di 14 antenne sul sedime aeroportuale che permettono di elaborare i segnali ricevuti con il principio della triangolazione classica, stabilire la posizione del velivolo e associare l'identità del velivolo stesso, resa disponibile dalle trasmissioni ADS-B.

L'integrazione tra ADS-B e multilaterazione (MLAT) rappresenta un elemento fondamentale per una sorveglianza aerea completa e affidabile. Queste due tecnologie sono complementari e vengono spesso combinate in sistemi moderni per sfruttare i rispettivi punti di forza e ridurre la dipendenza esclusiva dai dati di navigazione a bordo. L'ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) è una tecnologia "dipendente" dai dati di bordo, in cui l'aeromobile trasmette autonomamente, circa una volta al secondo, la propria posizione calcolata tramite sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*), oltre a quota, velocità e altri parametri di volo. Diversamente dai radar tradizionali, che trasmettono segnali interrogativi e determinano la posizione del velivolo dalle risposte del transponder, l'ADS-B trasmette informazioni autonomamente: è automatico perché funziona senza stimoli esterni, è dipendente perché si affida ai sistemi di bordo e fa broadcast, cioè trasmette i dati a chiunque sia in grado di riceverli senza alcuna interrogazione bidirezionale. Le informazioni ricevute dalle stazioni ADS-B comprendono identificativo del velivolo, quota, velocità e altri parametri utili, fornendo così un quadro aggiornato del traffico aereo. Tuttavia, la precisione e la disponibilità dei dati dipendono dal corretto funzionamento del GNSS e del transponder di bordo.

La multilaterazione (MLAT), invece, è una tecnologia "indipendente", che calcola la posizione degli aeromobili misurando i tempi di arrivo dei segnali trasmessi dai transponder a più stazioni a terra. Il principio di funzionamento si basa sul tempo di arrivo del segnale (TDOA *Time Difference*

of Arrival): confrontando i tempi con cui lo stesso segnale arriva a stazioni differenti, il sistema calcola la posizione dell'aeromobile con elevata precisione, senza dipendere dai dati di navigazione a bordo. Questo approccio permette di ottenere una sorveglianza più robusta e affidabile anche in assenza di dati ADS-B o quando questi ultimi risultano incompleti o inaccurati. Combinando ADS-B e MLAT in una sorveglianza composita, i sistemi moderni sono in grado di sfruttare l'aggiornamento frequente di ADS-B e la robustezza di MLAT per garantire una copertura più completa e affidabile, sia per la gestione del traffico in volo sia per le operazioni a terra.

6.2 La costruzione del database

La fase successiva all'analisi e descrizione delle fonti dati riguarda la loro integrazione in un database, progettato per supportare in modo efficiente le analisi acustiche e ambientali. Poiché i dataset disponibili presentano caratteristiche molto differenti per formato, frequenza di campionamento e contenuto informativo, è stato necessario organizzare in maniera coerente e interrogabile una grande mole di informazioni provenienti da fonti eterogenee, sviluppando una procedura di normalizzazione e allineamento temporale volta a garantire coerenza e confrontabilità tra le diverse misurazioni.

Questo paragrafo illustra quindi nel dettaglio l'architettura del database, le scelte implementative e i criteri di gestione dei dati, con l'obiettivo di ricostruire i passaggi percorsi nel processo di analisi. Per ogni timestamp ed evento radar è indicata la centralina più vicina, per cui lo script Python ha associato il valore di dB misurato ottenendo così il livello acustico corrispondente a ciascun passaggio aereo. Tramite la stessa chiave logica di timestamp ed evento radar, lo script ricerca i dati meteo più prossimi nel tempo (con una finestra di 20-50 minuti) e li integra, così da caratterizzare le condizioni atmosferiche in corrispondenza del passaggio. Infine lo script effettua il matching tra evento radar e dataset aeromobili, verificando il dataset principale e, in caso di mancanza, i file di supporto elaborati dalla corrispondenza tra callsign, flight code e modello aeromobile, così da attribuire a ciascun passaggio le corrette caratteristiche tecniche. In questo modo si ottiene un file completo per ogni giornata disponibile nel biennio 2023-2024, in totale 725 file, dove ogni riga corrisponde al passaggio di un aereo e integra informazioni provenienti da radar, centraline acustiche, meteo e dettagli aeromobile. In aggiunta, lo script calcola variabili derivate, come lo scostamento dal livello medio di rumore, il bearing tra velivolo e centralina e l'effetto del vento rispetto alla rotta del velivolo.

6.2.1 Approccio e software utilizzati

L'obiettivo principale della progettazione del database è stato creare un ambiente che consentisse di combinare dati eterogenei provenienti da diverse fonti: le centraline acustiche, i tracciati radar, i dati meteorologici e il dettaglio dei velivoli. Lo scopo di quest'integrazione è quello di effettuare analisi incrociate che permettono di correlare i livelli di rumore misurati con le condizioni meteorologiche e le caratteristiche dell'aeromobile, fornendo un quadro completo delle variabili coinvolte. Si è scelto un approccio operativo basato su uno script Python, che legge e incrocia in modo automatizzato i diversi file disponibili, generando una tabella unica e completa per ogni passaggio di aereo.

Lo script Python implementa le join logiche tra queste entità tramite chiavi di collegamento, quali il timestamp, il callsign e l'identificativo della centralina. In questo modo, per ogni evento radar è possibile associare la misura dei decibel rilevati dalla centralina più vicina, le condizioni atmosferiche misurate nello stesso intervallo temporale e i dettagli del velivolo corrispondente. Il risultato finale è una tabella che contiene tutte le informazioni necessarie per le analisi, comprese variabili derivate come lo scostamento di dB rispetto alla media diurna o notturna, il bearing tra velivolo e centralina e l'effetto del vento relativo alla direzione del passaggio.

Lo sviluppo del database e delle procedure di elaborazione dei dati è stato realizzato principalmente in Python, linguaggio caratterizzato dall'ampia disponibilità di librerie dedicate al trattamento di dati complessi. Per la gestione dei file *slaeq*, compressi in formato *.bz2*, sono state utilizzate le librerie standard **os** e **bz2**, che hanno permesso di navigare nelle directory e di decomprimere i dataset prima della lettura. Una volta estratti, i dati sono stati elaborati tramite **pandas**, la libreria di riferimento per la manipolazione e l'analisi di tabelle di grandi dimensioni, in combinazione con **datetime**, per la gestione delle informazioni temporali, e con **re**, per la pulizia e la formattazione delle stringhe. La libreria **tqdm** è stata impiegata per monitorare l'avanzamento delle operazioni di *parsing*, data la mole significativa di file da elaborare. La corretta gestione dei fusi orari è stata resa possibile grazie a **pytz**, fondamentale per sincronizzare i dati provenienti da fonti diverse e riportarli a un riferimento temporale unico, in questo caso l'ora locale presso l'Aeroporto di Torino-Caselle. Per i calcoli geodetici, come la distanza e il bearing tra un aeromobile e una centralina acustica, si è fatto ricorso alla libreria **great_circle_calculator**, basata sulla geometria sferica e quindi adatta a rappresentare in modo accurato le traiettorie di volo sulla superficie terrestre. Infine, per l'integrazione con strumenti di visualizzazione, è stata utilizzata la libreria **folium**, che ha consentito la creazione di mappe interattive con la sovrapposizione di rotte, centraline e direzione del vento.

Per la gestione dei dati è stato utilizzato MySQL, un sistema open source di gestione di database relazionali, basato su SQL, che consiste nell'archiviare informazioni in tabelle separate e collegarle con chiavi logiche, da cui l'aggettivo relazionale. Il nome del sistema deriva dall'unione di "My", nome della figlia di uno dei co-fondatori, con l'acronimo SQL (*Structured Query Language*), il linguaggio standard per l'accesso e la manipolazione dei dati in un database relazionale. Sviluppato originariamente nel 1995, è supportato dal 2010 da Oracle Corporation ma, nonostante il cambio di proprietà, MySQL rimane un software libero e modificabile. In Python, l'interfacciamento con MySQL è stato reso possibile tramite la libreria **mysql.connector**, utilizzata per stabilire la connessione al database, inviare query e recuperare i risultati in forma direttamente elaborabile.

Per l'analisi interattiva e la rappresentazione dei dati è stato utilizzato anche Power BI, una piattaforma di *business intelligence* sviluppata da Microsoft. Si tratta di uno strumento che consente di importare dati da diverse fonti, elaborarli e trasformarli in dashboard e report interattivi, costruendo visualizzazioni dinamiche e personalizzabili.

6.2.2 Importazione dei dati e strategie di integrazione

Il processo di costruzione del dataset finale parte dall'importazione dei file grezzi e si articola in una sequenza di procedure di normalizzazione ed integrazione finalizzate a rendere le diverse fonti confrontabili e coerenti tra di loro.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, i dati fonometrici sono originariamente memorizzati in file compressi con estensione *.slaeq.bz2*. La funzione dedicata **carica_bz2_in_cache** si occupa di leggerli, decomprimerli, trasformarli in dataframe pandas e salvarli in cache. Ogni file è indicizzato per timestamp e viene memorizzato in cache per velocizzare le elaborazioni successive.

In modo analogo, le funzioni **carica_dati_meteo**, **carica_dati_aircraft** e **carica_dati_matched** importano rispettivamente i dataset meteorologici, i dettagli sugli aeromobili e le corrispondenze tra callsign, flight code e modello aeromobile. Le medie diurne e notturne, calcolate con i dB rilevati dalle centraline fonometriche, vengono invece estratte dai file di riepilogo mediante la funzione **carica_medie**.

Un passaggio importante consiste nell'uniformazione dei formati, in particolare tutte le date e gli orari vengono convertiti in formati standard, mentre le unità di misura e il tipo di variabili (numero o stringa) vengono resi omogenei. I valori mancanti o non validi vengono gestiti in modo coerente, garantendo la correttezza dei calcoli successivi. Risulta invece critica la sincronizzazione temporale: un aspetto fondamentale per l'integrazione dei dati è la gestione dei fusi orari, poiché i tracciati

radar e le osservazioni meteorologiche sono registrati in UTC, mentre le centraline acustiche e i dati degli aeromobili fanno riferimento all'orario locale. Per risolvere questa discrepanza, dato che i dataset non sono uniformi, il codice trasforma i timestamp UTC in orario locale (Europe/Rome) attraverso le seguenti operazioni:

1. parsing della stringa del timestamp UTC in un oggetto datetime senza fuso orario;
2. associazione del fuso orario UTC all'oggetto datetime;
3. conversione in orario locale tramite il fuso orario dell'Italia (Europe/Rome);
4. estrazione di data e ora locali separate e creazione di un campo timestamp_locale combinando i due elementi, che diventa la chiave di riferimento per i join tra i dataset.

Questa procedura garantisce che ogni evento radar possa essere correttamente associato al valore di rumore rilevato dalla centralina più vicina, ai dati meteo e al dettaglio del velivolo, anche se originariamente i dataset erano registrati con fusi orari differenti. Dopo aver trasformato tutti i timestamp in orario locale, i dati radar vengono ulteriormente approssimati alle finestre temporali standardizzate delle osservazioni meteorologiche. A questo scopo si utilizza la funzione **round_to_nearest_20_or_50**, che arrotonda l'orario dell'evento radar al minuto più vicino tra 20 o 50, corrispondente alle finestre di raccolta dei dati meteo, così che ogni evento radar possa essere associato alle condizioni atmosferiche più vicine nel tempo.

In merito alle strategie di integrazione, lo script Python definisce chiavi logiche quali timestamp, callsign e centralina che fungono da join tra i diversi dataset, simulando la logica di un database relazionale. In questo modo per ogni tracciato radar viene associato il livello di rumore misurato dalla centralina più vicina, alle stesse osservazioni sono collegati i dati meteo corrispondenti sincronizzati temporalmente e vengono recuperati i dettagli dell'aeromobile. Le relazioni in sintesi sono:

- radar - centralina: associa il livello di rumore misurato dalla centralina più vicina;
- radar - meteo: collega le condizioni atmosferiche al momento del passaggio;
- radar - aeromobile: integra i dati identificativi e le caratteristiche del velivolo.

Oltre all'integrazione dei dati principali, lo script calcola variabili derivate come lo scostamento del singolo evento rispetto al livello medio diurno o notturno di dB rilevati dalle centraline e il bearing, ossia l'angolo tra la traiettoria dell'aereo e la posizione della centralina più vicina. Quest'ultimo parametro viene poi confrontato con la direzione del vento per valutare l'effetto del vento sulla propagazione del suono e identificare se il passaggio del velivolo avviene in condizioni di sopravvento, sottovento o laterali rispetto alla centralina.

6.2.3 Descrizione delle entità principali e dello script Python

Le entità principali del database corrispondono ai dataset originali utilizzati dallo script Python, che comprendono:

- le centraline acustiche, ognuna identificata da un codice univoco, che includono dati quali la posizione geografica espressa in termini di latitudine e longitudine, il timestamp, i valori di rumore in dB rilevati ogni secondo e le medie giornaliere distinte tra fascia diurna (06:00:00-22:59:59) e notturna (23:00:00-5:59:59);
- i tracciati radar dei voli, dove ogni evento radar è identificato da callsign e timestamp e i dati memorizzati racchiudono il modello di velivolo, la posizione geografica in termini di latitudine, longitudine e quota, l'aeroporto di provenienza e quello di destinazione del volo, la centralina più vicina per ogni passaggio e la distanza da essa;

- i dati meteorologici, indicizzati dal timestamp e che comprendono la stazione meteo, il timestamp, la temperatura dell'aria, il punto di rugiada, l'umidità relativa, la direzione del vento e la velocità del vento, espresse in unità di misura coerenti con il sistema internazionale;
- i dettagli aeromobili, dove ogni aeromobile è identificato dal callsign e dalla data o, se necessario, dalla matricola e i dati raccolti comprendono modello ICAO, classificazione acustica ICAO, pista utilizzata e natura del volo.

Lo script Python (allegato come "Plot_LIMF + c.c.s.v.m.a. con tutte le giornate + efficiente ULTIMO.py") sviluppato per l'analisi dei dati gestisce in maniera sequenziale e integrata tutte queste informazioni, simulando le connessioni di un modello relazionale, e segue un flusso strutturato in più fasi, volte a trasformare dataset eterogenei in una tabella integrata.

La prima fase consiste nel caricamento dei dati, dove vengono letti e trasformati in dataframe pandas i file fonometrici, i dataset meteorologici, i dettagli degli aeromobili, le eventuali corrispondenze aggiuntive tra callsign e le medie giornaliere dei livelli sonori registrati dalle centraline acustiche, distinguendo tra fascia diurna e notturna. Segue la creazione del loop di analisi file, denominato "Elaborazione file radar", che apre ognuno dei 725 file "plot_LIMF202XXXXX.OUT" nella cartella "Risultati plot con radar.read" e legge una riga per volta, svolgendo un'operazione di parsing.

La fase successiva si occupa della sincronizzazione temporale, per cui i dati radar e meteo, originariamente in UTC, vengono convertiti in orario locale, mentre le centraline e i dati aeromobili sono già in locale. Questo permette l'associazione di ciascun evento radar al valore in decibel misurato dalla centralina acustica più vicina, attraverso la funzione **leggi_valore_decibel** che si occupa di interrogare una cache di dati pre-caricati costruendo una chiave di ricerca che combina la postazione e la data di riferimento. Qualora i dati non fossero disponibili all'interno della cache, oppure l'istante temporale richiesto non fosse compreso nell'indice del DataFrame della centralina, la funzione restituisce un messaggio che segnala la non disponibilità del valore. Nel ciclo principale, se la funzione restituisce un valore numerico allora il dato viene conservato ed elaborato, al contrario, se la risposta è un messaggio di indisponibilità, l'iterazione viene ignorata e il flusso passa direttamente all'evento radar successivo.

La terza fase prevede l'integrazione dei dati meteorologici, per cui i timestamp radar vengono arrotondati a finestre standardizzate (20 o 50 minuti) per garantire il corretto allineamento con le osservazioni meteorologiche più prossime nel tempo. Per quanto riguarda la direzione del vento, questa segue la convenzione meteorologica per cui l'angolo espresso in gradi indica la provenienza del vento, misurata in senso orario a partire dal Nord geografico.

Nota la direzione del vento, il codice mette in relazione la traiettoria dell'aeromobile con quest'ultima, al fine di valutare l'effetto che il vento può avere sulla propagazione del rumore verso la centralina acustica più vicina. Per determinare la direzione reciproca tra aeromobile e centralina di rilevamento, è stata utilizzata la funzione **bearing_at_p1** della libreria **great_circle_calculator**, che consente di calcolare l'angolo di rotta iniziale, ovvero la direzione che occorre seguire rispetto al Nord geografico per spostarsi dal punto di partenza (in questo caso la posizione radar dell'aeromobile) al punto di arrivo (la postazione di misura acustica), lungo l'arco di cerchio massimo che unisce i due punti sulla superficie terrestre.

Il risultato restituito è un angolo espresso in gradi, con convenzione azimutale classica 0° corrisponde al Nord, 90° all'Est, 180° al Sud e 270° all'Ovest. Tale informazione è fondamentale perché permette di definire con precisione la direzione lungo la quale il rumore si propaga dall'aeromobile verso la centralina. Successivamente, questo angolo viene confrontato con la direzione del vento, ottenendo l'angolo relativo che rappresenta quanto la direzione del vento è allineata o opposta alla congiungente tra aeromobile e centralina. In base a tale angolo, il vento viene classificato in tre casi principali:

- sopravvento se l'angolo relativo è prossimo a 0° (entro $\pm 45^\circ$), perché significa che i due vettori sono paralleli ma opposti: il vento soffia dalla centralina verso l'aeromobile, ostacolando la propagazione;
- sottovento se l'angolo relativo è prossimo a 180° (entro $\pm 45^\circ$), perché significa che i due vettori sono paralleli e concordi: il vento soffia dall'aeromobile verso la centralina, favorendo la propagazione del suono;
- laterale per i valori intermedi, che indicano situazioni in cui il vento incide con una componente trasversale;
- se invece la direzione del vento non è disponibile, i valori vengono marcati come non calcolabili.

```

wind_dir = valori_meteo["drct"]
if wind_dir != "M":
    angolo_relativo = abs((bearing % 360) - float(wind_dir))
    if angolo_relativo <= 45 or angolo_relativo >= 315:
        effetto = 2 # "Sopravvento"
    elif 135 <= angolo_relativo <= 225:
        effetto = 1 # "Sottovento"
    else:
        effetto = 0 # "Laterale"
else:
    angolo_relativo = "NULL"
    effetto = "NULL"

```

La quarta fase permette di associare i dettagli dell'aeromobile corrispondente quali il modello ICAO, la matricola, la classificazione acustica, la pista di riferimento e la natura del volo (arrivo o partenza). Nel recupero dei dettagli degli aeromobili, lo script implementa una logica gerarchica: cerca prima nel dataset principale, poi nei file di matching supplementari e infine verifica la natura del volo per associare correttamente callsign o matricola: questo garantisce la completezza dei dati anche in presenza di informazioni incomplete o mancanti.

Lo script permette anche di calcolare lo scostamento di ciascun evento rispetto al livello medio diurno o notturno di rumore della centralina, per il quale è stato necessario calcolare le medie giornaliere dei livelli sonori registrati distinguendo tra fascia diurna e notturna. La fascia diurna è stata definita dalle ore 06:00:00 alle 22:59:59, corrispondenti ai periodi di maggiore attività aeroportuale. Per ogni centralina e per ogni giorno, sono stati estratti tutti i valori di decibel rilevati in questa fascia, sono state sommati e divisi per il numero totale di rilevazioni, ottenendo così la media diurna giornaliera. Il calcolo della media notturna è più complesso poiché copre le ore tra le 23:00:00 e le 05:59:59, attraversando la mezzanotte e quindi due giorni consecutivi:

- le ore comprese tra 00:00:00 e 05:59:59 sono state considerate parte della notte del giorno corrente;
- le ore comprese tra 23:00:00 e 23:59:59 sono state considerate parte della notte del giorno successivo.

Per ciascuna centralina, i valori raccolti nelle due sottofasce sono stati aggregati e mediati per ottenere la media notturna giornaliera, garantendo una corretta associazione temporale e la continuità dei dati anche per le notti a cavallo di due giorni. Eventuali valori non numerici o assenti sono stati automaticamente ignorati.

L'ultimo step è stato quello di realizzare la tabella integrata finale, in cui tutte le informazioni disponibili vengono riunite in un unico dataset. Ogni riga della tabella corrisponde a un singolo

evento radar, cioè al passaggio di un aeromobile, e contiene in forma aggregata i dati fonometrici, le coordinate e i parametri radar, le condizioni meteorologiche, i dettagli del velivolo e le variabili derivate dai calcoli effettuati. L'output dello script Python è quindi un DataFrame da cui è stato poi effettuato l'export in file *.csv*, ciascuno dei quali contiene i dati integrati e coerenti tra le diverse fonti.

6.2.4 Struttura del database MySQL

Una volta elaborati e incrociati i dati tramite lo script Python, si è resa necessaria la loro archiviazione in un Database MySQL per garantire una consultazione più efficiente e la possibilità di eseguire query complesse. A tal fine, sul server messo a disposizione è stato creato il database FR24, al cui interno è stata definita la tabella centrale *dati_incrociati*. La tabella è stata progettata per contenere tutte le informazioni rilevanti associate a ciascun passaggio aereo e presenta la seguente struttura:

Colonna	Tipo	Commento
id	int <i>Auto incremento</i>	
Callsign	varchar(20)	
Partenza	varchar(20)	
Arrivo	varchar(20)	
Lat	float <i>NULL</i>	
Lon	float <i>NULL</i>	
Quota	float <i>NULL</i>	
Centralina	varchar(20)	
Distanza	float <i>NULL</i>	
Data_locale	date	
Orario_locale	time	
dB_rilevato	float <i>NULL</i>	
dB_medio	float <i>NULL</i>	
Scostamento	float <i>NULL</i>	
Air_Temperature	float <i>NULL</i>	
Dew_Point_Temperature	float <i>NULL</i>	
Relative_Humidity	float <i>NULL</i>	
Wind_Direction	float <i>NULL</i>	
Wind_Speed	float <i>NULL</i>	
Bearing	float <i>NULL</i>	
Angolo_relativo	float <i>NULL</i>	
Effetto_vento	float <i>NULL</i>	
AIRCRAFT_ICAO_MODEL	varchar(20) <i>NULL</i>	
AIRCRAFT_MATRICULA	varchar(20) <i>NULL</i>	
NOISE	float <i>NULL</i>	
RWY	float <i>NULL</i>	
NATURE_CODE	varchar(20) <i>NULL</i>	

Figura 6.1: Struttura tabella *dati_incrociati*

Le informazioni di interesse sono suddivise per categorie:

- identificazione volo: id, Callsign, Partenza, Arrivo;
- dati radar e di tracciamento: Lat, Lon, Quota;
- informazioni relative alla postazione acustica: Centralina, Distanza;

- variabili temporali: Data_locale, Orario_locale;
- dati fonometrici: dB_rilevato, dB_medio, Scostamento;
- dati meteorologici: Air_Temperature, Dew_Point_Temperature, Relative_Humidity, Wind_Direction, Wind_Speed;
- dettagli del velivolo: AIRCRAFT_ICAO_MODEL, AIRCRAFT_MATRICULA, NOISE, RWY, NATURE_CODE;
- variabili derivate: Bearing, Angolo_relativo, Effetto_vento.

La tabella è stata configurata con un indice primario sul campo id (incrementale) e un indice secondario su NATURE_CODE, per velocizzare le interrogazioni più frequenti.

Prima del caricamento, i file *.csv* prodotti dallo script Python sono stati sottoposti a una fase di normalizzazione, che comprendeva la conversione delle date e degli orari in formato DATE e TIME compatibile con MySQL, l'uniformazione dei valori numerici sostituendo le stringhe non interpretabili con NULL e la conversione in float dei campi contenenti valori misti (numeri o stringhe) per assicurare omogeneità nei dati.

La connessione tra Python e il database è stata gestita tramite la libreria **mysql.connector**, utilizzando i parametri di accesso quali host, utente, password e nome del database. Lo script ha poi popolato la tabella *dati_incrociati* leggendo i file *.csv* riga per riga, convertendo i dati e inserendo ogni record con query *INSERT INTO*, salvando periodicamente le operazioni tramite *conn.commit()*. Grazie a questo processo, sono stati caricati complessivamente tutti i 725 file, arrivando a 2.613.996 righe, e il risultato finale è una base dati unica, interrogabile tramite SQL, che permette di eseguire analisi mirate e di collegarsi facilmente a strumenti di visualizzazione e analisi statistica.

6.3 I risultati dell'analisi

In questa sezione vengono presentati i risultati principali ottenuti dall'analisi dei dati raccolti e organizzati nel database. Lo scopo è evidenziare le dinamiche del rumore aeroportuale in relazione ai movimenti dei velivoli, alla flotta operativa, alle caratteristiche dei motori e alle condizioni meteorologiche, anche confrontando livelli sonori tra differenti classi di velivoli e valutando gli effetti di fattori ambientali come il vento.

6.3.1 Evoluzione della *fleet mix*

Per analizzare l'evoluzione della *fleet mix* è stato scelto un periodo più ampio che va dal 01/01/2015 al 03/09/2025, utilizzando il registro di traffico aereo estratto da Oracle BI. Ogni record riporta l'anno di riferimento YEAR, il modello in formato ICAO dell'aeromobile AIRCRAFT_ICAO_MODEL, la classe ICAO di appartenenza AIRCRAFT_MODEL_ICAO_CLASS, il livello di certificazione acustica NOISE, il numero di movimenti associati ATM e, quando disponibile, la matricola dell'aeromobile AIRCRAFT_MATRICULA. I dati grezzi, organizzati in file *.csv*, sono stati caricati in Power BI per la loro rappresentazione grafica, che offre una visione sintetica ma efficace dell'evoluzione della flotta, sia in termini quantitativi di numero complessivo di operazioni, sia in termini qualitativi di distribuzione per *Chapter* ICAO acustici e per classi ICAO *aerodrome*.

I seguenti grafici hanno come variabile principale la somma dei movimenti ATM ma esplorano la *fleet mix* secondo criteri diversi: per anno, per categoria di rumore, per classe ICAO *aerodrome* e per modelli ICAO.

Somma di movimenti per anno e categoria rumore

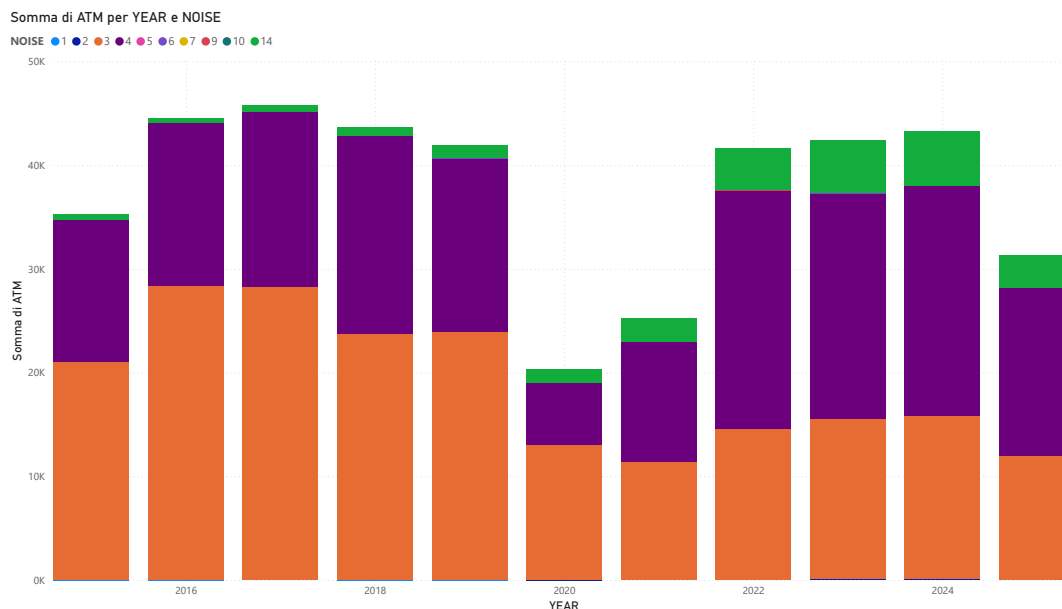


Figura 6.2: Somma di ATM per YEAR e NOISE

Nel periodo 2015-2025 il numero complessivo di movimenti mostra due fasi principali: una prima fase di crescita, tra il 2015 e il 2017, in cui il traffico si stabilizza su valori superiori alle 40.000 operazioni annue, seguita da una riduzione graduale fino al minimo registrato nel 2020, riconducibile agli effetti della pandemia di COVID-19. Successivamente, a partire dal 2021, si osserva una ripresa progressiva con un ritorno su valori compresi tra le 40.000 e le 45.000 operazioni nel triennio 2022-2024, andamento confermato dai primi otto mesi del 2025.

Dal punto di vista della composizione della flotta per classi di rumore, è evidente la prevalenza costante dei *Chapter 3* e *4*, che insieme costituiscono la parte dominante della *fleet mix* per tutto l'intervallo temporale analizzato. I *Chapter 14* a più bassa rumorosità, introdotti in misura marginale nei primi anni dal 2015 al 2018, diventano via via più presenti nel periodo post 2021, riflettendo una graduale sostituzione degli aeromobili più datati e meno efficienti con modelli di nuova generazione conformi a standard acustici più stringenti.

Questa serie storica mette in luce sia l'impatto degli eventi a livello globale sul volume complessivo di traffico, sia la progressiva evoluzione della flotta verso configurazioni più silenziose, coerenti con le politiche internazionali di riduzione dell'impatto acustico in ambito aeroportuale.

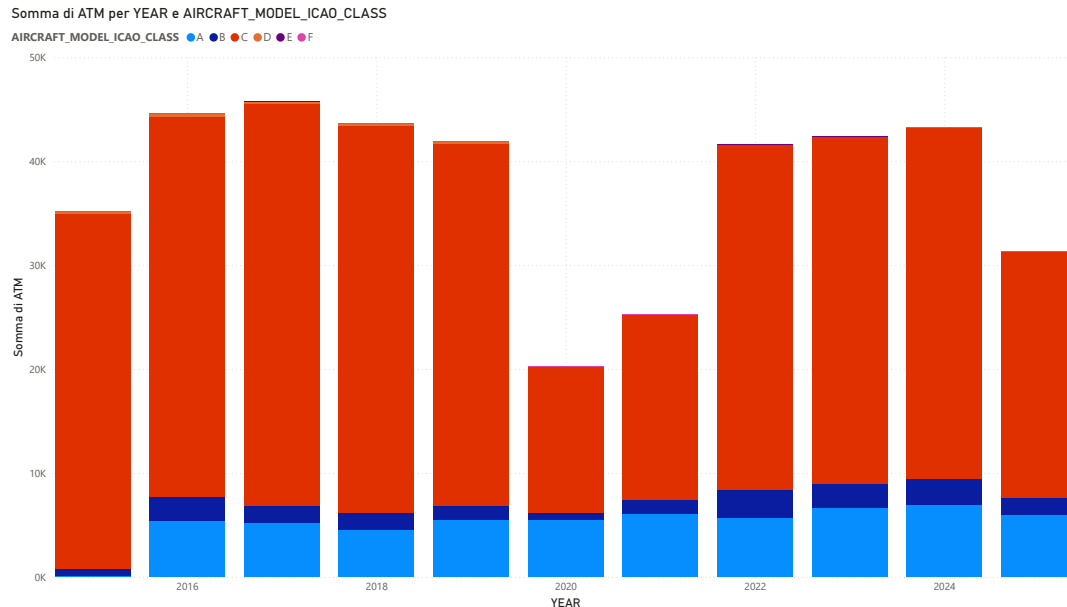
Somma di movimenti per anno e classe ICAO *aerodrome*

Figura 6.3: Somma di ATM per YEAR e AIRCRAFT_MODEL_ICAO_CLASS

Nel periodo 2015-2025, la ripartizione per classi ICAO mette in evidenza una struttura fortemente dominata dalla classe **C**, che è quella che sostiene la maggior parte del traffico annuale ed è presente in tutti gli anni analizzati con un peso dominante. Le altre classi si aggiungono in proporzioni molto minori, in particolare, ad esclusione del 2015, le classi **A** e **B** sono costantemente presenti, con contributi relativamente stabili e poco variabili nel tempo. La classe **D** apporta una quota residuale, che mostra variazioni ma senza mai raggiungere valori comparabili con la classe dominante, mentre le classi **E** e **F** sono indistinguibili sui movimenti complessivi. Questo andamento risulta coerente con le effettive capacità infrastrutturali dell'aeroporto, dove la maggior parte degli stand destinati all'aviazione commerciale è classificata in categoria **C**. Sono tuttavia presenti anche alcune piazzole in grado di accogliere aeromobili di classe superiore **D** ed **E**, fino ad arrivare eccezionalmente alla classe **F**, ma solo in due casi specifici quali il Boeing 747-8I/F e l'Antonov AN-124. L'attività della scuola di volo contribuisce alla presenza di aeromobili di classe **A**, mentre l'aviazione generale opera prevalentemente con velivoli di categoria **B**.

Negli anni di contrazione del traffico 2020-2021, la classe predominante **C** mantiene comunque la maggior parte dei movimenti ma la quota assoluta delle classi minori **A** e **B** rimane uguale agli anni precedenti, rappresentando un contributo relativo importante sul totale dei movimenti annuali. Durante la ripresa post 2020, si nota un incremento generale per tutte e tre le classi, ma l'espansione è più marcata nella classe dominante rispetto alle classi secondarie.

Somma di movimenti per modelli ICAO

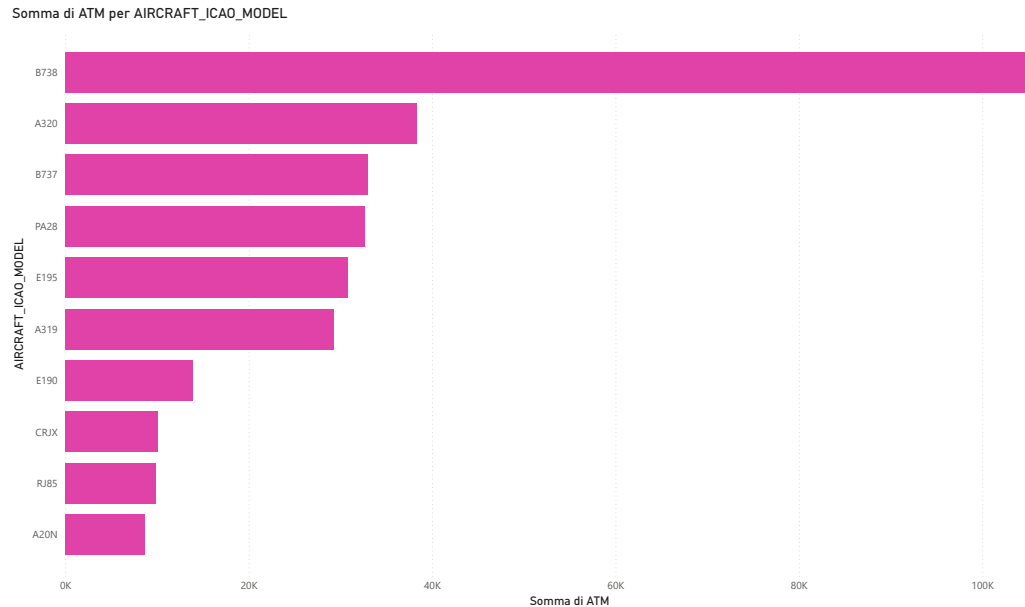


Figura 6.4: Somma di ATM per AIRCRAFT_ICAO_MODEL

I dieci modelli di aeromobili più presenti presso lo scalo di Torino sono riportati nel presente grafico, ordinati in modo decrescente in base al numero complessivo di movimenti ATM. Sull'asse delle ordinate sono indicati i diversi modelli di velivolo, mentre sull'asse delle ascisse è rappresentato il totale dei movimenti registrati per ciascuno di essi.

Dall'analisi dei dati emerge una netta prevalenza del Boeing 737-800 (B738), che con oltre 100.000 movimenti risulta di gran lunga il modello più operativo presso lo scalo. Il secondo aeromobile per frequenza è l'Airbus A320 che invece registra meno di 40.000 movimenti, evidenziando un divario marcato rispetto al B738, seguito da vicino dai Boeing 737 "classici", che chiudono il gruppo dei velivoli maggiormente rappresentativi del traffico commerciale. In misura minore si riscontrano i Piper PA28, la cui presenza è riconducibile all'intensa attività della scuola di volo operante presso lo scalo, e i jet regionali come Embraer E195 ed E190 e BAe RJ85, utilizzati per collegamenti a corto raggio. Completano il quadro gli Airbus A319 e i Bombardier CRJX, impiegati anch'essi nel traffico di linea, e gli Airbus A320neo, di cui si osserva una crescita significativa della flotta a testimonianza del progressivo rinnovo dei velivoli in flotta verso modelli più efficienti e meno impattanti dal punto di vista acustico ed emissivo.

Somma di movimenti per classe ICAO *aerodrome*

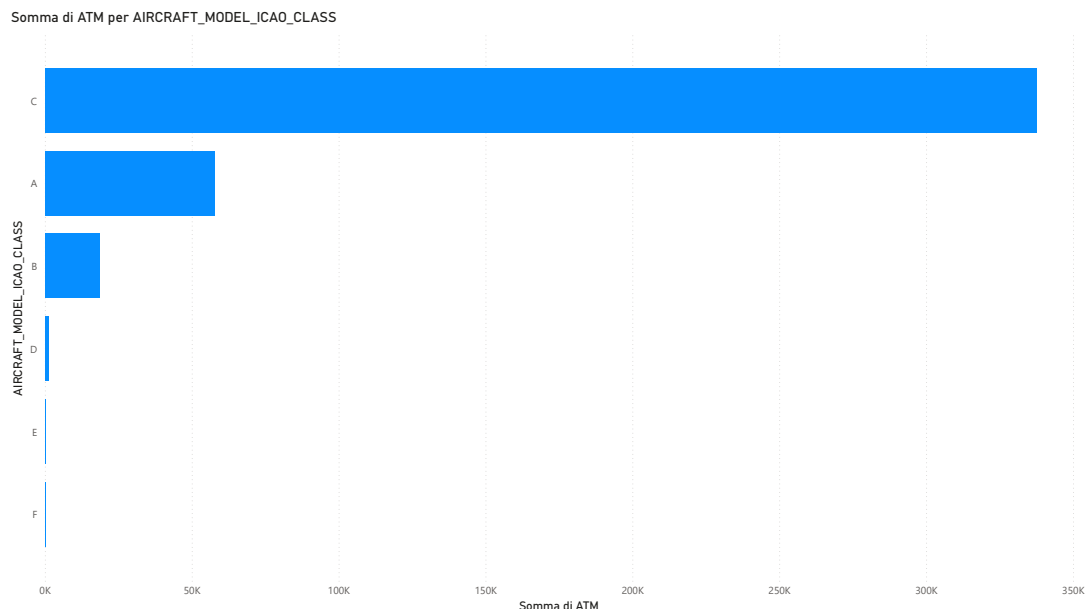


Figura 6.5: Somma di ATM per AIRCRAFT_MODEL_ICAO_CLASS

Il grafico mostra la distribuzione delle classi ICAO in ordine decrescente di frequenza, in funzione del numero complessivo di movimenti aerei ATM. Sull'asse delle ascisse è riportato il totale dei movimenti registrati per ciascuna classe, mentre sull'asse delle ordinate sono indicate le classi ICAO.

L'analisi evidenzia una netta predominanza della classe **C**, che con quasi 350.000 movimenti rappresenta la grande maggioranza del traffico e comprende i velivoli di corto e medio raggio tipici del trasporto aereo commerciale. A netta distanza seguono la classe **A**, con poco più di 50.000 movimenti, e la classe **B**, con circa 25.000 movimenti, associate rispettivamente all'aviazione leggera e generale. Le classi superiori **D**, **E** e **F** risultano invece molto meno frequenti, in alcuni casi appena visibili nel grafico, coerentemente con le caratteristiche infrastrutturali dell'Aeroporto di Torino che dispone di un numero limitato di stand e piazzole idonei ad accogliere aeromobili di dimensioni maggiori.

6.3.2 Andamento dei dB rilevati nel tempo

L'analisi dell'andamento dei dB rilevati nel tempo ha l'obiettivo di caratterizzare la dinamica acustica del traffico aereo misurato dalla rete di centraline acustiche. Attraverso la raccolta dei dati di rumore rilevati, è possibile evidenziare sia il rumore di fondo ambientale, che varia nel corso della giornata tra diurno e notturno, sia i picchi puntuali associati al passaggio dei velivoli durante le fasi operative di decollo e atterraggio. Questa tipologia di analisi permette di identificare le variazioni istantanee del livello equivalente, di confrontare aeromobili simili tra loro e di valutare l'impatto acustico dei singoli voli sul contesto locale. Costruire profili temporali dettagliati supporta l'interpretazione tecnica dei dati, fornendo informazioni utili sia per il monitoraggio ambientale e il rispetto degli standard di emissione sonora sia per l'attività aeroportuale.

Nei grafici dei paragrafi seguenti, l'asse delle ascisse rappresenta l'orario locale in formato *hh:mm:ss*, mentre l'asse delle ordinate indica il livello equivalente sonoro, espresso come *Short-term LAeq* in decibel, rilevato in corrispondenza di ciascun istante temporale. All'interno del database, sono stati registrati numerosi passaggi radar, ognuno associato a informazioni di volo specifiche. Per analizzare il contributo acustico di ciascun aeromobile, è stato adottato come criterio di selezione il valore massimo di dB rilevato durante il passaggio all'interno del database. Tale valore viene utilizzato come punto di riferimento in uno script Python che estrae dal file *.slaeq* della centralina, relativo al giorno e alla postazione di misura interessata, l'istante corrispondente al picco. Successivamente, è possibile estrarre un numero arbitrario di campioni precedenti e successivi a tale istante, in modo da costruire un profilo temporale completo dell'impronta acustica.

Impronta acustica per l'A321 Neo

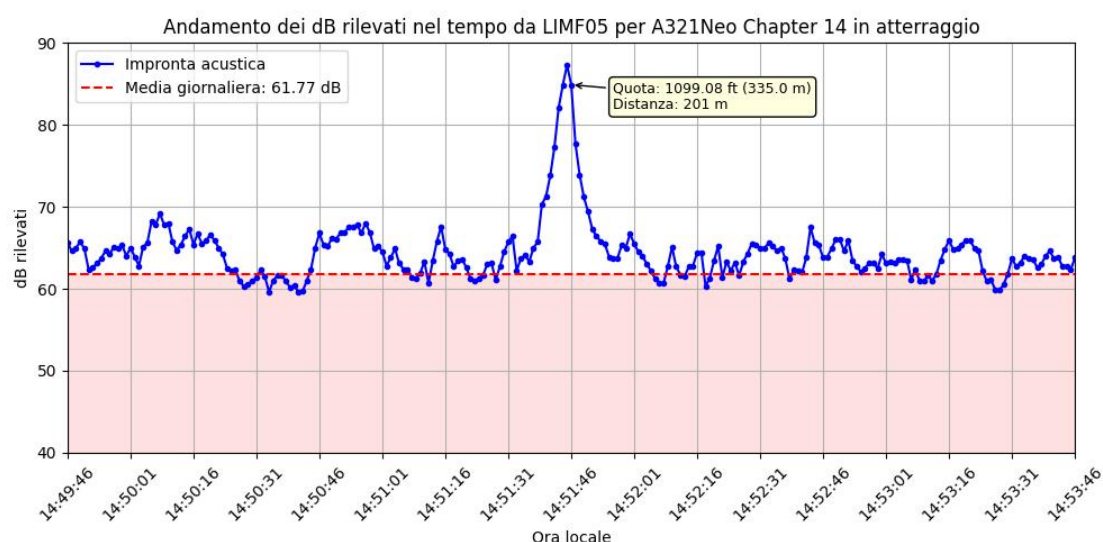


Figura 6.6: Andamento dei dB rilevati da LIMF05 nel tempo per A321Neo

Il grafico rappresenta l'impronta acustica rilevata dalla centralina LIMF05 durante la fase di atterraggio del velivolo Airbus A321 Neo, equipaggiato con motori Pratt & Whitney PW1133GA-JM. L'andamento mostra un rumore di fondo stabile compreso tra 60 e 70 dB, con una media che si attesta sui 61,77 dB, corrispondente al rumore ambientale medio della zona. Nell'intorno delle 14:51:46 del 02/01/2023, si osserva un picco pronunciato che raggiunge un massimo di 87,3 dB, attribuibile al passaggio del velivolo in questione. Seguendo la strategia di analisi dei dB rilevati in funzione del tempo, è stata selezionata dal database la riga corrispondente al valore di 84,9 dB a 335 m di quota e 201 m di distanza dalla postazione di misura LIMF05, evidenziato nel grafico precedente.

Considerata la configurazione dell'aeromobile e la fase operativa, il livello acustico registrato ha come contributo principale il rumore aerodinamico generato dal carrello e dalle superfici degli ipersostentatori, con una quota residua di rumore propulsivo dovuto al funzionamento a basso regime dei turbofan. Il motore PW1133GA-JM è caratterizzato da una Sea Level Static Thrust pari a 147,28 kN (33.110 lbf) in Take-Off (5 min.) e 145,81 kN (32.780 lbf) in Maximum Continuous^[64], valori che confermano l'elevata efficienza propulsiva.

Il profilo del picco, caratterizzato da una rapida salita seguita da una discesa simmetrica, rispecchia l'andamento temporale tipico del passaggio di un aeromobile durante la fase di atterraggio rilevato da una centralina. In particolare, il picco coincide con il momento in cui il velivolo si trova nell'intorno della verticale rispetto alla postazione di misura pertanto l'impronta acustica registrata costituisce un esempio rappresentativo della dinamica temporale del rumore generato dalle operazioni di atterraggio. Il valore medio giornaliero di 61,77 dB, rappresentato dalla linea tratteggiata rossa, mette in evidenza lo scostamento prodotto dall'evento rispetto al contesto acustico ordinario. Tale differenza, dell'ordine di +25 dB, evidenzia l'impatto puntuale ma di breve durata dei movimenti aerei sul campo acustico locale. Nel complesso, la misura risulta coerente con i livelli attesi per un aeromobile di categoria ICAO *Chapter 14*, conforme agli standard più restrittivi di emissione sonora.

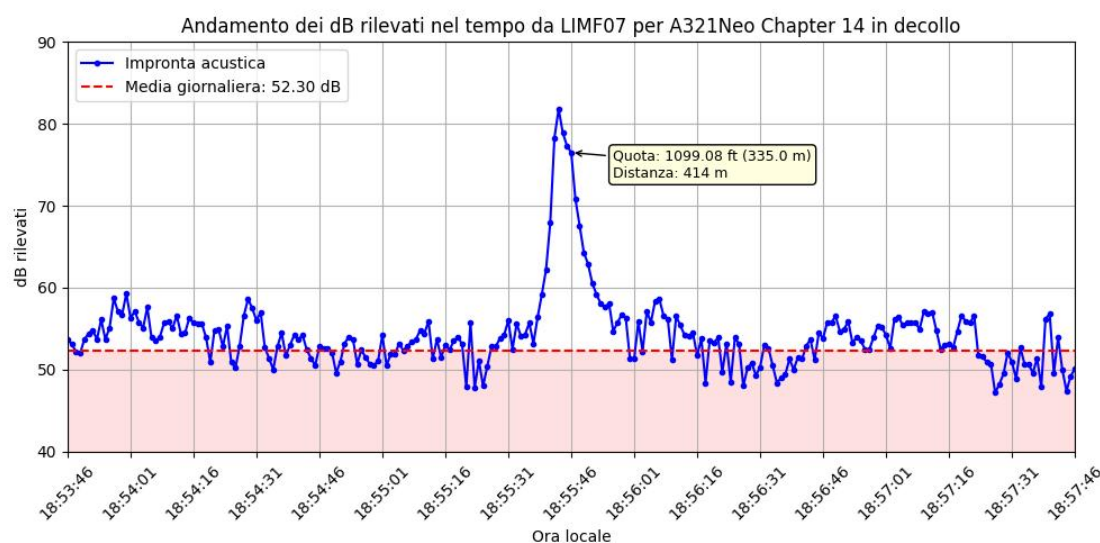


Figura 6.7: Andamento dei dB rilevati da LIMF07 nel tempo per A321Neo

Il grafico rappresenta l'impronta acustica rilevata dalla centralina LIMF07 durante la fase di decollo del velivolo Airbus A321 Neo, equipaggiato con motori Pratt & Whitney PW1133GA-JM. L'andamento mostra un rumore di fondo stabile compreso tra 50 e 60 dB, con una media che si attesta sui 52,30 dB, corrispondente al rumore ambientale medio della zona. Nell'intorno delle 18:55:46 del 10/07/2024, si osserva un picco pronunciato che raggiunge un massimo di 81.8 dB, attribuibile al passaggio del velivolo in questione. Seguendo la strategia di analisi dei dB rilevati in funzione del tempo, è stata selezionata dal database la riga corrispondente al valore di 76,5 dB a 335 m di quota e 414 m di distanza dalla postazione di misura LIMF07, evidenziato nel grafico precedente.

Durante la fase di decollo, la componente sonora predominante è il *jet noise*, generato principalmente dal getto dei gas di scarico ad alta velocità, e il *fan noise*, dovuto al funzionamento della ventola del turbofan. Pur essendo progettato per ridurre il rumore rispetto ai turbofan convenzionali, grazie alla gearbox che abbassa la velocità della ventola, il motore PW1133GA-JM genera comunque un contributo propulsivo dominante in decollo, poiché opera al massimo regime di spinta cioè take-off thrust.

Analogamente a quanto osservato durante l'atterraggio, anche nella fase di decollo si registra un picco acustico che rispecchia l'andamento temporale tipico del passaggio di un aeromobile davanti a una centralina di misura. Infatti, il picco coincide con il momento in cui il velivolo si trova lungo

la pista vicino alla perpendicolare rispetto alla centralina, ossia al punto più prossimo al suolo rispetto alla postazione di misura. Il valore medio giornaliero di 52,30 dB, rappresentato dalla linea tratteggiata rossa nel grafico, mette in evidenza lo scostamento prodotto dall'evento rispetto al contesto acustico ordinario. Tale differenza, dell'ordine di +30 dB, è maggiore dei +25 dB rilevati durante l'atterraggio e conferma l'impatto puntuale ma elevato delle operazioni di decollo.

Impronta acustica per il B737 MAX 8

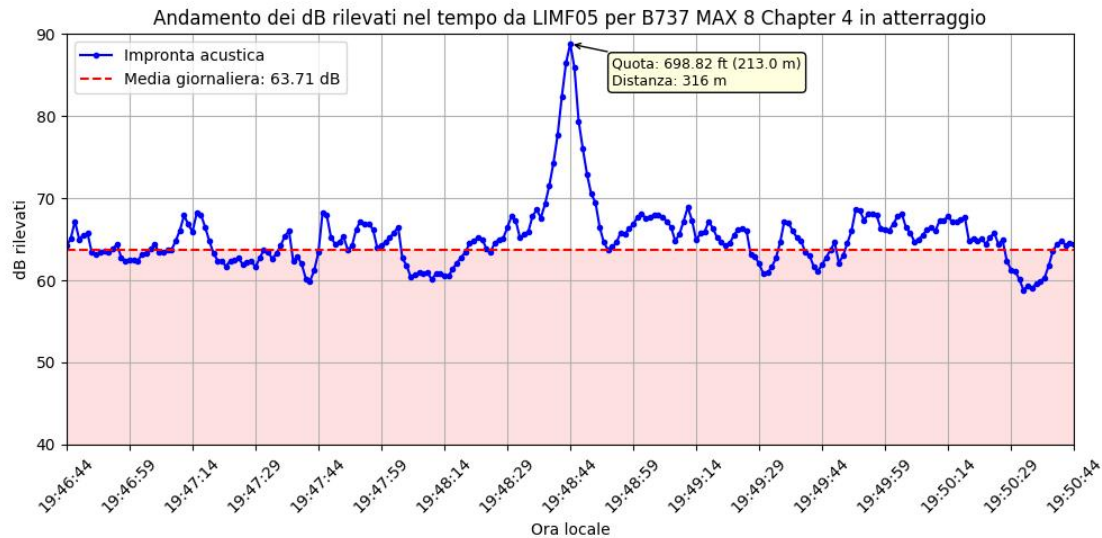


Figura 6.8: Andamento dei dB rilevati da LIMF05 nel tempo per B737 MAX 8

Il grafico rappresenta l'impronta acustica rilevata dalla centralina LIMF05 durante la fase di atterraggio del velivolo Boeing B737 MAX 8, equipaggiato con motori CFM International LEAP-1B27. L'andamento mostra un rumore di fondo stabile compreso tra 60 e 70 dB, con una media che si attesta sui 63,71 dB, corrispondente al rumore ambientale medio della zona. Nell'intorno delle 19:48:44 del 07/11/2024, si osserva un picco pronunciato che raggiunge un massimo di 88,8 dB, attribuibile al passaggio del velivolo in questione. Seguendo la strategia di analisi dei dB rilevati in funzione del tempo, è stata selezionata dal database la riga corrispondente al valore di 88,8 dB a 213 m di quota e 316 m di distanza dalla postazione di misura LIMF05, evidenziato nel grafico precedente.

Nella fase di avvicinamento e atterraggio, il contributo principale al rumore è di tipo aerodinamico, generato dal carrello, dagli ipersostentatori estesi e dall'interazione del flusso con le superfici alari, in quanto il motore opera a regime ridotto. Il motore in questione è il LEAP-1B27, caratterizzato da una Take-Off Thrust pari a 12.471 daN mentre la Maximum Continuous Thrust è di 12.131 daN^[65].

Il profilo del picco, caratterizzato da una rapida salita seguita da una discesa simmetrica, rappresenta l'andamento temporale tipico del passaggio di un aeromobile durante la fase di atterraggio, così come rilevato da una centralina di misura. Il valore medio giornaliero di 63,71 dB, rappresentato dalla linea tratteggiata rossa, mette in evidenza lo scostamento prodotto dall'evento rispetto al contesto acustico ordinario. Tale differenza, dell'ordine di +25 dB, evidenzia l'impatto puntuale di un singolo passaggio che può determinare variazioni significative nell'emissione sonora. Nel complesso, la misura risulta coerente con i livelli attesi per un aeromobile di categoria ICAO

Chapter 4, la quale, pur non essendo restrittiva quanto la *Chapter 14* in termini di emissione sonora, mantiene limiti acustici comunque stringenti.

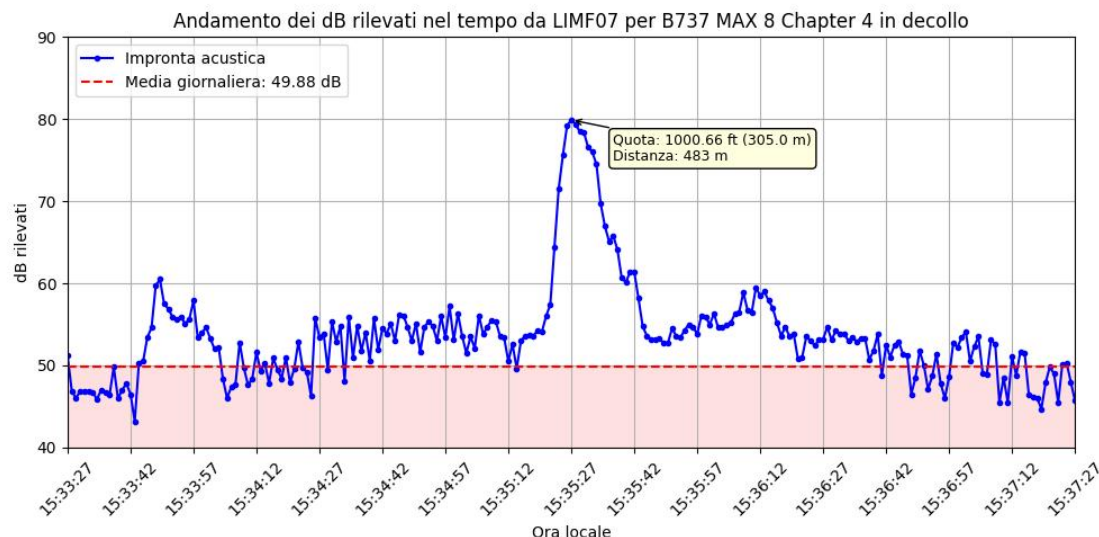


Figura 6.9: Andamento dei dB rilevati da LIMF07 nel tempo per B737 MAX 8

Il grafico rappresenta l'impronta acustica rilevata dalla centralina LIMF07 durante la fase di decollo del velivolo Boeing B737 MAX 8, equipaggiato con motori CFM International LEAP-1B27. L'andamento mostra un rumore di fondo stabile compreso tra 45 e 60 dB, con una media che si attesta sui 49,88 dB, corrispondente al rumore ambientale medio della zona. Nell'intorno delle 15:35:27 del 11/06/2023, si osserva un picco pronunciato che raggiunge un massimo di 79,9 dB, attribuibile al passaggio del velivolo in questione. Seguendo la strategia di analisi dei dB rilevati in funzione del tempo, è stata selezionata dal database la riga corrispondente al valore di 79,9 dB a 305 m di quota e 483 m di distanza dalla postazione di misura LIMF07, evidenziato nel grafico precedente.

Durante il decollo, il contributo principale al rumore è quello propulsivo legato alla spinta dei turbofan a massimo regime, dove il motore LEAP-1B27 sviluppa valori elevati di spinta statica in Take-Off. Il valore medio giornaliero di 49,88 dB, rappresentato dalla linea tratteggiata rossa, mette in evidenza lo scostamento pari a +30 dB prodotto dall'evento rispetto al contesto acustico ordinario, evidenziando ancora una volta l'impatto acustico dei movimenti aerei.

Impronta acustica di un'ora per centralina

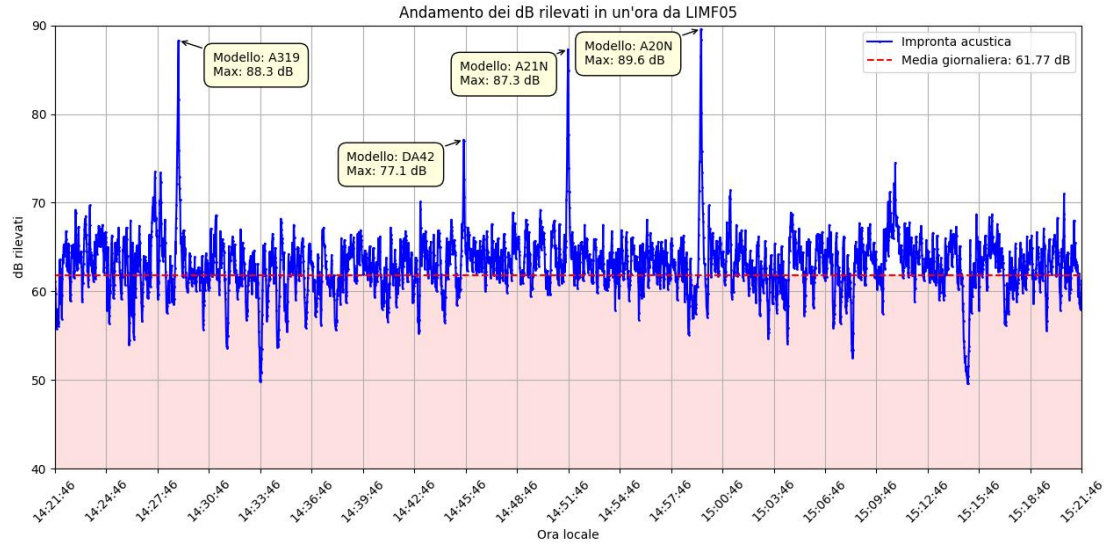


Figura 6.10: Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF05 per A321neo

Nell'evoluzione dei decibel registrati dalla centralina LIMF05, la linea blu rappresenta l'andamento dei decibel rilevati, mentre la linea rossa tratteggiata indica la media giornaliera, pari a 61,77 dB. L'andamento evidenzia un rumore di fondo stabile, compreso tra 55 e 70 dB, su cui si sovrappongono e susseguono alcuni picchi di breve durata, riconducibili a eventi di origine aeroportuale. In particolare si tratta di atterraggi di velivoli diversi dove il più rilevante è associato al volo con modello A321neo, che ha prodotto un livello massimo di 89,6 dB intorno alle 14:59:00. Anche gli altri picchi, con valori compresi tra 77 e 88 dB, presentano corrispondenze con i dati radar e sono quindi classificati come eventi aeroportuali, ciascuno identificabile con il proprio modello.

L'analisi evidenzia come, su scala oraria, il contributo aeroportuale si manifesti attraverso eventi isolati ma intensi, mentre il rumore ambientale ordinario mantiene livelli costanti inferiori di circa 20-25 dB rispetto ai picchi. Questo confronto consente di quantificare l'incidenza relativa del traffico aereo rispetto al rumore di fondo, fornendo una base oggettiva per la valutazione dell'impatto acustico complessivo dell'aeroporto.

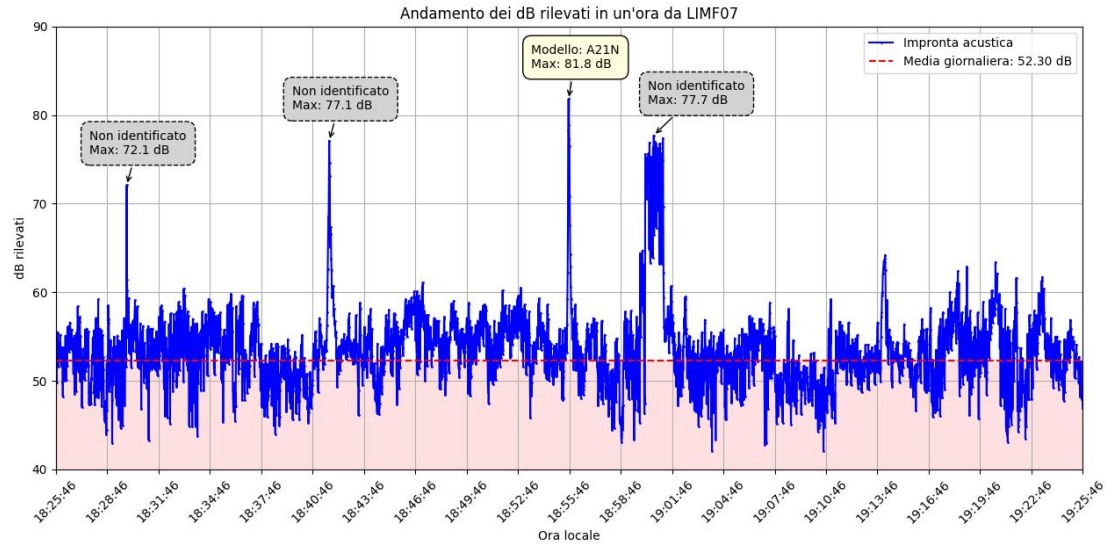


Figura 6.11: Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF07 per A321neo

Nell'evoluzione dei decibel registrati dalla centralina LIMF07 in un intervallo di un'ora, si alternano eventi acustici di origine aeroportuale e di origine non aeroportuale. In particolare, la linea blu rappresenta l'andamento dei decibel rilevati, mentre la linea rossa tratteggiata indica la media giornaliera, pari a 52,30 dB. L'andamento evidenzia un rumore di fondo variabile, compreso tra 45 e 60 dB, su cui si sovrappongono alcuni picchi di breve durata riconducibili a decolli. Tra questi, il più rilevante è associato al volo con modello A321neo, che ha prodotto un livello massimo di 81,8 dB intorno alle 18:55:46. Questo valore corrisponde a una fase di decollo e risulta coerente con le emissioni acustiche tipiche di un velivolo con spinta elevata, dove il contributo dominante è di natura propulsiva. Gli altri picchi, con valori massimi compresi tra 72 e 78 dB, non presentano corrispondenze radar e sono quindi classificati come eventi non identificati, probabilmente attribuibili a rumori di origine veicolare o a movimenti aerei militari o di voli di stato, che, per motivi legati alla normativa, non possono essere inclusi nell'ambito di questa analisi.

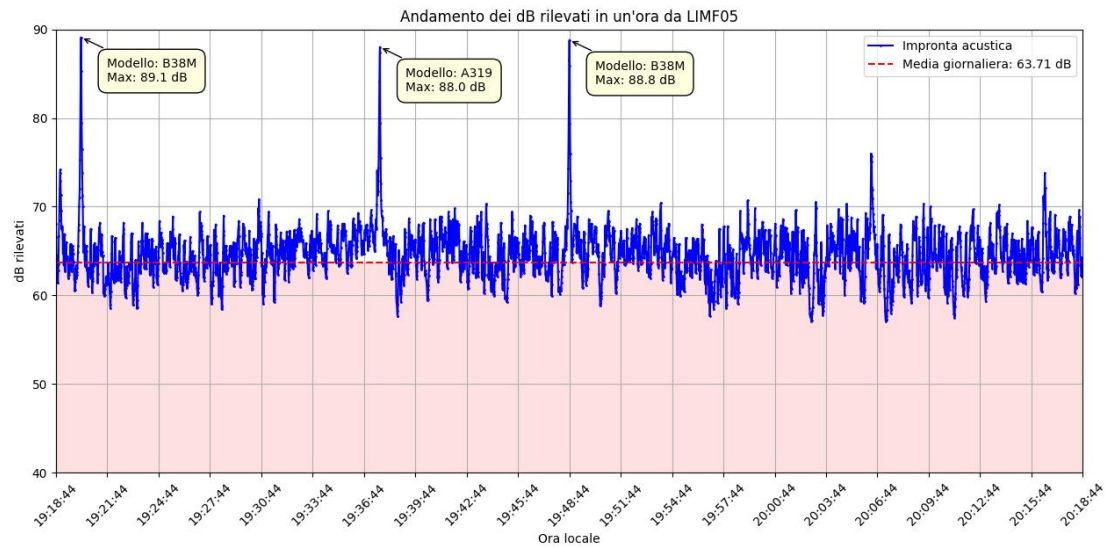


Figura 6.12: Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF05 per B737 MAX 8

Nell'evoluzione dei decibel registrati dalla centralina LIMF05 in un intervallo di un'ora, la linea rossa tratteggiata indica la media giornaliera, pari a 63,71 dB, mentre la linea blu rappresenta l'andamento dei decibel rilevati, evidenziando un rumore di fondo stabile compreso tra 60 e 70 dB. Su quest'ultimo si sovrappongono alcuni picchi di breve durata attribuibili ad atterraggi, dove il più rilevante è associato al volo con modello B737 MAX 8 che ha prodotto un livello massimo di 89,1 dB intorno alle 19:20:00. Anche gli altri picchi, con valori compresi intorno a 88 dB, presentano corrispondenze con i dati radar e sono quindi classificati come eventi aeroportuali, ciascuno identificabile con il proprio modello.

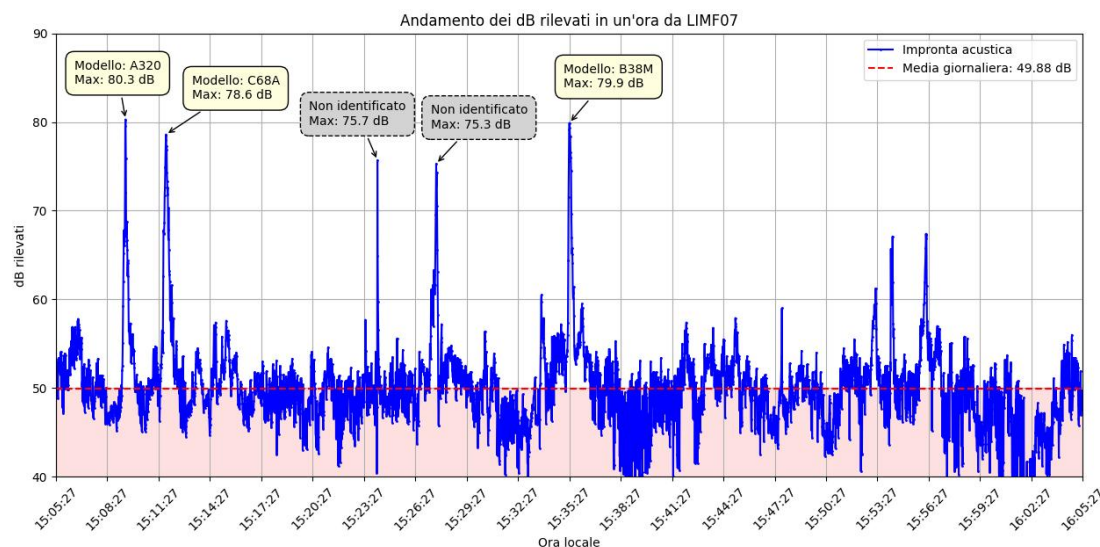


Figura 6.13: Andamento in un'ora dei dB rilevati da LIMF07 per B737 MAX 8

Nell'evoluzione dei decibel registrati dalla centralina LIMF07 in un intervallo di un'ora, si alternano eventi acustici di origine aeroportuale e di origine non aeroportuale. La linea rossa tratteggiata indica la media giornaliera, pari a 49,88 dB, e l'andamento generale evidenzia un rumore di fondo variabile, compreso tra 40 e 55 dB, su cui si sovrappongono alcuni picchi di breve durata riconducibili a decolli. Tra questi, il più rilevante è associato al volo con modello B737 MAX 8, che ha prodotto un livello massimo di 80,3 dB intorno alle 15:10:00. Gli altri picchi, con valori massimi compresi tra 75 e 80 dB, in alcuni casi presentano corrispondenze radar e sono quindi riportati con il modello corrispondente, mentre in altri casi come eventi non identificati non avendo nessuna corrispondenza.

Impronta acustica per tipologia di motore

L'obiettivo di questo formato di grafici è mostrare non solo i valori di decibel rilevati dalle diverse centraline, ma anche quali postazioni hanno registrato ciascun evento e in quale momento della fase di volo, che si tratti di un atterraggio o di un decollo. In questo modo è possibile ricostruire il percorso del velivolo sia dal punto di vista dell'impronta acustica ma anche dal punto di vista spaziale, nell'intorno e all'interno del sedime aeroportuale. L'analisi è stata condotta per le quattro tipologie di motori installati su aeromobili *narrow-body* analizzati nel Capitolo 3, considerando sia le condizioni di atterraggio sia quelle di decollo, così da confrontare le differenti configurazioni operative e i relativi effetti acustici.

Motore	Take-Off Thrust	Maximum Continuous Thrust
PW1133GA-JM ^[64]	147.28 kN (33110 lbf)	145.81 kN (32780 lbf)
V2533-A5 ^[66]	14056 daN	11987 daN
CFM56-7B26E ^[67]	11699 daN	11521 daN
LEAP-1B27 ^[65]	12471 daN	12131 daN

Tabella 6.1: Caratteristiche di spinta dei principali motori aeronautici per *narrow-body*

Per ricostruire l'andamento temporale dei livelli sonori, è stato realizzato uno script in Python che interroga il database MySQL con una query che filtra il dataset selezionando esclusivamente le osservazioni relative a un certo modello di aeromobile, data, callsign e matricola del velivolo. Per ogni record vengono estratte le informazioni di interesse, tra cui l'identificativo della centralina acustica, la data e ora locale, i valori di dB rilevati, il livello medio giornaliero di riferimento, il tipo di certificazione acustica ICAO e la natura del volo (P o A). I dati temporali vengono poi rielaborati per costruire una variabile datetime completa, combinando le colonne di data e orario in formato coerente, così da ottenere una rappresentazione grafica continua nel tempo.

La scelta del volo da analizzare è stato eseguito tramite un procedimento gerarchico basato sulla frequenza dei dati presenti nel database. In primo luogo, per ciascun modello di aeromobile è stata individuata la matricola con il maggior numero di occorrenze, ovvero quella più frequentemente registrata nel dataset. Successivamente, per la matricola individuata, si è effettuata una seconda ricerca al fine di determinare quale callsign fosse associato al numero più elevato di movimenti. Infine, per il callsign selezionato, è stata individuata la data con la maggiore frequenza di rilevazioni, così da individuare in modo sistematico il volo più rappresentativo e disporre di un campione rappresentativo e statisticamente significativo per ciascun tipo di aeromobile.



Figura 6.14: Rilevazioni dB per volo in atterraggio A21N, Chapter 14, Engine PW1133GA-JM

Nel caso di un Airbus A321neo, l'impronta acustica del volo in arrivo è stata rilevata dalle tre centraline LIMF04, LIMF05 e LIMF07 durante l'atterraggio. Il velivolo è equipaggiato con motori PW1133GA-JM, appartenenti alla famiglia dei Geared Turbofan di ultima generazione.

L'andamento temporale dei livelli sonori mostra un primo incremento per la centralina LIMF04, probabilmente non dovuto al passaggio del velivolo preso in considerazione perché quest'ultimo si trovava ancora a diversi chilometri di distanza dalla centralina LIMF04. Si tratta infatti della prima apparizione radar del volo, che è stata associata alla centralina acustica più vicina in quel momento, per questo motivo i valori iniziali non risultano pienamente significativi ai fini dell'analisi acustica. Successivamente, dopo una fase in cui il rumore rimane stabile e in linea con il valore medio di fondo, si osserva un aumento progressivo dei livelli sonori man mano che il velivolo si avvicina alla pista, fino a raggiungere il picco principale di circa 80 dB rilevato dalla centralina LIMF05, situata in prossimità dell'inizio della pista. Infine, la LIMF07 registra un picco secondario,

attribuibile alla fase di decelerazione e verosimilmente all'attivazione del *reverse thrust*, che genera un ulteriore contributo acustico localizzato ma intenso.

Tale distribuzione temporale e spaziale del segnale risulta coerente con la traiettoria di avvicinamento e conferma il legame diretto tra posizione delle centraline e dinamica di atterraggio. I livelli rilevati, inferiori a quelli di motori di generazioni precedenti, riflettono l'efficienza acustica dell'A321neo *Chapter 14* equipaggiato con il motore PW1133GA-JM, caratterizzato da un by-pass ratio elevato e una ridotta velocità del getto che contribuiscono a un notevole abbattimento del rumore percepito.



Figura 6.15: Rilevazioni dB per volo in atterraggio A321, Chapter 4, Engine V2533-A5

Nel caso di un Airbus A321, l'impronta acustica del volo è stata rilevata dalle tre centraline LIMF04, LIMF05 e LIMF07 durante l'atterraggio, dove il velivolo è equipaggiato con motori V2533-A5.

L'andamento temporale dei livelli sonori mostra un andamento oscillante per la centralina LIMF04, all'inizio probabilmente non dovuto al passaggio del velivolo preso in considerazione, perché quest'ultimo si trovava ancora a diversi chilometri di distanza dalla centralina LIMF04, e in seguito inferiore al valor medio. Successivamente si osserva una crescita progressiva dei livelli sonori man mano che il velivolo si avvicina alla pista, fino a raggiungere il picco principale di circa 87 dB rilevato dalla centralina LIMF05, situata in prossimità dell'inizio della pista. Infine, la LIMF07 registra un picco secondario, attribuibile alla fase finale dell'atterraggio. I livelli rilevati confermano il comportamento tipico dei turbofan ad alto by-pass di generazione precedente, che nel caso dell'A321 *Chapter 4* è il motore V2533-A5, il quale adotta diverse soluzioni di mitigazione del rumore come i silenziatori nei condotti e le pale di fan ottimizzate.

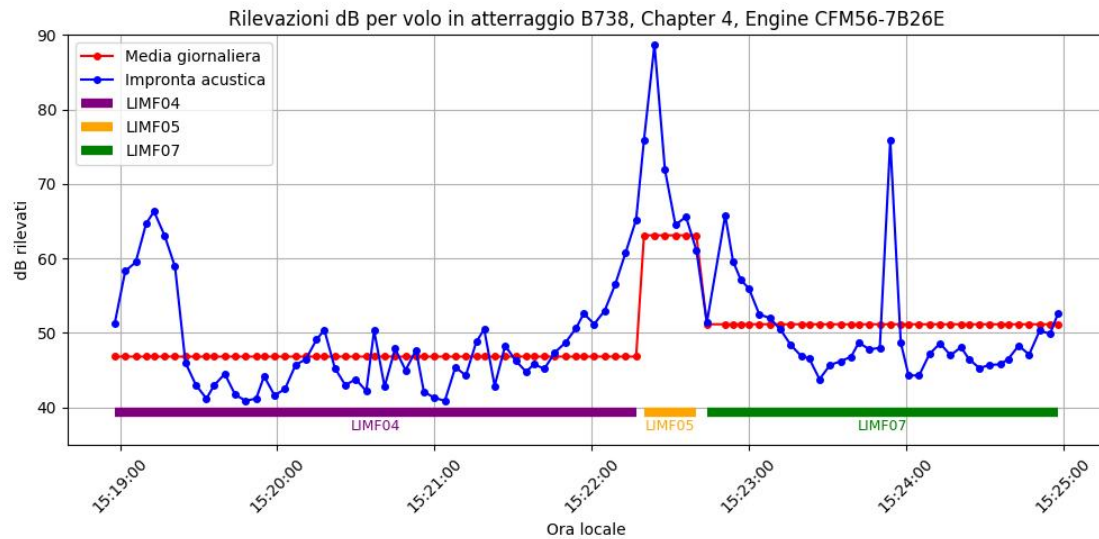


Figura 6.16: Rilevazioni dB per volo in atterraggio B738, Chapter 4, Engine CFM56-7B26E

Nel caso di un Boeing B737-800, l'impronta acustica del volo è stata rilevata dalle tre centraline LIMF04, LIMF05 e LIMF07 durante l'atterraggio, dove il velivolo è equipaggiato con motori CFM56-7B26E.

L'andamento temporale dei livelli sonori mostra un picco iniziale seguito da andamento oscillante per la centralina LIMF04, a cui segue un aumento repentino dei livelli sonori man mano che il velivolo si avvicina alla pista, che culmina nel picco principale di circa 90 dB rilevato dalla centralina LIMF05. Infine, la centralina LIMF07 registra un andamento inizialmente decrescente che tende poi a stabilizzarsi, all'interno del quale si distingue tuttavia un picco secondario di intensità elevata. Questo secondo piccolo, che raggiunge quasi gli 80 dB, è riconducibile alla riaccensione dei motori per la spinta inversa o all'interazione acustica con le superfici di frenata aerodinamica.

Il comportamento acustico complessivo è coerente con la configurazione del B737-800 *Chapter 4* equipaggiato con il motore CFM56-7B26E, un turbofan a medio-alto rapporto di by-pass che adotta *acoustic liners* e geometrie di fan ottimizzate per la riduzione del rumore.

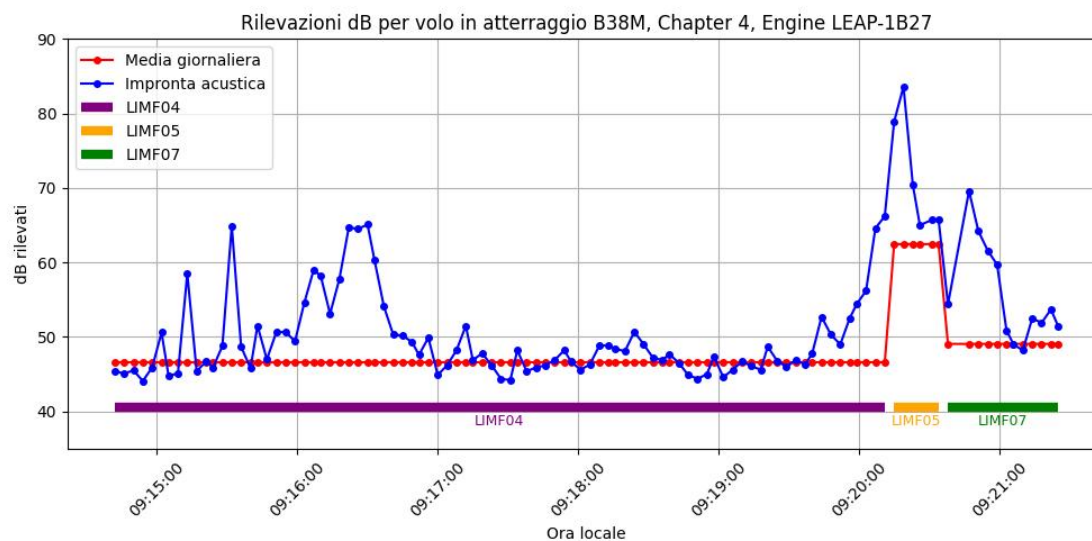


Figura 6.17: Rilevazioni dB per volo in atterraggio B38M, Chapter 4, Engine LEAP-1B27

Nel caso di un Boeing B737 MAX 8, l'impronta acustica del volo è stata rilevata dalle tre centraline LIMF04, LIMF05 e LIMF07 durante l'atterraggio, dove il velivolo è equipaggiato con motori LEAP-1B27.

L'andamento temporale dei livelli sonori mostra una fase iniziale fortemente oscillante per la centralina LIMF04, a cui segue un'evoluzione quasi costante e in linea con il valor medio dei livelli sonori man mano che il velivolo si avvicina alla pista. L'aumento che segue culmina nel picco principale di circa 84 dB rilevato dalla centralina LIMF05. Infine, la centralina LIMF07 registra un secondo picco a cui segue un andamento decrescente che tende a stabilizzarsi, coerente con l'allontanamento del velivolo dopo l'avvenuto contatto con la pista.

Tale distribuzione temporale e spaziale del segnale risulta coerente con la configurazione del B737 MAX 8 *Chapter 4* equipaggiato con il motore LEAP-1B27, un turbofan ad alto rapporto di by-pass caratterizzato dall'incremento del diametro del fan e dall'uso di liner fonoassorbenti.

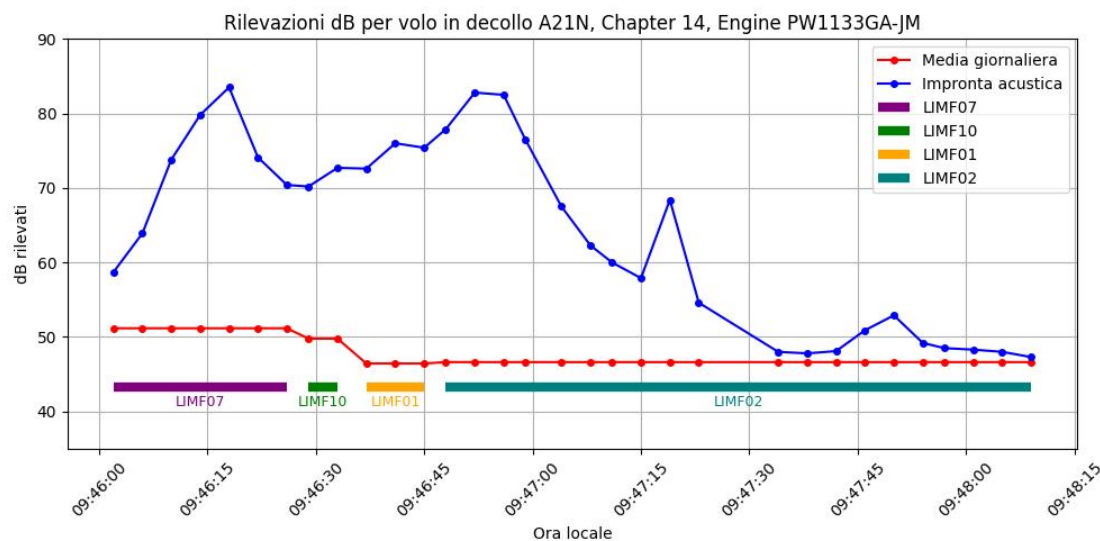


Figura 6.18: Rilevazioni dB per volo in decollo A21N, Chapter 14, Engine PW1133GA-JM

Nel caso di un Airbus A321neo, l'impronta acustica del volo in partenza è stata rilevata dalle quattro centraline LIMF07, LIMF10, LIMF01 e LIMF02 durante il decollo, dove il velivolo è equipaggiato con motori PW1133GA-JM.

L'andamento dei livelli sonori evidenzia un picco principale di circa 85 dB in corrispondenza della centralina LIMF07, collocata lateralmente in prossimità della pista, dove viene applicata la spinta massima per il take-off. Successivamente, i valori rilevati dalle centraline LIMF10 e LIMF01 tendono a diminuire per poi crescere nuovamente man mano che il velivolo prosegue il decollo e si allontana dal suolo, guadagnando quota. Dopo il picco, si osserva una progressiva attenuazione dei livelli sonori lungo la direzione di movimento del velivolo, come evidenziato dalle misure via via inferiori registrate dalla postazione LIMF02. Tale riduzione è attribuibile sia all'aumento della quota e della distanza dal punto di misura, sia alla diminuzione dell'intensità sonora con l'aumentare della distanza.

Rispetto al caso d'atterraggio, l'impronta acustica del decollo presenta una durata più breve, dovuta a un numero inferiore di ping radar registrati, e un picco più pronunciato, coerente con la fase di spinta massima dei motori. Nonostante al decollo venga generata una notevole emissione acustica dovuta all'elevata velocità del getto di scarico, i livelli complessivi risultano contenuti, grazie alle caratteristiche tecnologiche del motore PW1133GA-JM, che equipaggia l'A321neo Chapter 14.

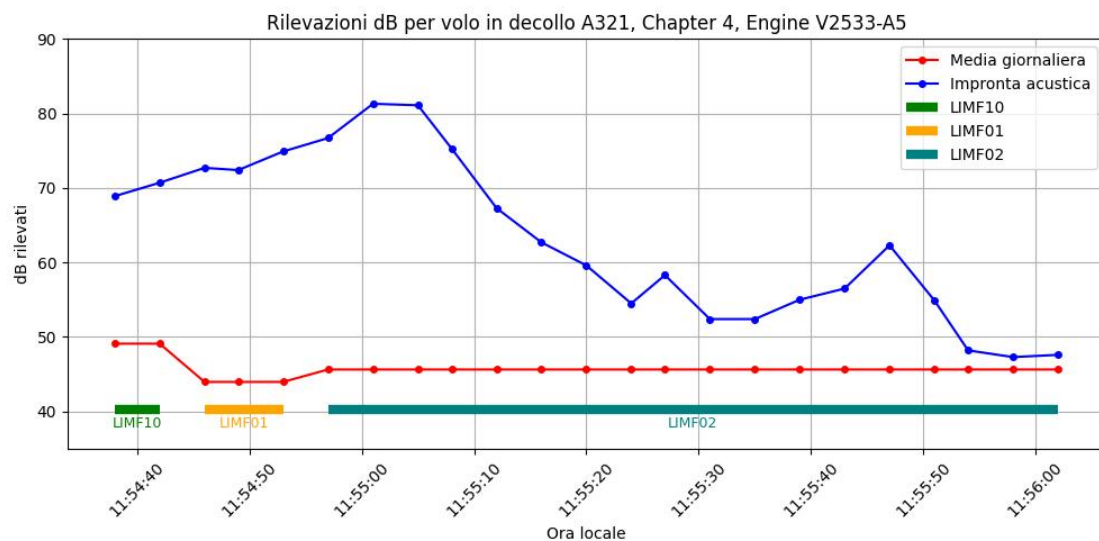


Figura 6.19: Rilevazioni dB per volo in decollo A321, Chapter 4, Engine V2533-A5

Nel caso di un Airbus A321, l'impronta acustica del volo in partenza è stata rilevata dalle tre centraline LIMF10, LIMF01 e LIMF02 durante il decollo, dove il velivolo è equipaggiato con motori V2533-A5.

L'andamento dei livelli sonori evidenzia una crescita sostenuta rilevata dalle centraline LIMF10 e LIMF01 fino a un picco principale di circa 82 dB in corrispondenza della centralina LIMF02. Successivamente, i valori rilevati tendono a diminuire gradualmente per poi aumentare di poco man mano che il velivolo si allontana, in termini di quota e di distanza. I livelli complessivi risultano contenuti grazie alle caratteristiche tecnologiche del motore V2533-A5, che equipaggia l'A321 Chapter 4.

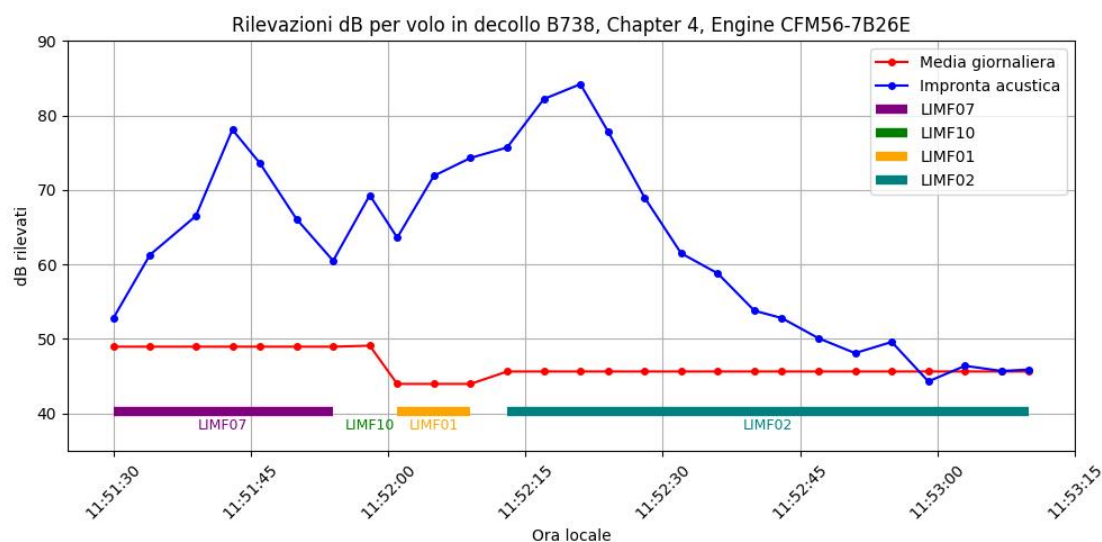


Figura 6.20: Rilevazioni dB per volo in decollo B738, Chapter 4, Engine CFM56-7B26E

Nel caso di un Boeing B737-800, l'impronta acustica del volo in partenza è stata rilevata dalle quattro centraline LIMF07, LIMF10, LIMF01 e LIMF02 durante il decollo, dove il velivolo è equipaggiato con motori CFM56-7B26E.

L'andamento dei livelli sonori evidenzia un picco iniziale di circa 80 dB in corrispondenza della centralina LIMF07, collocata lateralmente in prossimità della pista, dove viene applicata la spinta massima per il take-off. Successivamente, i valori rilevati dalle centraline LIMF10 e LIMF01 tendono a crescere man mano che il velivolo guadagna quota fino a raggiungere un secondo picco più elevato, di circa 85 dB, registrato dalla postazione LIMF02. Dopo il picco, si osserva una progressiva attenuazione dei livelli sonori lungo la direzione di movimento del velivolo, come evidenziato dalle misure via via inferiori che tendono al valor medio giornaliero. I livelli complessivi risultano contenuti grazie alle caratteristiche tecnologiche del motore CFM56-7B26E, che equipaggia il B737-800 *Chapter 4*.

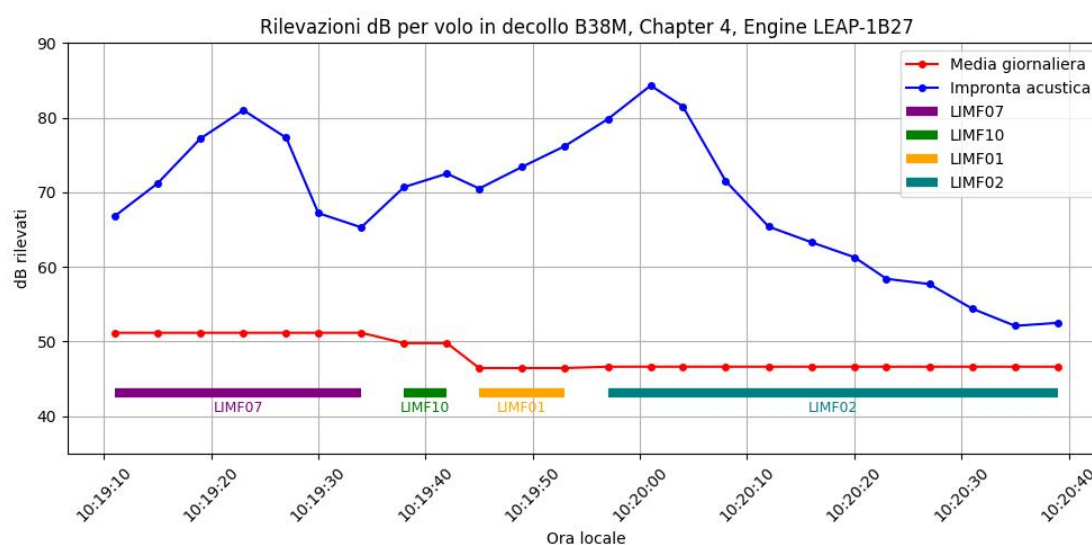


Figura 6.21: Rilevazioni dB per volo in decollo B38M, Chapter 4, Engine LEAP-1B27

Nel caso di un Boeing B737 MAX 8, l'impronta acustica del volo in partenza è stata rilevata dalle quattro centraline LIMF07, LIMF10, LIMF01 e LIMF02 durante il decollo, dove il velivolo è equipaggiato con motori LEAP-1B27.

L'andamento dei livelli sonori evidenzia un picco iniziale di circa 80 dB in corrispondenza della centralina LIMF07, successivamente i valori rilevati dalle centraline LIMF10 e LIMF01 tendono a crescere man mano che il velivolo guadagna quota fino a raggiungere un secondo picco più elevato, di circa 85 dB, registrato dalla postazione LIMF02. Dopo il picco, si osserva una diminuzione progressiva dei livelli sonori lungo la direzione di movimento del velivolo, come evidenziato dalle misure via via inferiori che tendono asintoticamente al valor medio giornaliero. I livelli complessivi risultano contenuti grazie alle caratteristiche tecnologiche del motore LEAP-1B27, che equipaggia il B737 MAX 8 *Chapter 4*.

Antonov A124

Tra i vari aeromobili analizzati, particolare attenzione è stata dedicata all'Antonov A124, un velivolo da trasporto strategico *Chapter 3* equipaggiato con quattro motori turbofan Lotarev D-18T. La scelta di analizzare questo velivolo risiede nel fatto che, in via eccezionale, lo scalo di

Torino può accogliere aeromobili di codice F, sebbene tale possibilità sia attualmente limitata ai soli Boeing 747-8I/F e Antonov An-124, come stabilito dalla procedura interna PO18. L'analisi di quest'ultimo risulta quindi di interesse per la valutazione dell'impatto acustico di operazioni rare ma potenzialmente significative per l'ambiente sonoro aeroportuale.

Lo studio è stato condotto considerando due configurazioni operative distinte: l'atterraggio, monitorato attraverso i dati registrati dalla centralina LIMF05, posizionata in prossimità dell'inizio della pista di arrivo, e il decollo, rilevato dalla centralina LIMF01, situata lungo la traiettoria di partenza dei velivoli.



Figura 6.22: Andamento dei dB rilevati da LIMF05 per atterraggio Antonov A124 Chapter 3

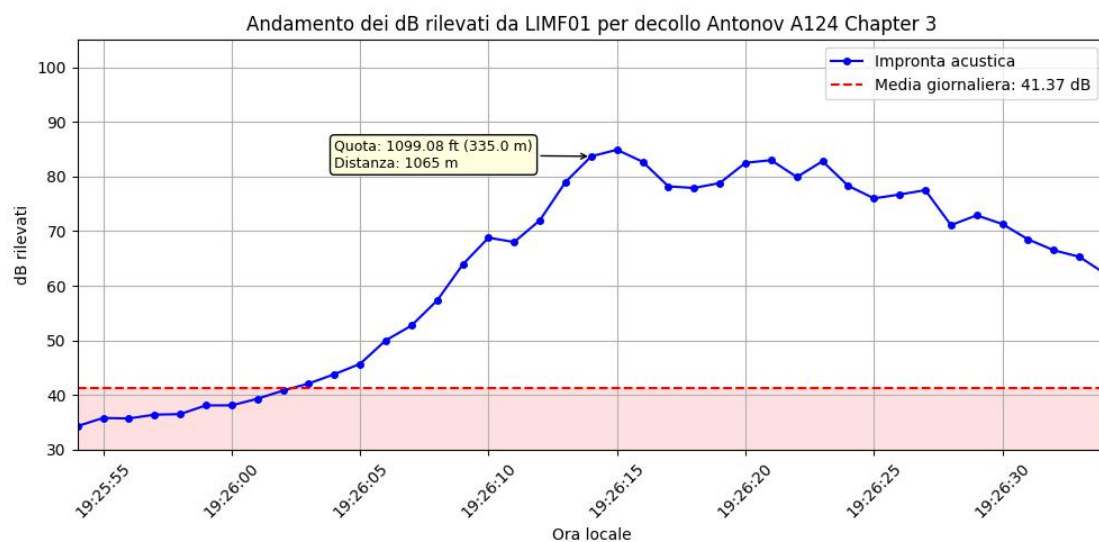


Figura 6.23: Andamento dei dB rilevati da LIMF01 per decollo Antonov A124 Chapter 3

Elicottero A139

Un ulteriore caso di studio ha riguardato l'AgustaWestland A139, elicottero multiruolo Chapter 3 equipaggiato con due motori Pratt & Whitney Canada PT6C-67C, impiegato per missioni civili, di soccorso e trasporto executive. L'interesse verso questo aeromobile nasce dal fatto che l'Aeroporto di Torino-Caselle ospita regolarmente operazioni di elicotteri, pertanto è utile la valutazione del loro contributo al clima acustico complessivo, esplorando il comportamento acustico di una piattaforma a rotore rispetto a quella ad ala fissa.

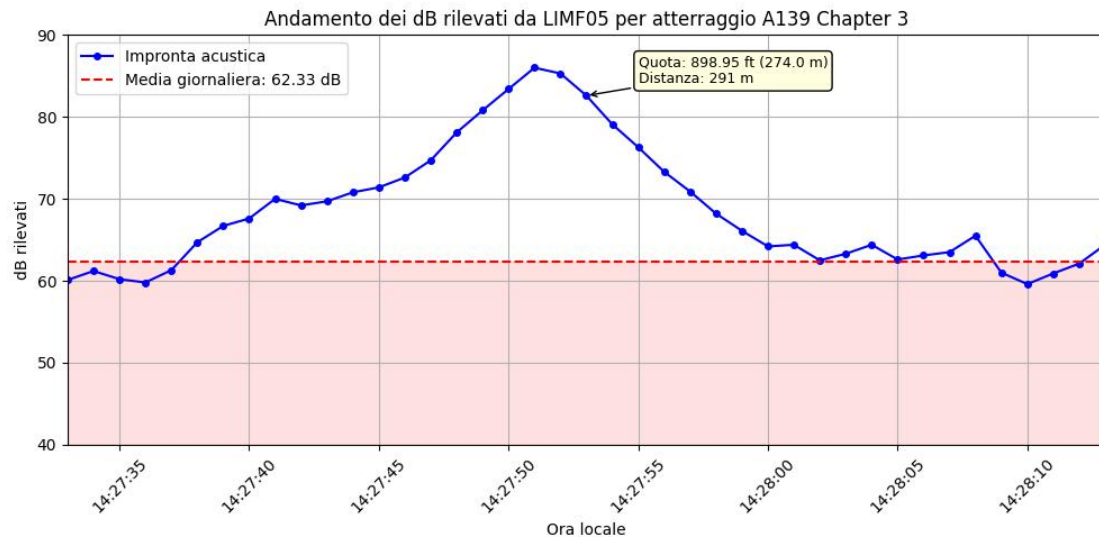


Figura 6.24: Andamento dei dB rilevati da LIMF05 per atterraggio A139 Chapter 3

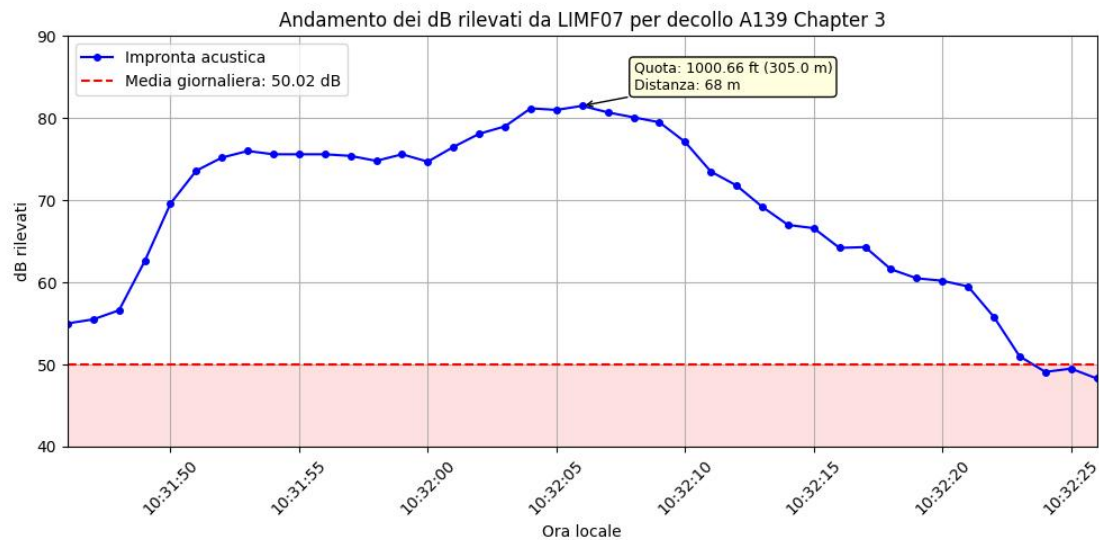


Figura 6.25: Andamento dei dB rilevati da LIMF07 per decollo A139 Chapter 3

6.3.3 Confronto tra velivoli appartenenti alla classe ICAO C

Il confronto tra aeromobili appartenenti alla stessa classe ICAO **C** è stato condotto con l'obiettivo di valutare i benefici acustici associati alle certificazioni più recenti, in particolare lo stesso standard *Chapter 4* ma per velivoli di ultima generazione e il passaggio dallo standard *Chapter 4* a *Chapter 14*, all'interno della medesima categoria di velivoli a getto subsonici impiegati nell'aviazione commerciale. L'analisi si è focalizzata su questa classe per via della sua netta predominanza in quanto rappresenta la quasi totalità dei movimenti aerei, coerentemente con la configurazione infrastrutturale dell'aeroporto di Torino e con il tipo di traffico prevalentemente commerciale.

Lo studio ha riguardato i seguenti confronti tra aeromobili della stessa classe ICAO **C**: Boeing 737-800 *Chapter 4* vs B737 MAX 8 *Chapter 4* e A320neo *Chapter 14* vs A320 *Chapter 4*. Per ciascun confronto, i decibel rilevati sono stati rappresentati in funzione del tempo, considerando come istante di riferimento $t = 0$ s il momento corrispondente al picco massimo registrato sul database per quel volo. Sono stati quindi analizzati i 30 secondi precedenti e i 30 secondi successivi al picco, per un intervallo totale di un minuto, al fine di catturare l'andamento completo dell'impronta acustica attorno alla fase più critica del volo. Tutti i profili acustici sono stati acquisiti in condizioni meteorologiche equivalenti, come indicato nella legenda del grafico, in modo da garantire la comparabilità diretta delle emissioni sonore tra i diversi aeromobili. Questa procedura permette di isolare le differenze legate esclusivamente alle caratteristiche delle certificazioni acustiche, minimizzando l'influenza di fattori ambientali esterni.

Studio del Boeing 737-800 *Chapter 4* vs Boeing 737 MAX 8 *Chapter 4*

I seguenti grafici confrontano le impronte acustiche di due Boeing 737, in un caso -800 e nell'altro MAX 8, in decollo o in atterraggio, per la stessa certificazione acustica ICAO: la linea blu rappresenta il modello 737-800 *Chapter 4* mentre quella rossa tratteggiata il modello 737 MAX 8 *Chapter 4*. Le condizioni meteorologiche al momento della rilevazione sono le stesse e ciò garantisce l'omogeneità del confronto.

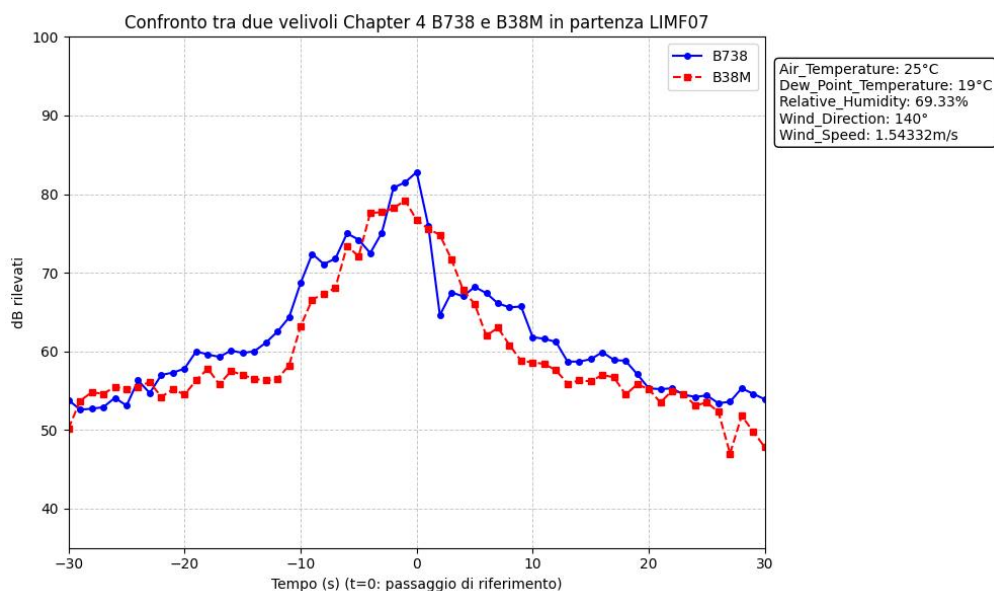


Figura 6.26: Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in partenza LIMF07

Entrambi i profili mostrano l'andamento tipico del decollo rilevato dalla centralina LIMF07, collocata lateralmente in prossimità della pista: una fase iniziale stabile attorno ai 55 dB, una rapida crescita del livello sonoro con l'aumento della spinta e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come il B738-800 presenta livelli sonori più elevati in quasi tutta la fase di decollo, con un picco massimo di circa 82 dB in corrispondenza di $t = 0$ s, mentre il B738 MAX 8 si attesta su valori mediamente inferiori, di 2-3 dB lungo l'intero andamento. Questa differenza è coerente con il progresso tecnologico dei motori e con l'evoluzione delle soluzioni aerodinamiche introdotte nella nuova generazione di 737, per cui, nonostante entrambi i velivoli siano certificati *Chapter 4* e rispettano gli stessi limiti massimi normativi ICAO, hanno emissioni sonore diverse legate ai motori, all'aerodinamica e ai profili operativi.

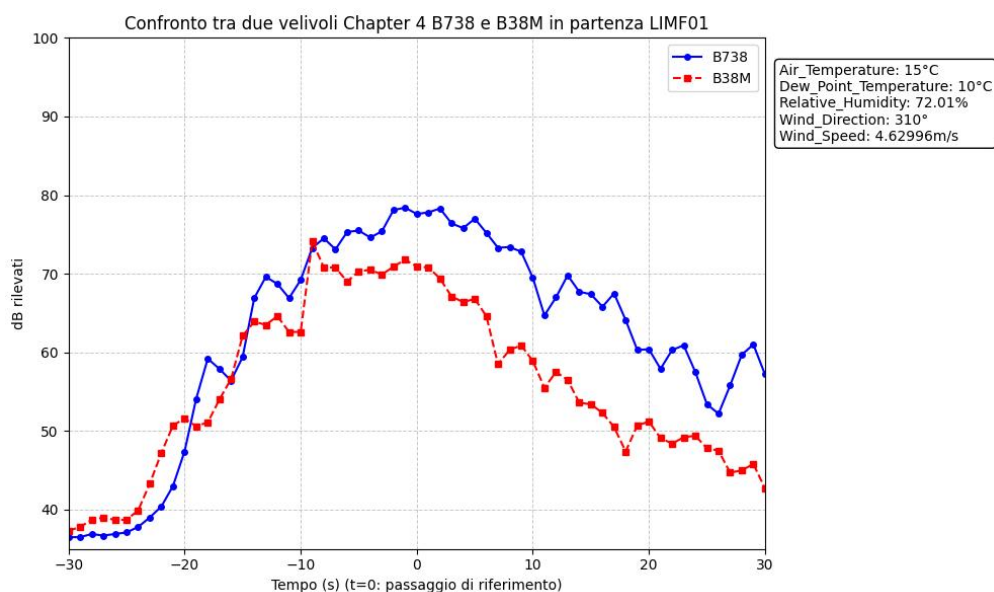


Figura 6.27: Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in partenza LIMF01

Anche in questo caso, entrambi i profili mostrano l'andamento tipico del decollo rilevato dalla centralina LIMF01, la prima centralina che si incontra a Nord della RWY36: una breve fase iniziale stabile tra i 35 e i 40 dB, una crescita repentina del livello sonoro con l'aumento della spinta e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come il B738-800 presenta livelli sonori più elevati in quasi tutta la fase di decollo, con un picco massimo di circa 80 dB in corrispondenza di $t = 0$ s, mentre il B738 MAX 8 si attesta su valori mediamente inferiori, di pochi dB all'inizio ma progressivamente di più col passare dei secondi. Questa differenza è coerente con il fatto che, nonostante entrambi i velivoli siano certificati *Chapter 4* e rispettano gli stessi limiti massimi normativi ICAO, hanno emissioni sonore diverse legate ai motori, all'aerodinamica e ai profili operativi.

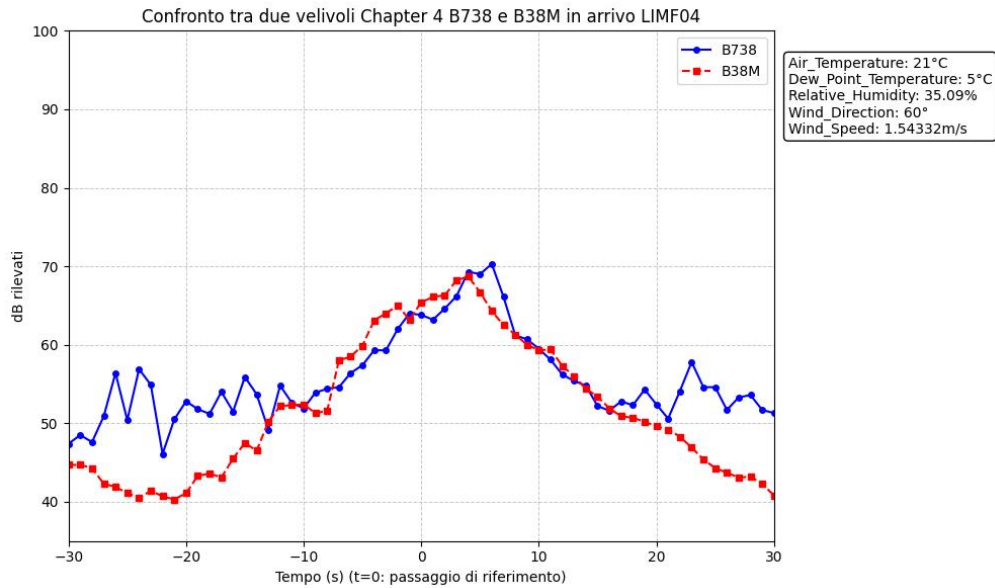


Figura 6.28: Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in arrivo LIMF04

Entrambi i profili mostrano l'andamento tipico dell'atterraggio rilevato dalla centralina LIMF04, la prima centralina che si incontra a Sud della RWY36: una fase iniziale poco stabile, una rapida crescita del livello sonoro con il diminuire della quota e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come il B738-800 presenta livelli sonori più elevati del B738 MAX 8 negli istanti prima e dopo il picco, che raggiunge un massimo di circa 70 dB in corrispondenza di $t = 5$ s, mentre nella zona centrale i due andamenti sembrano sovrapporsi. In questo caso si osservano valori massimi di livello sonoro tra loro confrontabili, ma il disturbo complessivo risulta di durata inferiore per il B737 MAX 8 dove l'emissione acustica è ugualmente intensa ma più concentrata nel tempo, mentre il B737-800 mostra livelli sonori elevati anche nei momenti precedenti e successivi al picco principale.

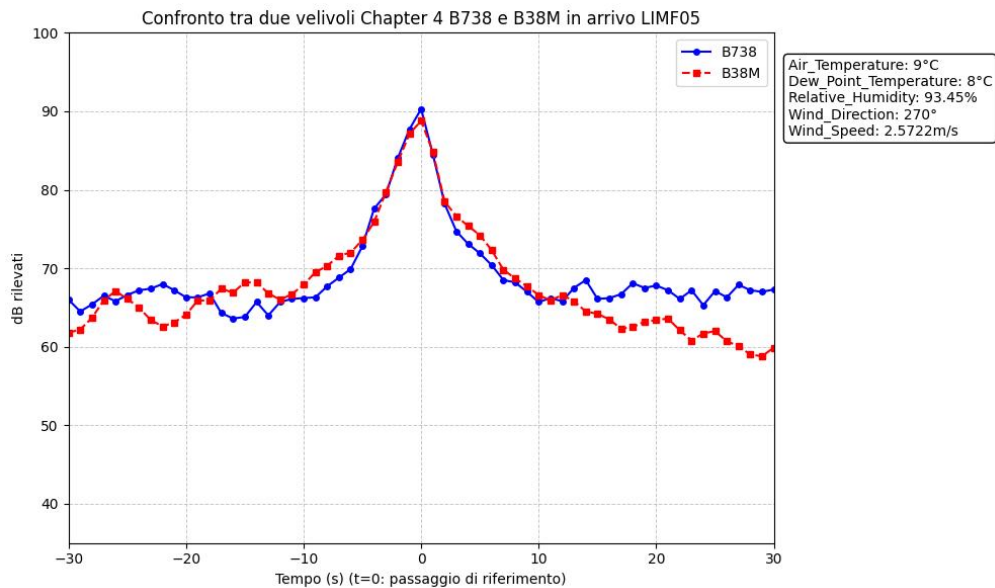


Figura 6.29: Confronto tra due velivoli Chapter 4 B738 e B38M in arrivo LIMF05

Anche in questo caso, entrambi i profili mostrano l'andamento tipico dell'atterraggio rilevato dalla centralina LIMF05, la centralina immediatamente prima dell'inizio della RWY36: una fase iniziale oscillante tra i 60 e i 70 dB, una crescita repentina del livello sonoro e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come il B738-800 raggiunge un picco massimo di 90 dB in corrispondenza di $t = 0$ s, mentre il B738 MAX 8 si attesta su valori mediamente inferiori tranne nell'intorno del picco, dove i due andamenti sembrano sovrapporsi.

Studio dell'Airbus A320 Chapter 4 vs Airbus A320neo Chapter 14

I seguenti grafici confrontano le impronte acustiche di due Airbus A320, in un caso "classico" e nell'altro neo, in decollo o in atterraggio, differenziati per la certificazione acustica ICAO: la linea blu rappresenta il modello A320 "classico" Chapter 4 mentre quella rossa tratteggiata il modello A320neo Chapter 14. Le condizioni meteorologiche al momento della rilevazione sono le stesse e ciò garantisce l'omogeneità del confronto.

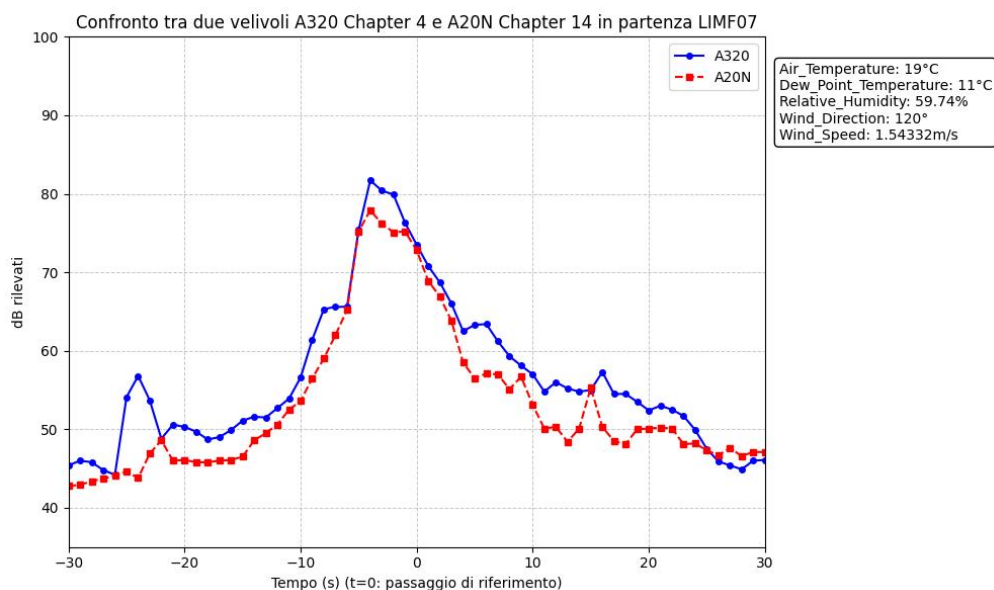


Figura 6.30: Confronto tra due velivoli A320 e A20N in partenza LIMF07

Entrambi i profili mostrano l'andamento tipico del decollo rilevato dalla centralina LIMF07, collocata lateralmente in prossimità della pista: una fase iniziale stabile attorno ai 45 dB, seppure con qualche oscillazione nel caso dell'A320, una rapida crescita del livello sonoro con l'aumento della spinta e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come l'A320 *Chapter 4* presenta livelli sonori più elevati in quasi tutta la fase di decollo, con un picco massimo di circa 82 dB in corrispondenza di $t = -4$ s, mentre l'A320neo *Chapter 14* si attesta su valori mediamente inferiori, di pochi dB nelle immediate vicinanze del picco e in modo più marcato nelle fasi precedenti e successive. Tale riduzione è coerente con l'introduzione di motori più silenziosi, fan più grandi e miglioramenti aerodinamici, mirati a ridurre il rumore complessivamente emesso dal velivolo. Il confronto evidenzia in modo netto l'efficacia della transizione normativa dal *Chapter 4* al *Chapter 14*, che ha comportato una diminuzione percepibile del rumore al suolo.

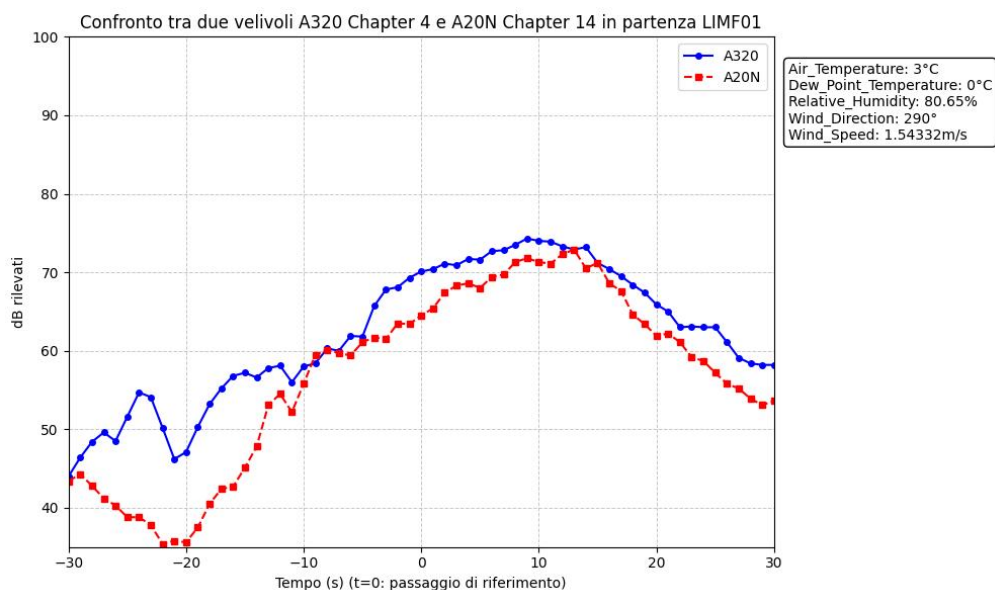


Figura 6.31: Confronto tra due velivoli A320 e A20N in partenza LIMF01

Anche in questo caso, entrambi i profili mostrano l'andamento tipico del decollo rilevato dalla centralina LIMF01, la prima centralina che si incontra a Nord della RWY36: una crescita progressiva del livello sonoro con l'aumento della spinta e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come l'A320 *Chapter 4* presenta livelli sonori più elevati in quasi tutta la fase di decollo, con un picco massimo di circa 75 dB in corrispondenza di $t = 10$ s, mentre l'A320neo *Chapter 14* si attesta su valori mediamente inferiori, di pochi dB lungo l'intero andamento tranne nella parte iniziale caratterizzata da una differenza più accentuata. Tale riduzione è coerente con la transizione normativa dal *Chapter 4* al *Chapter 14*.

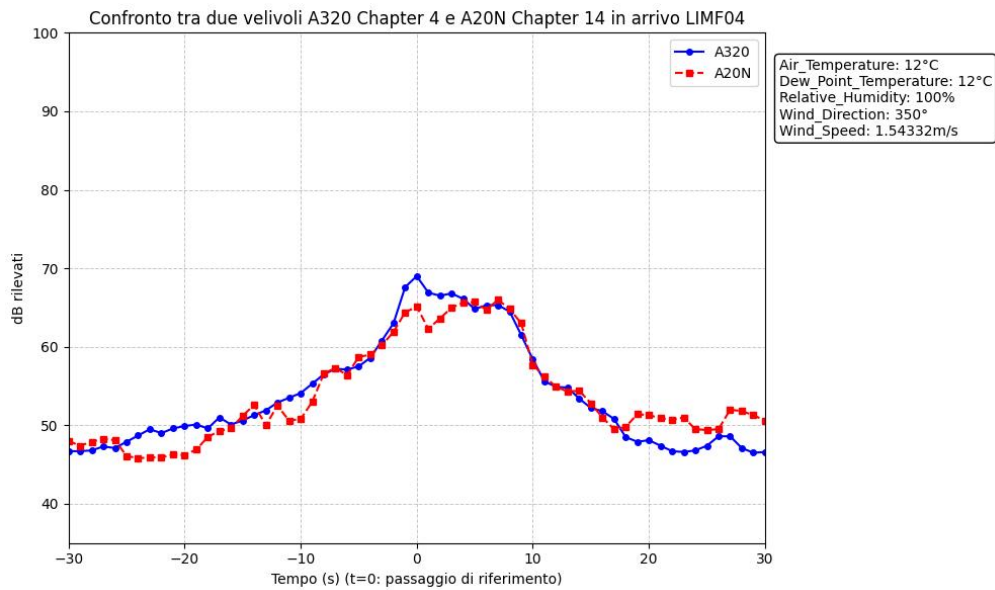


Figura 6.32: Confronto tra due velivoli A320 e A20N in arrivo LIMF04

Entrambi i profili mostrano l'andamento tipico dell'atterraggio rilevato dalla centralina LIMF04, la prima centralina che si incontra a Sud della RWY36: una fase iniziale stabile tra i 45 e i 50 dB, una rapida crescita del livello sonoro con il diminuire della quota e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come l'A320 *Chapter 4* raggiunge un picco massimo di circa 70 dB in corrispondenza di $t = 0$ s, mentre l'A320neo *Chapter 14* si attesta su valori mediamente inferiori, ma i due andamenti sembrano sovrapporsi in alcune fasi precedenti e successive al picco.

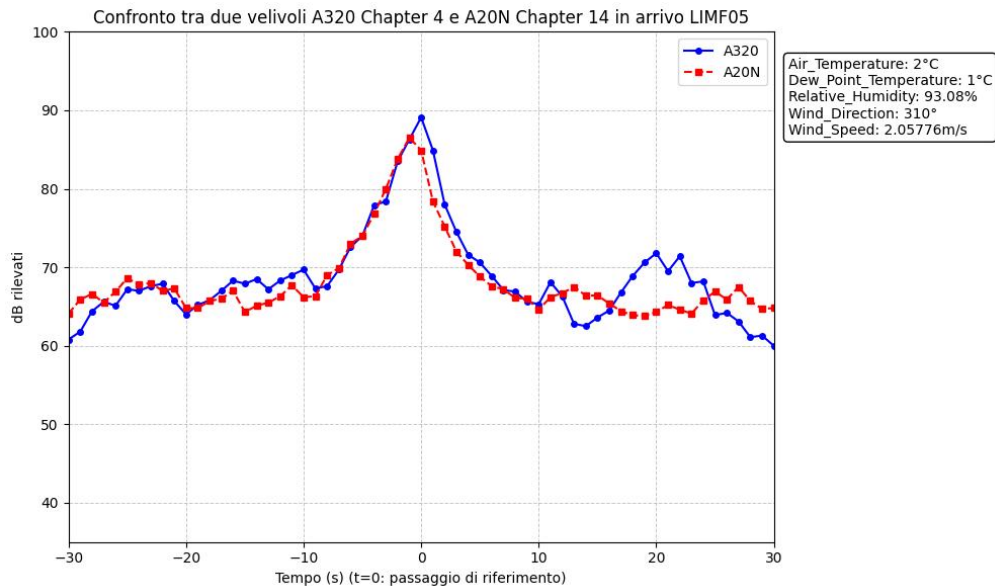


Figura 6.33: Confronto tra due velivoli A320 e A20N in arrivo LIMF05

Anche in questo caso, entrambi i profili mostrano l'andamento tipico dell'atterraggio rilevato dalla centralina LIMF05, la centralina immediatamente prima dell'inizio della RWY36: una fase iniziale quasi stabile tra i 60 e i 70 dB, una crescita repentina del livello sonoro e una decrescita graduale man mano che il velivolo si allontana dalla centralina. In particolare, si osserva come l'A320 *Chapter 4* presenta livelli sonori più elevati in quasi tutta la fase di decollo, con un picco massimo di quasi 90 dB in corrispondenza di $t = 0$ s, mentre l'A320neo *Chapter 14* si attesta su valori mediamente inferiori tranne nell'intorno del picco, dove i due andamenti sembrano sovrapporsi.

6.3.4 Confronto tra velivoli appartenenti a classi ICAO differenti

Il confronto tra velivoli appartenenti a classi ICAO differenti è stato svolto per comprendere come le dimensioni del velivolo, la categoria acustica e la tipologia di motore installato influenzino i livelli di rumore generati durante le fasi di decollo o atterraggio. Analizzare aeromobili appartenenti a classi diverse consente infatti di mettere in evidenza le differenze prestazionali e acustiche tra modelli di diversa massa e spinta propulsiva, permettendo inoltre di verificare come l'introduzione di motori più efficienti e di velivoli conformi a capitoli acustici più recenti contribuiscano alla riduzione delle emissioni sonore.

Lo studio ha riguardato i seguenti confronti tra aeromobili di diverse classi ICAO: un B737-800, *Chapter 4* e Code **C**, e un B767-300, *Chapter 3* e Code **D**; un A320, *Chapter 4* e Code **C**, e un A330, *Chapter 4* e Code **E**; un B737-800, *Chapter 4* e Code **C**, un B747-800, *Chapter 4* e Code **F**, e un B767-300, *Chapter 3* e Code **D**; un B747-8, *Chapter 4* e Code **F**, e l'Antonov An-124, *Chapter 3* e Code **F**. Per ciascun confronto, si è seguita la stessa logica utilizzata nello studio di velivoli appartenenti alla classe ICAO **C**: considerando il momento corrispondente al picco massimo registrato nel database per ciascun volo come istante di riferimento $t = 0$ s, sono stati rappresentati i decibel rilevati nei 30 secondi precedenti e nei 30 secondi successivi al picco, per un intervallo totale di un minuto.

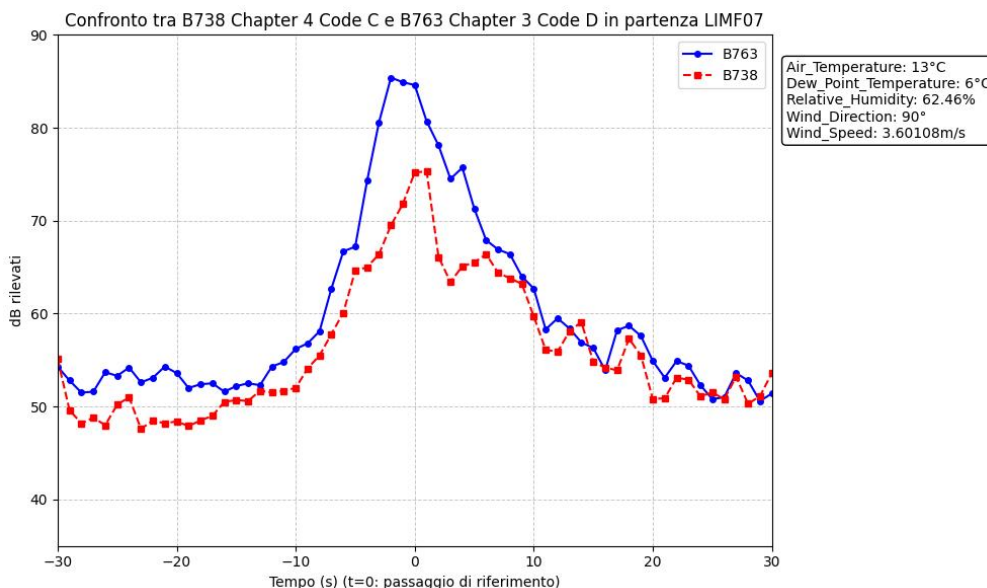


Figura 6.34: Confronto tra due velivoli B738 e B763 in partenza LIMF07

Nel grafico è riportato il confronto tra un B737-800, *Chapter 4* e Code **C**, e un B767-300, *Chapter 3* e Code **D**, in fase di decollo rilevati dalla centralina LIMF07. Entrambi i profili sono stati acquisiti in condizioni meteorologiche equivalenti, come indicato nel riquadro laterale, in modo da rendere confrontabili le emissioni sonore dei due aeromobili.

Si osserva come il B763, appartenente a una classe superiore Code **D** e certificato secondo lo standard *Chapter 3*, generi livelli sonori mediamente più elevati lungo tutto il profilo temporale rispetto al B738, di classe inferiore Code **C** e certificato *Chapter 4*. Il picco massimo raggiunge circa 85 dB per il B763, contro circa 75 dB per il B738: la diversa intensità sonora è coerente con il maggiore MTOW e quindi la maggiore spinta necessaria al decollo del B763, che determinano un flusso propulsivo e quindi un rumore più marcato. Un'altra grande differenza tra i due aeromobili è il rapporto di by-pass più elevato e le soluzioni di mitigazione acustica integrate del B738, assieme a un'aerodinamica più efficiente e una struttura alleggerita. Per questi motivi, il B738, che appartiene a una categoria più recente *Chapter 4*, mostra un andamento più contenuto, indice di un minor impatto acustico complessivo.

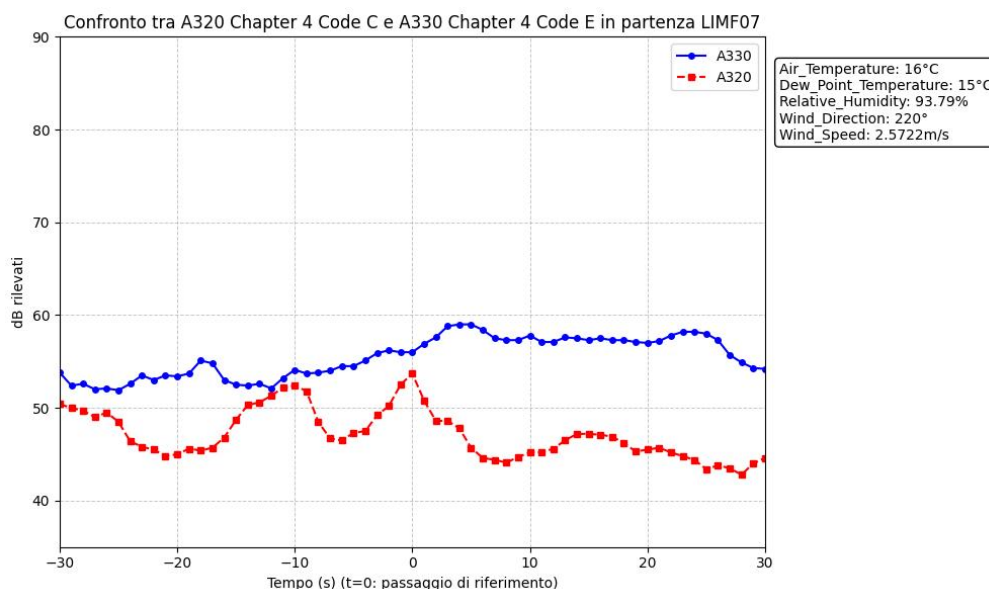


Figura 6.35: Confronto tra due velivoli A320 e A330 in partenza LIMF07

Nel grafico è riportato il confronto tra un A320, *Chapter 4* e Code **C**, e un A330, *Chapter 4* e Code **E**, in fase di decollo rilevati dalla centralina LIMF07. Entrambi i profili sono stati acquisiti in condizioni meteorologiche equivalenti, come indicato nel riquadro laterale, in modo da rendere confrontabili le emissioni sonore dei due aeromobili.

Nonostante siano entrambi conformi al *Chapter 4*, la differenza di dimensioni e di potenza si traduce in un significativo scostamento nei decibel registrati. Il profilo del Boeing A330 mostra valori mediamente più elevati, compresi tra i 55 e i 60 dB, con un andamento piuttosto regolare e un picco poco accentuato nella zona centrale del grafico. Il Boeing A320, invece, si mantiene su livelli inferiori di circa 8-10 dB rispetto all'A330, con oscillazioni più marcate e un picco massimo intorno ai 53 dB. Questa differenza è coerente con il maggiore MTOW e la maggiore spinta erogata al decollo dell'A330, che essendo un *wide-body* a lungo raggio richiede una potenza superiore e produce un getto più energetico e quindi rumoroso. Pur appartenendo entrambi a una generazione di aeromobili con sistemi di mitigazione acustica avanzati, il profilo dell'A330 mostra un profilo

più regolare e prolungato mentre l'A320 ha un andamento più irregolare ma complessivamente più basso, riflettendo una fase di decollo più rapida e meno rumorosa.

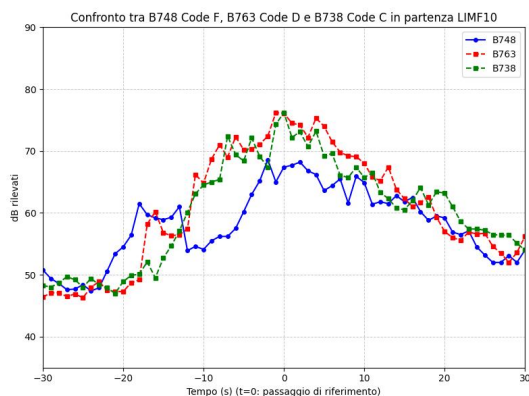


Figura 6.36: Confronto tra tre velivoli B748, B763 e B738 in partenza LIMF10

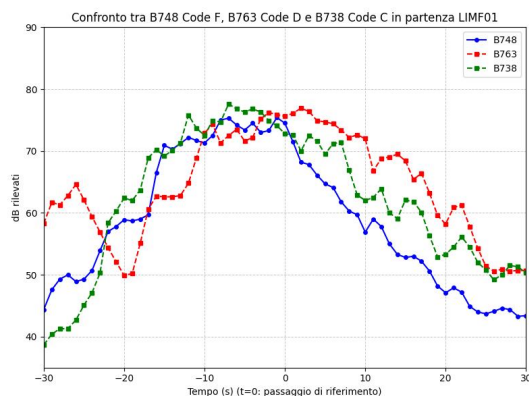


Figura 6.37: Confronto tra tre velivoli B748, B763 e B738 in partenza LIMF01

Nei grafici è riportato il confronto tra un B737-800, *Chapter 4* e Code **C**, un B747-800, *Chapter 4* e Code **F**, e un B767-300, *Chapter 3* e Code **D**, in fase di decollo, rilevati dalle centraline LIMF10 e LIMF01. I tre profili sono stati acquisiti in condizioni meteorologiche molto simili ma non identiche, per cui si può assumere che le emissioni sonore dei tre aeromobili siano tra loro confrontabili.

L'andamento generale dei tre profili mostra una struttura affine, con una fase iniziale di aumento del livello sonoro, un picco principale in corrispondenza del passaggio del velivolo nell'intorno della verticale della centralina e una successiva fase di attenuazione. Tuttavia, si notano alcune differenze significative tra i tre modelli:

- il B763 presenta valori mediamente più elevati e un'impronta acustica caratterizzata da un intervallo di valori alti più esteso, segno di un'emissione sonora intensa e prolungata;
- il B738 mostra un comportamento analogo ma leggermente attenuato, dove il picco principale è di entità simile, tuttavia la fase di discesa risulta più rapida, con una riduzione di diversi dB. Ciò evidenzia un livello sonoro complessivamente elevato ma di durata inferiore rispetto al B763;
- il B748, pur essendo un velivolo di categoria superiore Code F quindi più grande, presenta un profilo più contenuto in termini di dB, con valori mediamente inferiori ai due precedenti. Questo evidenzia l'efficacia delle tecnologie di riduzione del rumore adottate sui motori e sulle strutture aerodinamiche di nuova generazione.

Nonostante le dimensioni e la categoria superiore, il Boeing 747-800 presenta livelli di emissione sonora complessivamente inferiori rispetto al Boeing 767-300 e il Boeing 737-800, grazie all'impiego dei motori di nuova generazione GENx-2B e a un profilo aerodinamico ottimizzato. Infatti, pur avendo quattro motori, il B748 non è proporzionalmente più rumoroso e questo evidenzia come l'evoluzione tecnologica dei propulsori e delle configurazioni strutturali consenta di ridurre significativamente l'impatto acustico, anche per aeromobili di maggiore massa e potenza.

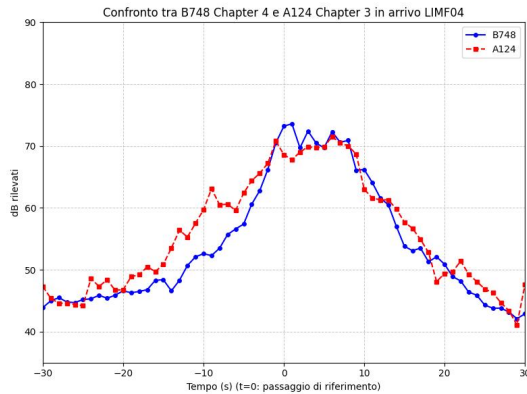


Figura 6.38: Confronto tra due velivoli B748 e A124 in arrivo LIMF04

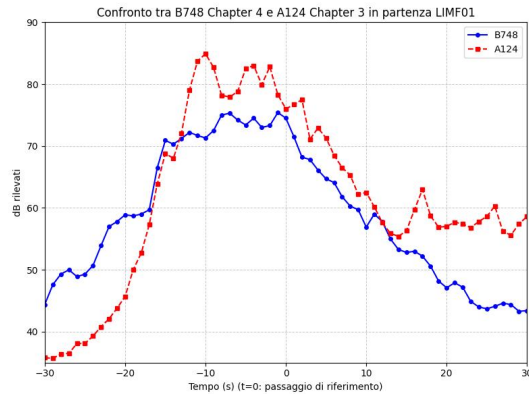


Figura 6.39: Confronto tra due velivoli B748 e A124 in partenza LIMF01

Nei grafici è riportato il confronto tra un B747-8, *Chapter 4* e Code **F**, e l'Antonov An-124, *Chapter 3* e Code **F**, in fase di atterraggio rilevati dalla centralina LIMF04 e in fase di decollo rilevati dalla centralina LIMF01. I due profili sono stati acquisiti in condizioni meteorologiche molto simili ma non identiche, per cui si può assumere che le emissioni sonore dei due aeromobili siano tra loro confrontabili.

Il profilo del B748 presenta un andamento più regolare e contenuto, con un picco massimo intorno ai 75 dB sia in arrivo che in partenza, seguito da una rapida diminuzione dei livelli sonori. Al contrario, il profilo dell'A124 evidenzia livelli più elevati per un intervallo temporale più lungo, con un picco che raggiunge circa 85 dB in partenza. Nel caso dell'atterraggio, nonostante l'A124 rimanga il velivolo più rumoroso, gli andamenti dei due profili risultano complessivamente simili, differenziandosi di pochi decibel nella fase successiva al picco e di circa una decina nella fase precedente. Nel caso del decollo, invece, la fase iniziale di incremento dei dB è più brusca per l'A124, indice di un'emissione sonora più intensa durante l'accelerazione al decollo, mentre dopo il picco il B748 mostra un decadimento più marcato dei livelli sonori, al contrario l'A124 mantiene oscillazioni superiori ai 60 dB per un periodo prolungato, portando a una maggiore durata del disturbo acustico. Nonostante entrambi i velivoli siano di categoria ICAO F, il Boeing 747-8 *Chapter 4* è dotato di motori GENx-2B ad alto rapporto di diluizione e di sistemi di mitigazione del rumore come ugelli *chevron* e rivestimenti fonoassorbenti, per cui risulta più silenzioso e con un'impronta acustica più contenuta rispetto all'A124 *Chapter 3*, che è invece equipaggiato con motori D-18T a basso bypass e privo di tali accorgimenti.

6.3.5 Effetto vento

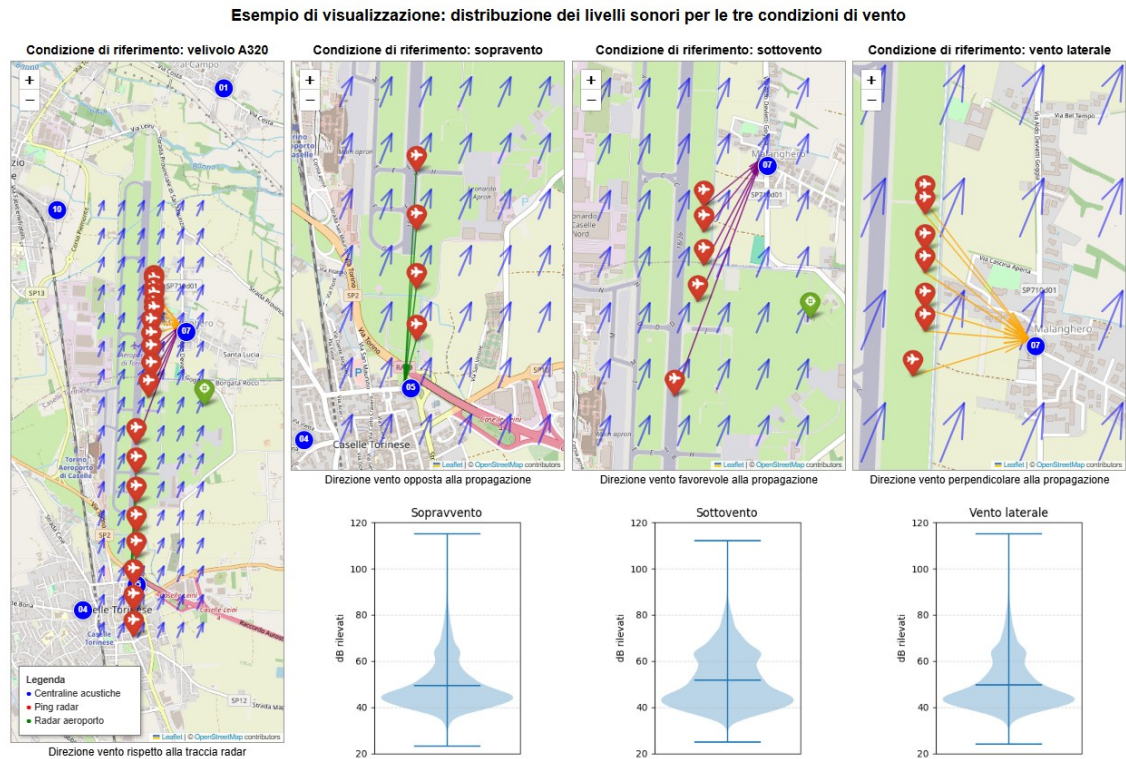


Figura 6.40: Distribuzione dei livelli sonori per le tre condizioni di vento, con violin plot ottenuti dalla media complessiva del campione

L'immagine mostra un'analisi integrata che mette in relazione l'andamento dei livelli sonori rilevati nel biennio 2023-2024 con la direzione del vento rispetto alla traiettoria di volo e alla posizione delle centraline di monitoraggio acustico. Nella mappa più ampia, a sinistra, è rappresentato a titolo esemplificativo l'avvicinamento radar del velivolo Airbus A320, selezionato come riferimento per illustrare le differenti condizioni acustiche che possono instaurarsi in prossimità dell'aeroporto. Le frecce blu indicano la direzione del vento nel periodo considerato, mentre i marker rossi rappresentano i ping radar cioè la posizione istantanea del velivolo lungo la fase finale di avvicinamento alla pista. Le tre mappe a destra mostrano schematicamente le tre configurazioni principali di propagazione del suono rispetto al vento: sopravvento, sottovento e vento laterale.

Nei violin plot riportati sotto ciascuna mappa, la larghezza della figura rappresenta la densità di occorrenza di quei valori cioè quanto spesso si verificano: le zone più ampie corrispondono a valori di dB registrati più frequentemente, mentre le zone più strette indicano valori meno ricorrenti. La linea orizzontale interna alla figura indica il valore medio aritmetico dei dati della distribuzione in quel violin, infine l'estensione verticale mostra la variabilità complessiva ovvero i minimi e i massimi osservati. Questa rappresentazione consente di visualizzare in modo compatto sia la distribuzione complessiva dei livelli acustici sia le differenze statistiche tra le tre condizioni di vento considerate.

Dal confronto tra i tre violin plot si osservano differenze significative nella forma e nella concentrazione della distribuzione, imputabili agli effetti fisici del vento sulla propagazione acustica. In condizione di sopravvento, il vento soffia in direzione opposta alla propagazione acustica, cioè

la direzione dal velivolo alla centralina. Questo comporta una attenuazione del livello sonoro percepito dalle centraline disposte nella direzione del vento, in quanto la corrente d'aria tende a deviare verso l'alto le onde sonore. Nella mappa corrispondente, le linee che collegano la traiettoria radar alle postazioni di misura evidenziano questa configurazione di vento contrario e il relativo violin plot mostra una distribuzione dei dB rilevati più concentrata su valori medio-bassi, con una densità minore verso i livelli più elevati.

Al contrario, in condizione di sottovento, il vento soffia nella stessa direzione della propagazione acustica. Questa configurazione favorisce la trasmissione del suono, poiché le onde sonore vengono deviate verso il basso, incrementando l'energia acustica che raggiunge il ricevitore al suolo. La mappa centrale mette in evidenza la disposizione delle centraline situate lungo la direzione di propagazione del flusso d'aria e il corrispondente violin plot evidenzia valori medi di dB rilevati più alti, segno di una distribuzione mediamente più ampia e spostata verso valori elevati di dB con una densità maggiore nelle fasce superiori.

Infine, la condizione di vento laterale rappresenta una situazione intermedia tra i due casi precedenti, in cui il vento agisce in direzione pressoché perpendicolare alla propagazione del suono. In questo caso, la propagazione non è né completamente favorita né ostacolata dal vento, ma subisce comunque effetti di rifrazione e di diffusione laterale che determinano la variabilità dei valori di dB. Il violin plot associato mostra una distribuzione simile alla condizione di sopravvento, ma con una distribuzione dei dB rilevati concentrata anche su valori elevati.

I risultati riportati nei tre violin plot, ottenuti dalla media complessiva del campione, confermano la sensibilità dei livelli sonori alla direzione del vento e quindi l'importanza di considerare le condizioni meteorologiche nella valutazione del rumore aeroportuale. La variazione osservata tra le tre configurazioni risulta coerente con la teoria della propagazione acustica in atmosfera, secondo cui il vento in direzione favorevole intensifica il livello sonoro percepito, mentre quello opposto ne attenua l'effetto, modificando la distribuzione spaziale del rumore.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

L'analisi condotta ha permesso di evidenziare come l'evoluzione della fleet mix e dei propulsori aeronautici abbia avuto un riflesso tangibile sulla diminuzione delle emissioni acustiche degli aeromobili e, di conseguenza, sul miglioramento della salute della popolazione nell'intorno del sedime aeroportuale. In particolare, si è osservato che i velivoli certificati con Chapter più elevati mostrano un andamento dell'impronta acustica simile a quello dei velivoli più datati, ma con picchi di rumore notevolmente attenuati. Questo effetto si traduce in un impatto concreto sulla riduzione del rumore aeroportuale, contribuendo a un miglioramento della salute e del benessere delle comunità residenti nelle aree circostanti l'aeroporto.

Le elaborazioni grafiche e statistiche hanno fornito un quadro chiaro dell'evoluzione del rumore aeroportuale negli ultimi anni, evidenziando l'efficacia delle innovazioni tecnologiche introdotte nel settore aeronautico. Quel che è emerso dai grafici è che, sebbene i pattern di rumore siano simili tra velivoli di diverse generazioni, le innovazioni tecnologiche nei motori e nell'aerodinamica delle strutture hanno permesso di smussare i valori massimi di pressione sonora, oltre che a ridurre di diversi decibel i livelli registrati nelle fasi antecedenti e successive al picco. Tali miglioramenti si traducono non solo in una diminuzione dell'intensità massima dell'evento acustico, ma anche in una riduzione complessiva del disturbo percepito, senza tuttavia compromettere le prestazioni operative dei velivoli.

Il confronto tra velivoli appartenenti alla stessa classe ICAO ha messo in risalto differenze significative dovute principalmente alla certificazione rumore. Velivoli appartenenti alla medesima classe, ma equipaggiati con propulsori di generazione più recente e con soluzioni di mitigazione del rumore, mostrano un'impronta acustica più ristretta e con picchi smussati, mantenendo però prestazioni operative comparabili. Analogamente, il confronto tra classi ICAO differenti ha confermato che il livello sonoro massimo cresce con la dimensione, il peso e la potenza del velivolo, ma il miglioramento dei motori aeronautici e delle tecnologie di mitigazione consente ai velivoli più grandi e moderni di limitare le emissioni sonore.

Per quanto concerne l'analisi dell'influenza delle condizioni meteorologiche, questa ha convalidato la forte dipendenza della propagazione del rumore da parametri quali direzione e intensità del vento. Secondo quanto indicato nella norma ISO 9613, le condizioni di propagazione downwind si definiscono come quelle in cui la direzione del vento rientra in un angolo di $\pm 45^\circ$ rispetto alla congiungente tra la sorgente sonora e il ricevitore, e in generale la velocità del vento deve essere compresa tra 1 e 5 m/s al fine di garantire la validità delle misurazioni acustiche. Nel presente studio, i casi che si è deciso di analizzare rispettano tali condizioni: l'intensità del vento è sempre risultata inferiore a 5 m/s, mentre per quanto riguarda la direzione, le osservazioni effettuate all'interno dell'intervallo di $\pm 45^\circ$ hanno mostrato che le situazioni di vento favorevole alla propagazione verso le centraline determinano un incremento dei livelli di decibel rilevati.

Questi risultati confermano l'importanza di monitoraggi acustici continui e integrati con i dati operativi dei velivoli, permettendo di correlare in maniera dettagliata le caratteristiche dei motori con l'impatto sul territorio. Nel complesso, l'analisi condotta ha evidenziato una progressiva riduzione del rumore aeroportuale percepito, grazie alla combinazione dell'evoluzione della flotta, del miglioramento dei motori, dell'adozione di procedure operative più efficienti e di una maggiore consapevolezza ambientale da parte degli operatori del settore.

Gli sviluppi futuri dell'analisi proposta in questo lavoro di tesi riguardano l'utilizzo dell'ADS-B di cui dispone l'Aeroporto di Torino-Caselle. L'antenna ADS-B consente il tracciamento dei movimenti a terra e l'opportunità di superare i limiti dei dati radar, consentendo un'analisi più completa e precisa delle fasi operative degli aeromobili, sia in volo sia a terra. Tali informazioni potrebbero, in prospettiva futura, essere impiegate anche per lo studio del rumore aeroportuale a terra, consentendo di correlare in maniera diretta i movimenti dei velivoli nelle taxiways e nei piazzali con le misurazioni acustiche delle centraline di monitoraggio. Inoltre questi dati potrebbero essere utilizzati anche per lo studio del traffico aeroportuale a terra, come l'analisi della distanza percorsa prima dell'arresto in fase di atterraggio, della frequenza di utilizzo dei diversi raccordi di uscita e della distribuzione degli stand maggiormente impiegati.

Sempre in prospettiva futura, il lavoro qui presentato potrebbe contribuire come strumento di supporto alla pianificazione e alla gestione degli slot orari per l'Aeroporto di Torino-Caselle, in quanto i risultati ottenuti consentono di individuare, tra le flotte dei vettori che operano sullo scalo, quali tipologie di velivoli risultano maggiormente rumorose. Queste informazioni possono rivelarsi particolarmente utili per l'ottimizzazione delle procedure antirumore, soprattutto nella fascia notturna compresa tra le 23:00 e le 6:00 in cui la normativa impone limiti stringenti alle emissioni acustiche.

In conclusione, il lavoro di tesi svolto rappresenta una fotografia dell'attuale panorama acustico e delle flotte di velivoli che operano sullo scalo, fornendo un contributo concreto alla comprensione dei fenomeni acustici in ambito aeroportuale. Al contempo, tuttavia, si pone come base per futuri approfondimenti, in quanto il settore dell'aviazione è in costante evoluzione, sia dal punto di vista normativo sia dal punto di vista dell'introduzione di nuove categorie di aeromobili, come droni e UAV, pertanto potrebbe essere necessario in futuro aggiornare e ampliare le analisi svolte.

Bibliografia

- [1] ACI. *Joint ACI World-ICAO Passenger Traffic Report, Trends, and Outlook*. URL: <https://aci.aero/2025/01/28/joint-aci-world-icao-passenger-traffic-report-trends-and-outlook/>.
- [2] ENAC. *Le emissioni acustiche*. URL: <https://www.enac.gov.it/ambiente/impatto-ambientale/le-emissioni-acustiche-rumore/>.
- [3] ICAO. *Reduction of Noise at Source*. URL: <https://www.icao.int/reduction-noise-source>.
- [4] DGAC. *Informations générales sur la base de données NoisedB*. URL: <https://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/>.
- [5] ICAO. *CAEP Working Group 1*. URL: <https://www.icao.int/caep-working-group-1>.
- [6] EASA. *European Aviation Environmental Report 2025*. EASA, 2025. URL: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/EASA_EAER_2025_Book_v5.pdf.
- [7] SAVE S.p.A. *DESCRITTORI ACUSTICI - LVA vs LAeq,Tr*. SAVE S.p.A. URL: https://ambiente.veneziaairport.it/upload/files/sito_ambiente/rumore/archivio_documenti/differenze_etra_lva_e_laeqtr_tcaa.pdf.
- [8] CEI. *CEI - EN 60804, Fonometri integratori mediatori*. URL: <https://standards.globalspec.com/std/1508335/en-60804>.
- [9] ACCREDIA. *Ente Unico di accreditamento*. URL: <https://www.accredia.it/chi-siamo/ente-unico/>.
- [10] Brisbane Airport. *Understanding Runway Operations & Noise*. URL: <https://www.bne.com.au/corporate/community-and-environment/runway-operations-noise/understanding-runway-operations-noise>.
- [11] Tamer Raef, Aly Elzahaby, and Mohamed Khalil. "ENHANCEMENT OF PROPULSION PERFORMANCE THROUGH JET NOISE REDUCTION TECHNOLOGIES: A REVIEW". In: May 2014.
- [12] J. Gordon Leishman. *Introduction to Aerospace Flight Vehicles*. Open-access educational resource, licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0). 2022. ISBN: 979-8-9852614-0-0. URL: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/>.
- [13] Peng Chen et al. "A Review on the High Sound Pressure Level Acoustic Measurement in the Aerospace Field". In: *Journal of Sensors* 2023 (2023). DOI: 10.1155/2023/6681598. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/6681598>.
- [14] Dennis L. Huff. *Noise Reduction Technologies for Turbofan Engines*. Technical Memorandum NASA/TM-2007-214495, E-15787. NASA Glenn Research Center, Sept. 2007. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20080001448>.
- [15] Xiran Liu et al. "Development and progress in aeroacoustic noise reduction on turbofan aeroengines". In: *Progress in Aerospace Sciences* 130 (2022). ISSN: 0376-0421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100796>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037604212100097X>.
- [16] Jay Stowe. *The Power and the Glory: GE Aerospace Delivers 3,000th GE90 Engine*. URL: <https://www.ge.com/news/reports/the-power-and-the-glory-ge-aerospace-delivers-3000th-ge90-engine>.
- [17] AviationWA. *First visit to Perth by Boeing 787-8 Dreamliner, HS-TQB of Thai Airways: Sun 21 September 2014*. URL: <https://www.aviationwa.org.au/aircraft-photos-movements/first-visit-to-perth-by-boeing-787-8-dreamliner-hs-tqb-of-thai-airways-sun-21-september-2014/>.
- [18] Pratt & Whitney. *GTF Engine Allows Step Change in Efficiency*. URL: https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEjhn_9ijLA0GJwzEXWeeTESaVdkLZ0iIBZ9RyACz2Jowo-Tf75XrqM0LiwcJb2VFLNLwA1DbVjweEkbpSzbuV8PfY8KmpCI8IDLRg0jGCc70pe40-6q0YHEad0s-W6IepUM/s1600/Geared.png.
- [19] dayamay. *Immagini dell'elica A400M, elica Scimitar*. Pixabay. 2019. URL: <https://pixabay.com/th/photos/a400m-propeller-scimitar-propeller-4416895/>.

- [20] NYC AVIATION. *Airbus Rolls Out First New A320 With Sharklets*. URL: <https://www.nycaviation.com/2012/04/airbus-rolls-out-first-new-a320-with-sharklets>.
- [21] ELITE WINGS. *Aviation Partners Winglets, True Sculpture Masterpiece*. URL: <https://elite-wings.com/aviation-partners-winglets-true-sculpture-masterpiece/>.
- [22] Meelad Aslam. *Explained: How Aircraft Noise Reduction Tech Works*. URL: https://www.airwaysmag.com/new-post/how-aircraft-noise-reduction-tech-works#google_vignette.
- [23] CFM. *Engine architecture*. URL: <https://www.cfmaeroengines.com/rise/engine-architecture>.
- [24] EASA. *EASA Certification Noise Levels - Jet aeroplanes noise database*. Excel file. July 2025. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/easa-certification-noise-levels>.
- [25] Bryan Edwards, Charles Cox, and Earl R. Booth Jr. *Revolutionary Concepts for Helicopter Noise Reduction: SILENT Program*. Contractor Report NASA/CR-2002-211650, Rept-699-099-529, NAS 1.26:211650. NASA Langley Research Center, May 2002. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020051150>.
- [26] AIRBUS. *Helicopter sound footprint*. URL: <https://www.airbus.com/en/innovation/future-aircraft-operations/helicopter-sound-footprint#:~:text=The%20new-generation%2C%20medium%20twin-engine%20H160%20benefits%20from%20a,even%20more%20so%20in%20difficult-to-access%20or%20congested%20areas..>
- [27] EASA. *Drones & Air Mobility Basics explained*. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/drones-air-mobility-landscape/basics-explained>.
- [28] CSI Edison. *SKYHAWK DRC442-BLK Foldable Video GPS Drone User Manual*. URL: <https://device.report/manual/9260061>.
- [29] EASA. *EASA finalises guidelines on noise measurements for drones below 600 kg*. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/news/easa-finalises-guidelines-noise-measurements-drones-below-600-kg>.
- [30] FAA. *Noise Certification Standards: Matternet Model M2 Aircraft*. URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2022/09/12/2022-19639/noise-certification-standards-matternet-model-m2-aircraft>.
- [31] Roberto Passante. *La Fisica del Suono*. URL: https://www.unipa.it/strutture/laureescientifiche/.content/documenti_seminari/Passante_FisicaSuono.pdf.
- [32] C.D.I. *Il suono*. URL: http://www.cdila.it/cdila/Index?q=object/detail&p=_system cms_node/_a_ID/_v_24.
- [33] Sébastien de Rossi. "Study and realization of an holographic vibrometer". In: (Dec. 2001).
- [34] E. Zandegiacomo. *Elementi di acustica*. URL: https://moodle2.units.it/pluginfile.php/481359/mod_resource/content/2/Dispensa%20acustica2.pdf.
- [35] *ISO 226:2023, Acoustics: Normal equal-loudness-level contours*. International Standard. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
- [36] Zanichelli. *Le onde e il suono*. URL: https://online.scuola.zanichelli.it/cutnellelementi-files/pdf/OndeSuono_Cutnell_Zanichelli.pdf.
- [37] Ing. Arch. Michele Cuzzoni. *Principi generali di analisi acustica*. URL: <https://www.campanologia.it/contenuto/pagine/01-ATS/ATS-J01/ATS-J01-02-Spettri-Frequenza.htm>.
- [38] Fisica onde Musica. *Glossario*. URL: <https://fisicaondemusica.unimore.it/Glossario.html#0>.
- [39] Ci Senti. *Apparato Uditivo e Presbioacusia*. URL: <https://www.cisenti.ch/informazioni-utili/apparato-uditivo-e-presbioacusia/>.
- [40] Ing. Pietro Tripodi. *Patologie ed effetti del rumore*. URL: <http://www.bioecotecnica.it/documenti%20acustica/3-patologie%20da%20rumore.pdf>.
- [41] Enrico Contadin. "La valutazione del rischio rumore: un caso studio in cantiere". Tesi di laurea magistrale. Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, 2024.
- [42] G. Tomei et al. "Effetti extrauditivi del rumore". In: *Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia* 31.1 (2009), pp. 37-48. URL: https://inquinamentoacustico.it/_download/effetti%20extrauditivi%20rumore%20-%20tomei.pdf.
- [43] Francesco Pompoli. *Propagazione del suono in ambiente esterno*. Slide di corso universitario.
- [44] Wilhelm van Schaik et al. "High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air". In: *Sensors* 10 (Aug. 2010), pp. 7421-7433. DOI: 10.3390/s100807421.
- [45] Barry Truax, ed. *Handbook for Acoustic Ecology*. Second. ARC Publications, 1999.

- [46] Stuart. *Effects of Wind [on sound]*. URL: <https://romancingthebritishlandscape.wordpress.com/2016/01/06/effects-of-wind/>.
- [47] Irena Pavlikova et al. "Numerical simulation of pm dispersion during thermal inversion". In: 2 (Jan. 2014), pp. 453–460.
- [48] Brüel & Kjær. *Environmental Noise Handbook*. Brüel & Kjær, 2000.
- [49] P.Eng. Tom Paige. *Outdoor Noise Barriers: Design and Applications*. URL: https://web.archive.org/web/20051110041355/http://www.ashraeregion7.org/tc26/pastprograms/Outdoor_Noise/barriers.pdf.
- [50] Carlo Moriondo. *SAGAT dal dopoguerra al duemila: storia di un continuo progresso*. Torino: Daniela Piazza Editore, 1997.
- [51] Angelo Moriondo. *GLI ALBORI DELL'AVIAZIONE A TORINO E IN ITALIA (ovvero la storia dell'Aero Club Torino)*. URL: <https://www.aeroclubtorino.it/it/storia/capitolo-4.html>.
- [52] eAIP. *LIMF - TORINO/Caselle*. URL: [https://onlineservices.enav.it/enavWebPortalStatic/AIP/AIP/\(A09-25\)_2025_09_04/index.html](https://onlineservices.enav.it/enavWebPortalStatic/AIP/AIP/(A09-25)_2025_09_04/index.html).
- [53] SAGAT S.p.A. *PIANO DI AZIONE 2018*. URL: https://www.aeroportoeditorino.it/corporate/2018/piano-di-azione-2018_sito.pdf.
- [54] ICAO. *INTERNATIONAL STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES AERODROMES - ANNEX 14 TO THE CONVENTION ON INTERNATIONAL CIVIL AVIATION*. ICAO, November 1951.
- [55] *Quali differenze sussistono tra STOPWAY e RESA?* URL: https://www.traffico-aereo.it/pages/der/der09/der09_0.htm.
- [56] Assaeroporti. *Dati di Traffico*. URL: <https://assaeroporti.com/dati-di-traffico/>.
- [57] SAGAT S.p.A. *RELAZIONE E BILANCIO AL 31 DICEMBRE 2024*. URL: https://www.aeroportoeditorino.it/corporate/bilanci/2025/bilancioeconomico24_ita_web.pdf.
- [58] Torino Airport. *Mappa destinazioni*. URL: <https://www.aeroportoeditorino.it/it/tofly/voli/mappa-destinazioni>.
- [59] SAGAT S.p.A. *Rumore Aeroportuale*. URL: <https://www.aeroportoeditorino.it/it/sagat/health-safety-environment/ambiente/rumore-aeroportuale>.
- [60] Softech. *AZIENDA*. URL: <https://www.softechweb.it/azienda/>.
- [61] SAGAT S.p.A. *POLICY DI SVILUPPO DEL TRAFFICO*. URL: <https://www.aeroportoeditorino.it/corporate/business-partners/aviation-diritti-e-tariffe/allegato-8.2---policy-incentivi-versione-gennaio-2024.pdf>.
- [62] ENAV S.p.A. *Sistemi di sorveglianza*. URL: <https://www.enav.it/node/17161>.
- [63] Iowa State University. *Iowa Environmental Mesonet*. URL: https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml?network=IT_ASOS.
- [64] EASA. *Type-Certificate Data Sheet No. IM.E.093 for PW1100G-JM Series Engines*. Tech. rep. Version Issue 11. European Union Aviation Safety Agency, Sept. 2025. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/type-certificates/engine-cs-e/easaime093-pw1100g-jm-series-engines>.
- [65] EASA. *Type-Certificate Data Sheet No. E.115 for LEAP-1B Series Engines*. Tech. rep. Version Issue 08. European Union Aviation Safety Agency, Dec. 2022. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/type-certificates/engine-cs-e/easae115-leap-1b-series-engines>.
- [66] EASA. *Type-Certificate Data Sheet No. IM.E.069 for Engine V2500-A5, V2500-D5, V2500-E5 Series*. Version Issue 05. European Union Aviation Safety Agency, Dec. 2022. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/type-certificates/engine-cs-e/easaime069-international-aero-engines-ag-iae-v2500>.
- [67] EASA. *Type-Certificate Data Sheet No. E.004 for CFM56-7B Series Engines*. Version Issue 07. European Union Aviation Safety Agency, Jan. 2023. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/type-certificates/engine-cs-e/easae004-cfm-international-sa-cfm56-7b-series>.