

Problematiche di rumore immesso in ambiente esterno da impianti di climatizzazione centralizzati

ANTONINO DI BELLA*, FRANCESCO FELLIN**, MICHELE TERGOLINA**, ROBERTO ZECCHIN*,**

* - Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Padova

** - TiFS ingegneria srl – Padova

RIASSUNTO

La risoluzione dei problemi di cui si tratta richiede la conoscenza delle emissioni acustiche delle sorgenti, l'analisi dei requisiti di legge per l'identificazione degli obiettivi e l'impiego di adeguati strumenti revisionali. In questo lavoro vengono dapprima analizzati gli aspetti inerenti alla corretta caratterizzazione acustica delle macchine. Vengono poi trattati alcuni aspetti procedurali inerenti alla corretta e agevole applicazione delle disposizioni di legge. Sono poi analizzati gli algoritmi proposti dalla normativa ISO, per il calcolo della distribuzione del rumore davanti alla sorgente e le modalità della loro implementazione in codici di calcolo specifici. Alcuni esempi applicativi completano la trattazione.

1. INTRODUZIONE

Le problematiche di tipo acustico legate all'utilizzo di impianti centralizzati per la climatizzazione degli edifici sono sempre più rilevanti, sia per la crescente diffusione di questo tipo di impianti che per la progressiva presa d'atto dell'esistenza di ben specifiche disposizioni di legge in materia.

Solitamente la produzione di calore avviene per mezzo di generatori di calore (oppure cogeneratori o generatori di vapore o ancora scambiatori di calore connessi ad una rete di teleriscaldamento), installati usualmente in un luogo chiuso denominato centrale termica.

La produzione di freddo avviene anch'essa per mezzo di macchine, parte delle quali vengono installate all'interno, parte all'esterno; non mancano tuttavia esempi di produzione di freddo completamente all'interno della centrale frigorifera (è il caso di gruppi frigoriferi condensati ad aria con ventilatori centrifughi) o solo all'aperto (è il caso di gruppi frigoriferi condensati ad aria con ventilatori assiali).

Appare subito evidente che la riduzione del rumore prodotto da tali impianti verso possibili soggetti disturbati da queste installazioni richiede successivi livelli di analisi:

- per macchine installate in un luogo chiuso prima di tutto è opportuno ridurre l'emissione sonora della macchina stessa (incapsulaggi, cabine afoniche ecc.);

- un secondo passo è lo studio dell'ambiente in cui le macchine vengono installate, ovvero la centrale tecnologica (propagazione sonora in ambiente confinato, assorbimento acustico e tempo di riverberazione, cumulo degli effetti prodotti da macchine diverse installate nello stesso luogo ecc.);

- si deve poi studiare la trasmissione del rumore verso l'esterno, attraverso murature e portoni (fonoisolamento) o attraverso le indispensabili aperture presenti (griglie di ventilazione, di presa aria esterna e di espulsione, camini ecc.);

- occorre infine studiare la trasmissione sonora in campo libero dalla centrale tecnologica, intesa come sorgente di rumore, ai possibili ricettori (presenza di superfici riflettenti, barriere acustiche ecc.).

Quest'ultimo punto è ovviamente il solo a dover essere affrontato in presenza di macchine installate all'aperto.

Un primo passo per lo studio di tali problematiche è l'analisi dettagliata delle sorgenti sonore e la successiva caratterizzazione, in termini di potenza sonora emessa, in funzione dei parametri prestazionali.

La disponibilità di dati di prestazione acustica attendibili è infatti il presupposto fondamentale per una progettazione accurata.

2. UN'INDAGINE DI MERCATO SULLA RUMOROSITA' DELLE APPARECCHIATURE PER LA CLIMATIZZAZIONE

Un'indagine svolta qualche tempo addietro [1,2], compiuta su un esteso campione di macchine per la climatizzazione estiva, metteva in evidenza la scarsa importanza attribuita da gran parte dei costruttori alle caratteristiche acustiche dei propri prodotti.

Nel dettaglio erano state analizzate macchine appartenenti alle seguenti categorie:

- gruppi refrigeratori d'acqua con condensazione ad aria, sia per installazione esterna (dotati di ventilatori assiali) che per installazione anche interna (con ventilatori centrifughi);
- gruppi refrigeratori d'acqua con condensazione ad acqua;
- torri evaporative (o raffreddatori evaporativi o condensatori evaporativi) con ventilatori assiali oppure centrifughi;
- centrali di trattamento aria (per installazione esterna o interna);
- condensatori remoti o raffreddatori di liquido raffreddati ad aria;
- torrioni di estrazione.

Non rientravano nell'ambito dell'indagine svolta, ma presentano comunque un indubbio interesse in questa trattazione, le apparecchiature per la produzione di calore (generatori di calore ad acqua calda, acqua surriscaldata o vapore), i cogeneratori per la produzione combinata di energia elettrica ed energia termica sotto forma di acqua calda, surriscaldata o vapore (generalmente motori alternativi a combustione interna o turbine a gas, più raramente turbine a vapore), i gruppi di pompaggio e le macchine ad assorbimento per la produzione di freddo (benché la scarsa diffusione di quest'ultima tipologia di macchina e la ridotta rumorosità prodotta non costituiscano di fatto un problema rilevante).

L'indagine è stata compiuta su circa 5000 modelli di macchine per la climatizzazione, di produzione nazionale ed estera (complessivamente sono state considerate 65

case costruttrici), presenti nei cataloghi dei produttori degli ultimi anni (dal 1997 al 1999).

In tal modo si è potuta valutare anzitutto la tendenza delle tipologie di produzione delle macchine per la climatizzazione¹. Il 37% delle macchine considerate appartiene alla tipologia dei refrigeratori d'acqua condensati ad aria con ventilatori assiali; questa percentuale sale al 48% considerando anche le macchine reversibili per il funzionamento invernale a pompa di calore.

Lo stesso tipo di macchina per installazione interna (con ventilatori centrifughi) incide solo per il 9%. Si ha poi che il 10% delle tipologie esistenti nel mercato è costituito da torri evaporative (sia assiali che centrifughe), l' 11% da macchine ad aria condensate ad aria (sia condizionatori che pompe di calore), il 9% da condensatori remoti raffreddati ad aria, il 6% da macchine ad acqua condensate ad acqua (sia condizionatori che pompe di calore). Infine, il 5% è costituito da torrini di estrazione e il 2% dalle centrali di trattamento aria. La suddivisione per tipologia di macchine esaminate nel corso dell'indagine è illustrata in Fig. 1.

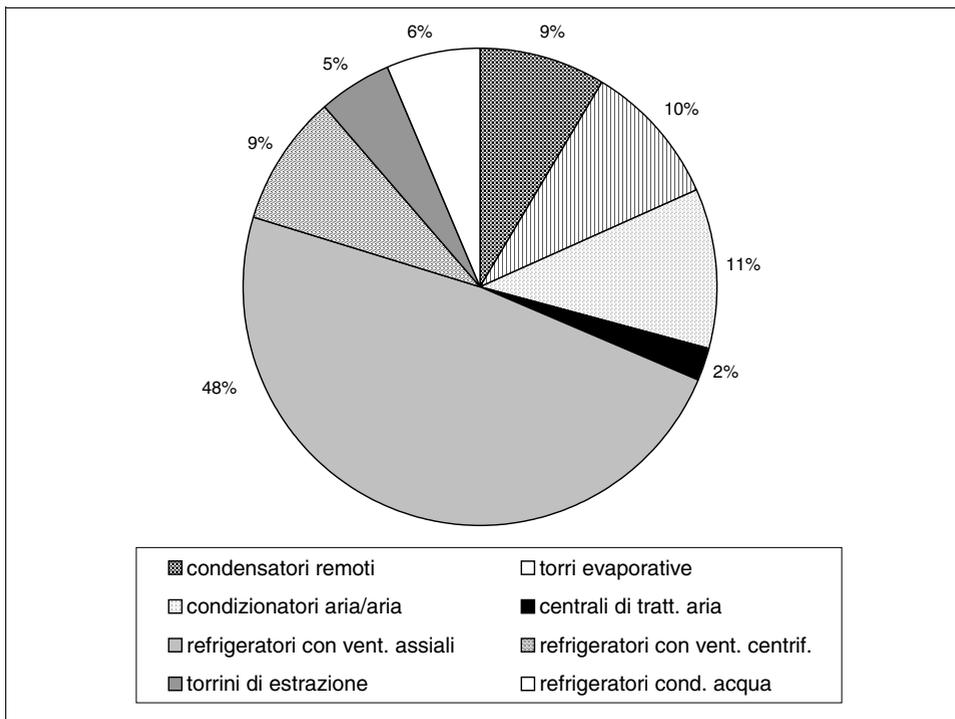


Fig. 1 – Macchine per la climatizzazione oggetto dell'indagine: suddivisione per categorie

¹ Le percentuali che seguono si riferiscono al numero di modelli appartenenti a una determinata categoria rispetto al totale (5000) dei modelli analizzati e non rappresentano perciò quote di mercato.

Come si può notare, appare evidente una netta preponderanza dell'acqua come fluido termovettore di utenza e dell'aria come fluido di smaltimento verso l'esterno. Quest'ultimo aspetto sarà in prospettiva sempre più marcato, stante la crescente difficoltà di approvvigionamento di acqua come fluido di smaltimento.

Nelle installazioni di maggiore potenzialità si ricorre, come unica alternativa percorribile, all'installazione di torri evaporative associate a gruppi refrigeratori d'acqua condensati ad acqua.

Le due soluzioni di smaltimento del calore verranno successivamente confrontate dal punto di vista acustico.

La diffusione delle macchine condensate ad aria e delle torri evaporative pone evidentemente problemi di emissioni sonore legate al movimento, tramite ventilatori, di grandi portate d'aria con conseguente creazione di rumore di tipo aerodinamico. A questo tipo di rumore va aggiunto quello prodotto dai compressori e quello causato da eventuali vibrazioni di pannelli, strutture, batterie alettate ecc., essendo in genere il rumore prodotto dalle pompe trascurabile rispetto agli altri contributi; in refrigeratori d'acqua condensati ad aria di elevata potenzialità per installazione esterna possono essere presenti fino a sedici ventilatori assiali su un'unica macchina.

Preme anzitutto fare un'osservazione riguardo alla qualità dei dati di emissione acustica forniti dai vari costruttori. I cataloghi analizzati risultano spesso molto dettagliati riguardo alle prestazioni, alle caratteristiche elettriche e idrauliche, alle dimensioni e ai pesi, alle caratteristiche estetiche del prodotto, mentre nel 25–30% dei casi non vengono forniti, nella documentazione tecnica corrente, dati di emissione acustica, che sono invece resi disponibili, con maggiore o minore dettaglio, solo dietro specifica richiesta, per esempio a seguito di richieste di offerta, rendendo così più difficile la progettazione acustica preliminare.

In molti casi (circa il 60% di quelli analizzati) viene fornito solamente il livello di pressione sonora, ponderato A, misurato ad una certa distanza dalla macchina. Questo parametro, da solo, è insufficiente ai fini di una corretta previsione di impatto acustico e del dimensionamento di una eventuale schermatura o attenuazione della sorgente sonora: esso permette solamente un confronto tra due macchine diverse, posto che, per entrambe, questa grandezza sia riferita alla medesima distanza (e metodologia) di misura. Oltre alla insufficienza di questo parametro ci si è trovati inoltre di fronte a scelte arbitrarie da parte dei costruttori: le distanze di misura osservate risultano pari a 1 m, 1,5 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m oppure 10 m. Nel caso delle torri evaporative sono state riscontrate le distanze di 1,5 m, 3 m, 5 m, 10 m, 15 m o 16 m. Una scelta inadeguata della distanza di misura del livello di pressione sonora può rendere inapplicabile il calcolo del livello di potenza sonora prodotto dalla macchina stessa effettuato secondo la legge dell'attenuazione per divergenza.

E' noto infatti che tale procedura è applicabile solo nel caso che la sorgente sonora possa essere considerata "puntiforme" rispetto al punto di misura del livello di pressione sonora, ovvero per una distanza dalla sorgente convenientemente multipla (almeno tre o quattro volte) della dimensione caratteristica (o della massima dimensione) della macchina stessa.

Lo spettro in banda di ottava del livello di potenza sonora è fornito dal costruttore solo nel 7% dei casi, quasi sempre comunque senza citare le normative seguite per

effettuare la misura.

Nel caso delle torri evaporative viene spesso fornito lo spettro di livello di pressione sonora ad una data distanza dalla medesima per ciascuna delle cinque facce della torre stessa, essendo questo parametro fortemente influenzato dalla direzione nella quale si effettua la misura.

In pochissimi casi (0,5%) vengono forniti sia lo spettro di livello di pressione sonora che quello di livello di potenza sonora.

A titolo di esempio si riporta in figura 2 uno dei grafici ottenuti nell'indagine; i risultati completi dell'analisi sono riportati in [1]. Si può osservare la notevole dispersione dei valori di emissione sonora a parità di potenza frigorifera: in particolare molti esemplari che vengono definiti dai costruttori come "Low noise" o "Extra low noise" hanno emissioni superiori a quelli definiti "standard" da altri costruttori.

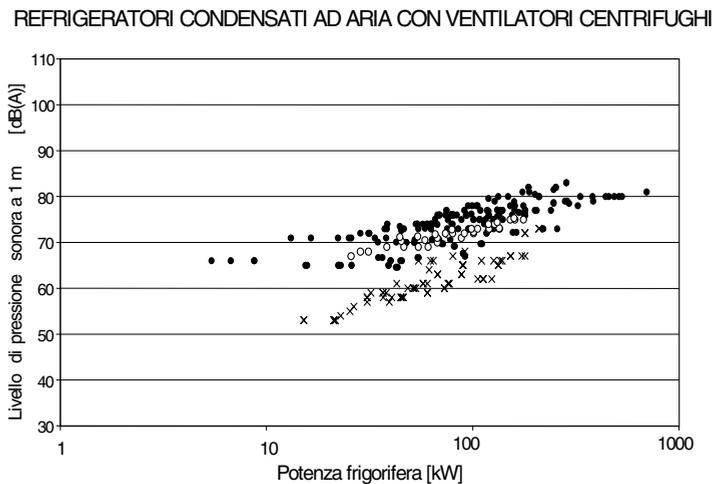


Fig. 2 – Livello di pressione sonora per refrigeratori d'acqua con ventilatori centrifughi a 1 m di distanza
(● versione standard, ○ versione silenziosa, × versione super silenziosa)

3. MISURAZIONE DELLA POTENZA SONORA

Nella misurazione della potenza sonora prodotta da una data sorgente è possibile avvalersi di diversi metodi di misura, come sarà illustrato in seguito. Le norme ISO forniscono, per ciascuno dei metodi adottati, le incertezze di misura (in funzione della frequenza) che è ragionevole aspettarsi effettuando misure in accordo con la normativa stessa. [da 3 a 9].

Tali valori sono da intendersi come il limite massimo per la deviazione standard, ottenibile da determinazioni effettuate in accordo con la normativa, e possono essere quindi considerati come margini di sicurezza (ovvero determinazioni correttamente effettuate presentano deviazioni standard al più uguali a quelle riportate in tab. I).

Tali incertezze comprendono gli effetti cumulativi di tutte i possibili errori di misura, escludendo invece le variazioni dello stesso livello di potenza che possono verificarsi da misura a misura e che dipendono, per esempio, da variazioni nel montaggio della macchina o da mutate condizioni operative della sorgente. La scelta del metodo di misura determina quindi il grado di accuratezza ottenibile, come illustrato in tab. I.

Tabella I: incertezza nella determinazione della potenza sonora (deviazione standard) secondo le norme ISO 374x (valori espressi in dB).

Norma	Intervalli di frequenze [Hz]					Livello globale ponderato A
	Bande d'ottava					
	125	250	500	da 1000 a 4000	8000	
	Bande di terzo d'ottava					
	da 100 a 160	da 200 a 315	da 400 a 630	da 800 a 5000	da 6300 a 10000	
3741	3	2	1,5		3	-
3742	3	2	1,5		3	-
3743	5	3	2		3	2
3744	3	2		1,5	2,5	2
3745	1÷1,5		0,5÷1		1÷1,5	-
3746	-					4÷5
3747	-					4÷5

Se la sorgente sonora può essere facilmente spostata, può essere scelto uno dei metodi descritti dalla ISO 3741 e seguenti fino alla ISO 3746; se invece la macchina o l'equipaggiamento non possono essere facilmente spostati, si possono applicare solamente i metodi descritti dalle ISO 3744 e ISO 3746.

Un ulteriore condizionamento nella scelta del metodo può venire dalle dimensioni della macchina (Tab. II).

Tabella II: fattori che influenzano la scelta del metodo di prova

		ISO 3741	ISO 3742	ISO 3743	ISO 3744	ISO 3745	ISO 3746	ISO 3747
Dimensioni della sorgente	Grande - non trasportabile	NO	NO	NO	SI	NO	SI	NO
	Piccola - trasportabile	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Caratteristiche del rumore della sorgente	Stazionario – banda larga	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI
	Stazionario – banda stretta	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Non stazionario	NO	NO	OPZ.	SI	SI	SI	NO
Classificazioni e del metodo	Precisione	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO
	Ingegneristico	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO
	Controllo	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
Campo di applicazione	Valutazione della rumorosità	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO
	Test di produzione	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO
	Confronto fra macchine o apparati dello stesso tipo	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO
	Confronto fra macchine o apparati di tipo diverso	SI						
Informazioni ottenibili	Livelli in bande d'ottava	SI	SI	SI	SI	SI	NO	OPZ.
	Livelli in bande di terzi d'ottava	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO
	Livello globale ponderato A	OPZ.	OPZ.	SI	SI	SI	SI	SI
	Livello globale con altre ponderazioni	NO	NO	OPZ.	OPZ.	OPZ.	OPZ.	NO
	Direttività	NO	NO	NO	OPZ.	OPZ.	NO	NO
	Andamento temporale del livello di pressione sonora	NO	NO	NO	OPZ.	OPZ.	OPZ.	NO
Ambiente di misura	Camera riverberante normalizzata (laboratorio)	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	Camera riverberante speciale	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
	Grandi ambienti – campo libero (aperto)	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO
	Camera anecoica o semi - anecoica (laboratorio)	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
	In opera	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI

Chiarita l'importanza della determinazione della potenza sonora emessa da una data sorgente, resta l'incertezza dovuta alle variazioni delle caratteristiche acustiche nel

corso della produzione di una certa macchina. Ogni prodotto industriale possiede determinate caratteristiche, che sono più o meno rispondenti allo standard prefissato a seconda dell'accuratezza di lavorazione, del grado di variabilità delle materie prime, del livello di precisione nell'assemblaggio delle parti. Infatti, essendo generalmente una macchina per la climatizzazione il risultato dell'assemblaggio di numerosi componenti (motori elettrici, ventilatori, batterie alettate, cofanature esterne, tubazioni, cablaggi ecc.), ciascuno di essi contribuisce in maggior o minor misura alla rumorosità globale prodotta dalla macchina, per cui si può parlare di potenza sonora emessa da una ben definita macchina, con le incertezze legate al metodo di misura (come prima esposto).

In fase di produzione, a tali incertezze si sommano quelle dovute alla variabilità delle caratteristiche acustiche delle macchine prodotte.

Sarebbe auspicabile che le case costruttrici procedessero dapprima alla determinazione della potenza sonora di ciascuna macchina della propria gamma secondo i metodi esposti dalle norme ISO; successivamente, si potrebbe procedere anche tramite più semplici misure di livello di pressione sonora a distanza prefissata per determinare il grado di incertezza legato squisitamente alla variabilità nella produzione delle macchine.

Dal punto di vista normativo, la Direttiva 2000/14 CE [10] (attuata con DL del 4-9-02 n. 262 [11]), prescrive che venga misurata (e indicata su un'apposita targa) la potenza sonora emessa da macchine destinate a funzionare all'aperto. L'allegato I della citata direttiva definisce le macchine ed attrezzature alle quali si applica la direttiva: si tratta in larga misura di macchinari per la costruzione edile e il movimento terra, con qualche eccezione costituita da macchine maggiormente diffuse ad uso anche domestico (decespugliatori, motoseghe, tagliaerba). La direttiva ignora completamente le macchine per la climatizzazione (ad eccezione degli impianti frigoriferi montati sui veicoli): è auspicabile che venga presto presa in considerazione un'estensione della normativa anche a tali apparecchiature, che assumono un'importanza sempre più rilevante.

La situazione, dal punto di vista dei parametri forniti dai costruttori, è illustrata in Fig. 3.

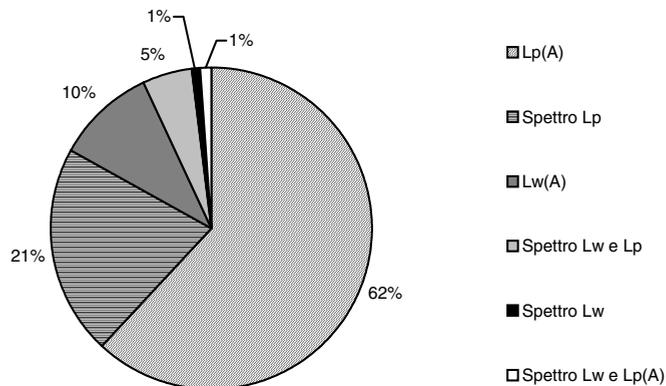


Fig. 3 – Tipologia di dati di emissione acustica riscontrati nell'indagine di mercato

Un altro argomento che vale la pena discutere riguarda la presenza, spesso rilevata nei cataloghi dei costruttori, di più versioni dello stesso modello di macchina. Si hanno così le versioni standard (abbreviato STD), 'low noise' (abbr. LN) e 'extra low noise' (abbr. XLN o ELN) di una certa macchina. Non esistendo una classificazione, universalmente riconosciuta o codificata, che permetta di definire il tipo di versione della macchina in funzione della rumorosità prodotta, ogni costruttore decide per conto proprio il criterio in base al quale assegnare una specifica classificazione ai modelli prodotti: queste designazioni hanno pertanto significato relativo, per confrontare diverse soluzioni proposte da un costruttore per una macchina di data potenzialità. Come già osservato, si hanno casi non infrequenti in cui, a parità di tipologia di macchina e di potenzialità, la versione standard di un costruttore risulta più silenziosa della versione LN di un altro, e analogamente per la versione XLN rispetto alla versione LN. Ci si trova così in una situazione paradossale, nella quale un acquirente poco accorto, che scegliesse in base alla denominazione assegnata al prodotto, potrebbe effettuare una scelta non ottimale dal punto di vista acustico. Una situazione di incertezza come quella illustrata potrebbe facilmente essere superata adottando una classificazione delle macchine che associ un indice qualitativo correlato alla potenza sonora emessa in funzione della potenza (termica o frigorifera) o della portata d'aria fornita dalla macchina stessa, come ad esempio illustrato in figura 4. Quanto sopra esposto riguarda le macchine per la produzione di freddo e le centrali per il trattamento dell'aria. Una simile indagine sarebbe utile anche per altre apparecchiature quali, per esempio, i generatori di calore o di vapore. In questo caso la carenza di dati è drammatica e, ancorché le potenze acustiche emesse al camino siano generalmente inferiori a quelle emesse dalle altre macchine, già esaminate, eventualmente associate in una centrale termofrigorifera, in molti casi si riscontra che le emissioni acustiche dei camini sono elementi critici dell'impatto acustico. Purtroppo, tra l'altro, a parte pochi casi, non si vedono apprezzabili riscontri, da parte dei costruttori di generatori o bruciatori, per risolvere il problema.

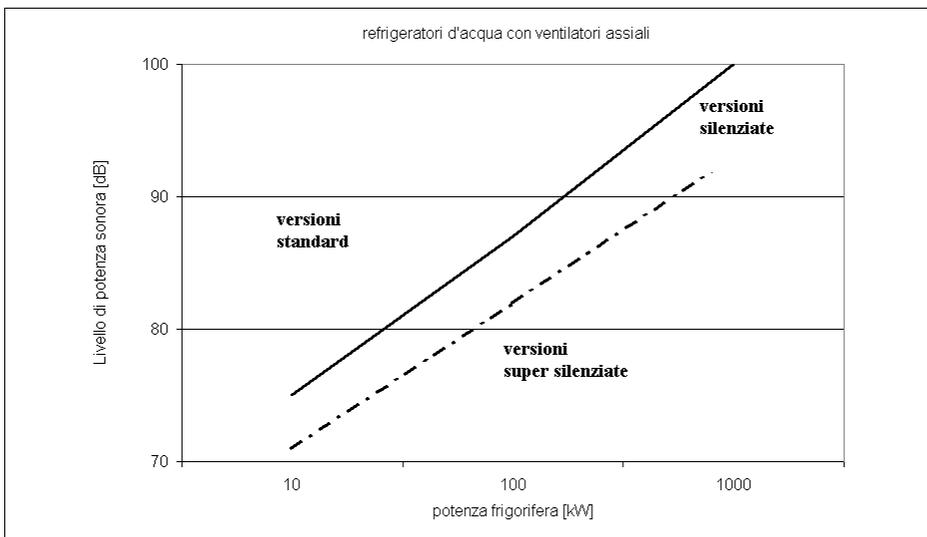


Fig. 4 – Ipotesi di classificazione delle macchine in funzione della emissione sonora

Si può comunque osservare come recentemente stia crescendo la sensibilità dei produttori nei confronti delle problematiche acustiche delle macchine, probabilmente a causa di specifiche sempre più strette da parte di committenti e progettisti. Alcuni costruttori forniscono già livelli di potenza sonora o di pressione sonora in banda o in terzo d'ottava; altri hanno studiato giranti per ventilatori assiali (elicoidali) con un particolare profilo alare che minimizzi il rumore aerodinamico generato.

4. TRASMISSIONE DEL RUMORE DALL'INTERNO ALL'ESTERNO

Come precedentemente trattato il primo provvedimento da considerare è quello di intervenire sulla riduzione della potenza sonora emessa dalle apparecchiature, tramite l'adozione di cuffie afoniche o di silenziatori ove siano presenti macchine particolarmente rumorose.

Il rumore generato dal funzionamento di apparecchiature all'interno di vani tecnici è trasmesso all'ambiente esterno attraverso differenti vie di propagazione sonora, come i componenti edilizi delle centrali e altri dispositivi impiantistici legati al funzionamento delle apparecchiature.

La riduzione della rumorosità immessa nell'ambiente esterno dalle centrali tecnologiche può essere effettuato mediante le seguenti tipologie di interventi:

- realizzazione di schermi o cabine insonorizzate;
- trattamento delle superfici interne del locale mediante pannelli o baffles fonoassorbenti;
- definizione della stratigrafia delle pareti e del solaio;
- realizzazione di insonorizzazioni delle aperture necessarie per il passaggio dell'aria;
- interventi tra la sorgente ed il ricettore.

Il primo intervento deve necessariamente avvenire tramite la realizzazione di pannelli che abbiano sia proprietà fonoassorbenti, dal lato della sorgente, che fonoisolanti. I pannelli generalmente sono realizzati con pannelli sandwich in lamiera, forata verso la sorgente, coibentati con materiale fibroso ad alta densità. Le prestazioni possono essere incrementate agendo sia sullo spessore dei materiali (lamiera, pannello fibroso), che sulla presenza di ulteriori lamiere interposte nello strato fibroso.

Va osservato che pannelli sandwich coibentati con isolanti non fibrosi, come il poliuretano espanso, presentano caratteristiche fonoisolanti decisamente inferiori a quelli con materiali fibrosi ad elevata densità (oltre 100 kg/m³). L'adozione di pannelli di questa tipologia, che forniscono poteri fonoisolanti con indici di valutazione superiori a 30 dB, può risultare utile nella riduzione del rumore irradiato dalle centrali di trattamento aria (CTA). In questi casi, per evitare il fenomeno di *break-out*, è da considerare tuttavia l'installazione del silenziatore all'interno della CTA stessa o la realizzazione di rifodere fonoisolanti in cartongesso e lana minerale lungo i canali di ripresa e di mandata.

Il secondo trattamento serve a ridurre il campo sonoro riverberato all'interno dell'ambiente dove sono collocate le apparecchiature. Il trattamento può essere realizzato a parete o a soffitto, compatibilmente con le necessità impiantistiche e normative. Si osserva infatti che, nel caso di centrali termiche con caldaie a gas, per legge devono essere evitati punti in cui possa ristagnare il gas; è pertanto sconsigliabile

installare controsoffitti con intercapedine, a meno che questi ultimi siano opportunamente ventilati.

Per quanto riguarda la stratigrafia delle pareti e dei solai, va valutato in primo luogo il potere fonoisolante che possono garantire le partizioni in base alle loro caratteristiche intrinseche: se non sufficienti dovranno essere previsti interventi atti a incrementare il potere fonoisolante della struttura base. Questi sono realizzati mediante rifodere o controsoffitti da installare sul lato interno della centrale. Generalmente questo intervento va a sommarsi pertanto a quello di correzione acustica precedentemente citato, e dovrà in tal caso essere con questo coordinato. Vi è la possibilità di realizzare con un solo prodotto, di caratteristiche fonoassorbenti, un incremento del potere fonoisolante della partizione considerata. Questa soluzione può essere realizzata, ad esempio, con pannelli in fibra di legno mineralizzata.

Esempi di interventi per l'isolamento acustico delle centrali possono essere i seguenti:

- controsoffitto fonoisolante costituito da doppia lastra di cartongesso 2 x 12,5 mm, eventualmente sostenuto da pendini antivibranti, con interposizione nell'intercapedine di pannelli in materiale fibroso di densità non inferiore a 40 kg/m³ e spessore non inferiore a 50 mm; il controsoffitto dovrà essere accuratamente sigillato in corrispondenza al perimetro, ad attraversamenti di pilastri o altri elementi strutturali o impiantistici e non presentare fori o discontinuità;
- vetrate realizzate in vetro stratificato di spessore non inferiore a 12 mm, aventi un indice R_w non inferiore a 37 dB;
- porta di accesso con indice di valutazione del potere fonoisolante R_w (secondo ISO 717-1 [12]) non inferiore a 30 dB.

Per l'isolamento acustico dell'apertura di ingresso a locali molto rumorosi, quali quelli per gruppi elettrogeni è opportuna l'installazione di una doppia chiusura (bussola), costituita da pannelli modulari in lamiera zincata, coibentati con materiale fibroso a densità differenziata (una a densità non inferiore a 100 kg/m³, la seconda pari a 80 kg/m³), dotati per l'assemblaggio di incastro in acciaio zincato maschio-femmina, resistenti al calore e al fuoco (classe 0). All'interno della singola chiusura, che deve possedere un indice di valutazione del potere fonoisolante R_w non inferiore a 30 dB, può essere ricavata la porta di accesso, caratterizzata dal medesimo indice R_w . Inoltre tutte le superfici comprese tra le due chiusure (tranne il pavimento) potranno essere rivestite con pannelli fonoassorbenti, costituiti da materiale fibroso di spessore non inferiore a 50 mm, densità di 40 kg/m³, protetti da velovetro e lamiera forata.

Contrariamente a quanto spesso realizzato, le prese e le espulsioni dell'aria della CTA richiedono sovente la presenza di attenuatori acustici, in grado di fornire un'attenuazione per banda d'ottava non inferiore a quanto riportato in Tab. III.

Tabella III: valori di attenuazione consigliati per prese d'aria ed espulsioni di CTA

Frequenza	[Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Attenuazione	[dB]	7.0	14.0	21.0	24.0	27.0	17.0	13.0	10.0

Spesso non è necessario prevedere portoni con potere fonoisolante elevato perché sono necessariamente presenti aperture per l'aerazione naturale o le prese e le espulsioni dell'aria. Nella realizzazione delle centrali tecnologiche devono essere infatti previste aperture al fine di garantire l'aerazione naturale del locale stesso. In particolare per la centrale termica, dotata di apparecchi alimentati a gas le superfici minime previste dalla legislazione [13] sono le seguenti:

- locali fuori terra: $S \geq Q \times 10$ (con un minimo di 3000 cm² per gas aventi densità minore di 0,8 e 5000 cm² per gas aventi densità maggiore di 0,8);
- locali seminterrati ed interrati, fino a quota - 5 m dal piano di riferimento: $S \geq Q \times 15$ (con un minimo di 3000 cm²);
- locali interrati, a quota compresa tra -5 m e -10 m al di sotto del piano di riferimento $S \geq Q \times 20$ (con un minimo di 5000 cm²)

dove "Q" è la portata termica in kW e "S" la superficie in cm². La superficie S così determinata è da intendersi netta, pertanto l'eventuale adozione di dispositivi di insonorizzazione (silenziatori o griglie afoniche) può incrementare considerevolmente la superficie di aerazione S individuata in quanto l'area libera effettiva può risultare anche inferiore al 30% della superficie frontale. Questo aspetto risulta di particolare rilevanza quando sono previste potenze particolarmente elevate come nel caso delle centrali degli ospedali, in quanto possono richiedere talvolta di realizzare prese d'aria sull'intera parete, con conseguenze anche sull'aspetto architettonico del fabbricato.

Nella Fig. 5 è illustrato il caso di prese d'aria realizzate sulla copertura di una centrale termica. Questa soluzione ha il vantaggio di realizzare un'attenuazione supplementare del rumore uscente dalle griglie tramite una barriera acustica posta lungo il perimetro della copertura o, se la posizione della sorgente e del ricevitore lo consente, tramite il solaio stesso di copertura.



Fig. 5 – Griglie di aerazione ubicate in copertura.

Analoghi dispositivi di insonorizzazione possono essere previsti per le prese di aria esterne o per le espulsioni, come nel caso delle CTA o dell'aria di raffreddamento e comburente per gruppi elettrogeni o cogeneratori.

L'ultima tipologia di intervento di mitigazione acustica sopra citata consiste nella realizzazione di barriere acustiche, poste tra la sorgente di rumore e il ricettore.

Le barriere sono generalmente realizzate con materiale fonoassorbente sul lato esposto verso la sorgente. I materiali con cui sono realizzati i pannelli delle barriere possono essere i più diversi: lamiera d'acciaio o alluminio forata, legno, calcestruzzo, metacrilato, policarbonato ecc.

I pannelli sottili sono usualmente posti in opera entro struttura in profilati metallici HEA fissati alle strutture mediante tirafondi e bulloni, o fissati su plinti di fondazione.

Particolarmente importante è la continuità tra pannelli e tra i pannelli e le altre strutture, che può essere realizzata mediante sigillanti e guarnizioni resilienti.

In Fig.6 è illustrata la sezione verticale in corrispondenza di un ricettore con l'indicazione delle barriere acustiche di progetto. Alcuni esempi di installazione di barriere sono invece riportati in Fig. 7.

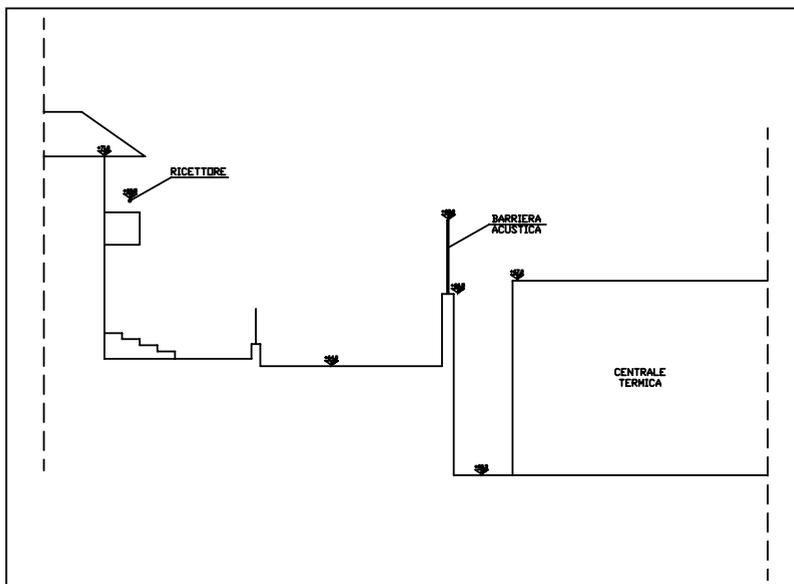


Fig. 6 – Sezione verticale in corrispondenza ad un ricettore

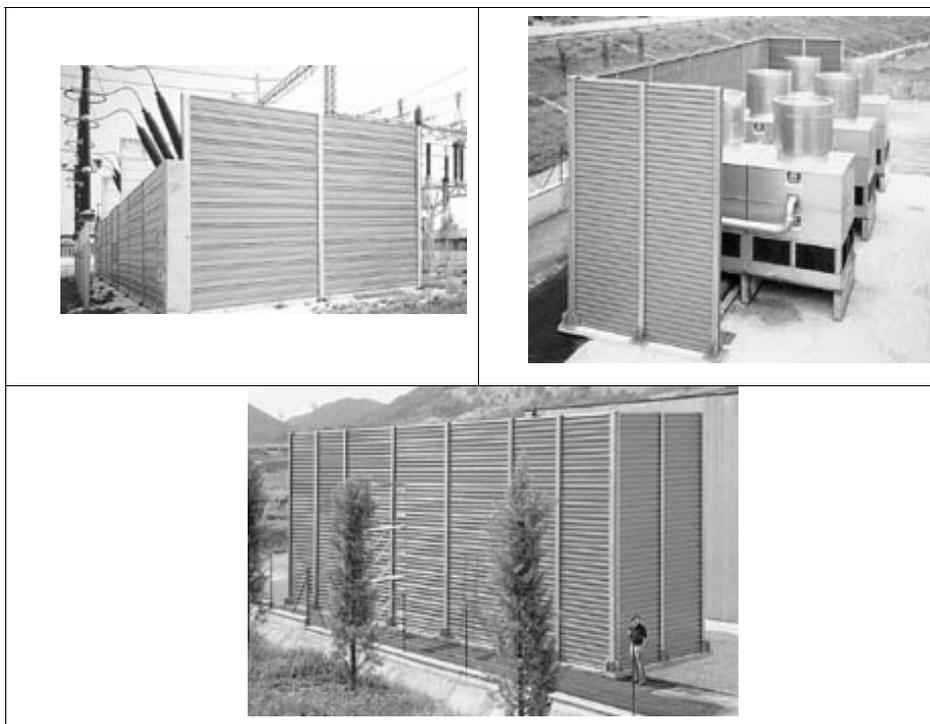


Fig. 7 - Esempi di barriere acustiche su macchine per installazione all'esterno

Le principali vie di trasmissione sonora, ciascuna delle quali contribuisce all'emissione sonora totale, possono essere pertanto così individuate:

- componenti degli edifici centrale frigorifera e termica;
- griglie per l'aerazione naturale della centrale frigorifera e termica;
- portoni della centrale frigorifera e termica;
- torri evaporative;
- camini dei generatori di calore;
- prese d'aria e di espulsione dei gruppi elettrogeni.

Per la valutazione del livello di pressione sonora al ricettore è opportuno considerare i contributi di tutti gli impianti attivi nelle condizioni di funzionamento che forniscono le potenze acustiche più elevate per le singole apparecchiature; questa condizione per alcune apparecchiature può avvenire anche con funzionamento parzializzato.

Di seguito è illustrata una procedura generale adottata per il calcolo, per ogni frequenza centrale di banda d'ottava tra 63 Hz e 8 kHz, del livello di pressione sonora dovuto alla trasmissione sonora attraverso le pareti, solai e serramenti di locali tecnologici.

- 1) Nota la potenza sonora dell'apparecchiatura e le caratteristiche geometriche e acustiche (assorbimento acustico) del locale, viene calcolata l'intensità sonora incidente la parete considerata;
- 2) da questa si calcola la potenza sonora irradiata dalla parete, mediante sottrazione del potere fonoisolante (opportunamente ridotto per considerare le prestazioni in opera) tenendo conto dell'area della superficie irradiante;
- 3) dal livello di potenza sonora irradiata è possibile ricavare il livello di pressione sonora ad una determinata distanza, valutando l'attenuazione per divergenza e le eventuali attenuazioni fornite da ostacoli alla propagazione sonora (questa operazione può essere eseguita anche tramite l'ausilio di un software specifico);
- 4) per la valutazione del rumore prodotto all'interno di ambienti abitativi potenzialmente disturbati dall'installazione considerata, il calcolo continua ricavando, dal livello di pressione sonora, il livello di intensità sonora sul lato esterno della chiusura dell'edificio interessato;
- 5) si calcola poi il livello di intensità relativo alla faccia interna sottraendo il potere fonoisolante (generalmente presunto) della parete (muro e finestra) interessata;
- 6) si calcola il livello della potenza sonora immessa nell'ambiente interno;
- 7) infine, da quest'ultimo, si ricava il livello di pressione sonora, tenendo conto per il tipo di ambiente considerato, di un assorbimento acustico medio.

Particolare attenzione sarà posta nell'esecuzione dei lavori di insonorizzazione al fine di non vanificare l'impiego di costosi manufatti. In particolare:

- al fine di garantire la continuità dei controsoffitti fonoisolanti delle centrali tutti i dispositivi e le apparecchiature non saranno appesi al soffitto ma poggeranno su portali/mensolaggi di sostegno;
- le prese d'aria esterna, quali griglie afoniche o silenziatori, saranno accuratamente attestati sul bordo delle strutture, evitando laschi o fessure che costituirebbero ponte acustico tra interno ed esterno;
- i controtelai delle finestre e dei portoni saranno accuratamente murati (anche in questo

- caso per evitare la formazione di ponti acustici), riempiendo ogni spazio residuo;
- i fori e le fessure (ad es. tra copponi) presenti sulla struttura dell'edificio saranno accuratamente sigillati.

5. IL MODELLO DI CALCOLO PROPOSTO DALLA NORMA ISO 9613-2.2

Lo scopo della norma ISO 9613-2.2 [14] è quello di specificare i metodi per calcolare l'attenuazione del suono, nella propagazione in campo aperto, al fine di predeterminare i livelli di rumore, in un punto prestabilito, causati da sorgenti di natura diversa.

La norma si divide in due parti: la prima tratta dell'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico, la seconda propone un metodo approssimato per la valutazione delle attenuazioni che si possono verificare.

E' in questa seconda parte che viene determinato il livello di pressione equivalente continuo ponderato A, in condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione del suono da una sorgente il cui spettro di potenza sonora è noto.

Il metodo prevede la determinazione dei livelli di pressione sonora per bande d'ottava comprese tra 63 Hz e 8000 Hz. L'origine del rumore viene fatta coincidere con una sorgente che, come definisce la norma, può essere sia fissa, sia mobile. Tale metodo è quindi applicabile ad un'ampia serie di sorgenti. Dapprima la norma introduce alcune definizioni, quali il livello di pressione equivalente ponderato A:

$$L_{AT} = 10 \log \left[(1/T) \int_0^T \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \quad (1)$$

dove p_A è il livello di pressione sonora globale ponderato A e il parametro tempo T deve essere di entità tale da consentire di mediare gli effetti di variazioni meteorologiche; analogamente si definisce il livello di pressione equivalente per banda di ottava:

$$L_{\pi} = 10 \log \left[1/T \int_0^T \frac{p_i^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (2)$$

in cui p_i è la pressione istantanea per banda d'ottava di una sorgente sonora.

Si definisce inoltre attenuazione per inserzione ("insertion loss") la differenza, in decibel, tra i livelli di pressione sonora che si hanno con uno schermo inserito e quelli che si hanno in assenza dello stesso, senza che nessun altro parametro abbia subito rilevanti modifiche.

In secondo luogo la norma definisce il tipo di sorgente, trattando le sorgenti di tipo puntiforme e, nel caso in cui la sorgente sia estesa, come avviene per grandi siti industriali o per strade e ferrovie, stabilisce che la sorgente debba essere discretizzata in celle aventi ciascuna una propria potenza sonora e una certa direttività.

Allo stesso tempo essa prevede anche la possibilità di assemblare una serie di

sorgenti puntiformi in una singola, situata nel mezzo del gruppo, sottostando però ad alcune precise condizioni.

L'equazione base di tale metodo è la (3):

$$L_{rr} = L_W + D - A \quad (3)$$

dove:

- L_W è il livello di potenza sonora in decibel, per banda d'ottava, prodotto dalla sorgente puntuale;
- D è la correzione dovuta alla direzionalità dell'emissione della sorgente ed è nulla per sorgenti omnidirezionali;
- A è l'attenuazione per banda d'ottava che avviene durante la propagazione.

L'attenuazione è definita con più termini, tramite la (4):

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{ground} + A_{screen} + A_{misc} \quad (4)$$

dove le varie attenuazioni sono dovute a:

- A_{div} divergenza geometrica;
- A_{atm} assorbimento atmosferico;
- A_{ground} effetti connessi con la presenza del suolo;
- A_{screen} eventuale presenza di barriere antirumore o schermi naturali;
- A_{misc} elementi aggiuntivi, come la presenza di siti industriali, di zone abitate o verdi.

Il calcolo del livello globale equivalente continuo ponderato A si effettua sommando i vari contributi, calcolati per ogni sorgente puntiforme e per ogni banda d'ottava, secondo le precedenti formule.

Qui di seguito si riportano sinteticamente i metodi che la norma stabilisce per calcolare le diverse attenuazioni.

Attenuazione per divergenza

Il fenomeno della divergenza geometrica, come già anticipato, si esplica sotto forma di onde sferiche che si propagano in campo libero a partire dalla sorgente puntiforme.

Il calcolo di tale contributo avviene sulla base della (5):

$$A_{div} = 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad (5)$$

dove d è la distanza della sorgente dal ricevente e d_0 è la distanza di riferimento pari ad 1 metro.

Attenuazione per assorbimento atmosferico

L'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico nella propagazione in un tratto di lunghezza d (in m) può essere valutata tramite la (6):

$$A_{atm} = \frac{\alpha \cdot d}{1000} \quad (6)$$

dove α è il coefficiente di assorbimento atmosferico per chilometro.

I valori di tale coefficiente sono tabulati in dipendenza dalle condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa) in cui si vuole effettuare la misura.

I valori di α forniti dalla norma vengono riassunti in tabella IV.

Il valore massimo previsto per questa attenuazione per ogni banda d'ottava è di 15 dB.

Tabella IV: coefficiente di attenuazione atmosferica a in decibel per km, per ogni banda di frequenza, in funzione della temperatura e dell'umidità relativa.

T(°C)	UR(%)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	32.8	117
20	70	0.1	0.3	1.1	2.8	5.0	9.0	22.9	76.6
30	70	0.1	0.3	1.0	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3
15	20	0.3	0.6	1.2	2.7	8.2	28.2	88.8	202
15	50	0.1	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129
15	80	0.1	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

Effetto del suolo

L'attenuazione dovuta alla presenza del suolo è il risultato dell'interazione che avviene tra l'onda diretta e l'onda riflessa dal terreno. L'attenuazione maggiore è provocata in prossimità della sorgente e del ricevente.

Il metodo proposto dalla norma ISO è applicabile solo a terreni approssimativamente lineari, orizzontali o, per lo meno, con pendenza costante.

Tale metodo prevede la distinzione del terreno compreso tra sorgente e ricevente in tre zone:

- una prima zona, chiamata "la regione della sorgente", di estensione pari a 30 volte l'altezza della sorgente sul piano campagna ed un valore massimo pari alla distanza d tra sorgente e ricevente;
- una seconda zona, chiamata "la regione del ricevente", anche questa di estensione pari a 30 volte l'altezza del ricevente sul piano campagna;
- una zona intermedia, che si trova tra le due zone precedenti, la cui esistenza è subordinata al rapporto tra la distanza d esistente tra sorgente e ricevente e l'estensione delle due prime zone.

Le proprietà acustiche di ciascuna zona sono specificate da un coefficiente G , chiamato fattore suolo.

Secondo la norma si possono classificare i terreni nelle seguenti tre categorie:

- suolo "duro", che include superfici coperte d'acqua o ghiaccio e tutte quelle che possiedono una scarsa porosità. Per questo tipo di terreni il valore del coefficiente G è pari a zero,
- suolo "poroso", cioè ad esempio tutti i terreni coperti da verde, da alberi o in generale

da vegetazione. In questo caso il coefficiente è pari ad uno,

- suolo "misto", di caratteristiche intermedie alle due situazioni precedenti. Il valore del coefficiente G è compreso tra zero ed uno.

Nel calcolo dell'attenuazione dovuta al suolo per una specifica banda d'ottava si calcolano le componenti A_s , A_r , A_m , corrispondenti a ciascuna zona, applicando il rispettivo coefficiente G.

L'attenuazione totale dovuta all'effetto suolo è fornita dalla (7):

$$A_{ground} = A_s + A_r + A_m \quad (7)$$

La norma prevede anche un secondo metodo di valutazione dell'attenuazione dovuta all'effetto del suolo, non per banda d'ottava ma globale, riferito alla scala con ponderazione A.

La formula, per valutare tale contributo, nel caso di terreno prevalentemente poroso, è la (8):

$$A_{ground} = 4.8 - \left(\frac{2h_m}{d} \right) \left[17 + \left(\frac{300}{d} \right) \right] \quad (8)$$

dove h_m indica l'altezza media della propagazione sul suolo.

Attenuazione per schermatura

Secondo la norma, un oggetto costituisce una barriera o uno schermo se possiede queste tre caratteristiche:

- la massa areica è pari ad almeno 10 kg/m²;
- l'oggetto in considerazione ha una superficie chiusa senza fessure;
- la dimensione orizzontale dell'oggetto, normale alla linea che collega la sorgente al ricevente, è maggiore della lunghezza d'onda considerata.

L'intenzione della norma ISO è quella di trattare la valutazione dell'attenuazione, per l'interposizione di una barriera, come un problema di "insertion loss".

L'effetto della diffrazione è importante, sia sulla sommità della barriera, sia sugli estremi laterali. E' necessario quindi considerare entrambi i tipi di diffrazione.

Tali contributi saranno calcolati con le due seguenti formule:

per diffrazione in sommità: $A_{screen} = D_z - A_{ground} > 0 \quad (9)$

per diffrazione lungo il bordo verticale: $A_{screen} = D_z \quad (10)$

dove D_z è l'attenuazione dovuta allo schermo, per ogni banda d'ottava, e A_{ground} è l'attenuazione per l'effetto del suolo, in assenza della barriera.

La norma indica, per la valutazione dell'attenuazione da schermo, la (11):

$$D_z = 10 \log \left[3 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 z K_w \right] \quad (11)$$

dove:

- C_2 è un coefficiente, pari a 20, che tiene conto delle riflessioni date dal suolo (in alcuni casi può valere anche 40);
- C_3 è un coefficiente che tiene conto del tipo di diffrazione; in particolare nel caso di singola diffrazione sarà pari ad 1, mentre nel caso di doppia diffrazione viene espresso dalla (12):

$$C_3 = \left[1 + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2 \right] / \left[\left(\frac{1}{3} \right) + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2 \right] \quad (12)$$

dove e , espresso in metri, è la distanza tra i due lati interessati dalla diffrazione mentre z è la differenza tra il percorso dell'onda diretta e di quella riflessa (Fig. 8a); nel caso di singola diffrazione è calcolabile tramite la (13):

$$z = d_{ss} + d_{sr} - d \quad (13)$$

mentre nel caso di doppia diffrazione (fig. 8b):

$$z = d_{ss} + d_{sr} + e - d \quad (14)$$

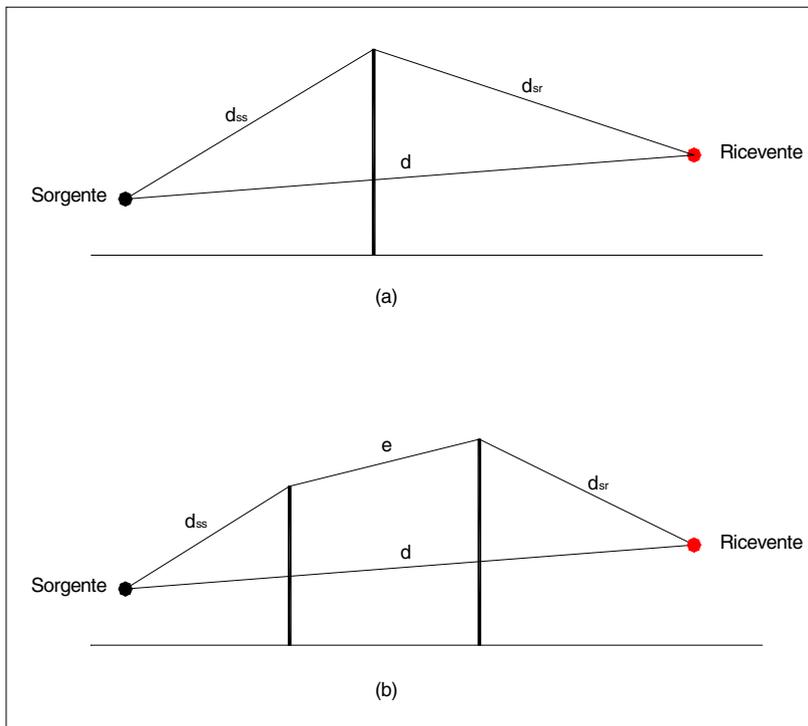


Fig. 8 – Percorso del raggio diretto e diffratto nel caso di una (a) e di due (b) barriere.

K_w è il fattore correttivo che tiene conto degli effetti meteorologici ed è pari ad 1 nel caso di diffrazione laterale, mentre per la diffrazione sulla sommità della barriera viene espresso attraverso la (15):

$$K_w = e^{-\left[\left(\frac{1}{2000}\right)\sqrt{\frac{d_{ss}d_{sr}d}{2z}}\right]} \quad (15)$$

La norma infine prevede che l'attenuazione per barriera non possa essere superiore a 20 dB nel caso di singola diffrazione e superiore a 25 dB nel caso di doppia diffrazione.
Attenuazioni addizionali

La norma, oltre ai quattro tipi principali di attenuazione prima analizzati, prevede anche tre tipi di attenuazione addizionali chiamati nella loro globalità A_{misc} , che appunto comprende le attenuazioni per la presenza di vegetazione, per la presenza di siti industriali e per la presenza di zone edificate.

Il calcolo di questi contributi dipende dalla distanza di propagazione attraverso vegetazione, siti industriali o zone abitate.

Alla fine le tre componenti sono sommate in un'unica entità:

$$A_{misc} = A_{foliage} + A_{site} + A_{housing} \quad (16)$$

La norma ISO prende in considerazione anche i fenomeni di riflessione che si possono presentare nel caso in cui l'onda sonora incontri un ostacolo come, ad esempio, le facciate degli edifici. Tali fenomeni vengono trattati in termini di sorgenti immaginarie. Il metodo di calcolo di tali fenomeni, come proposto dalla norma, avviene attraverso la determinazione del livello di potenza della sorgente immaginaria.

Gli effetti delle riflessioni provocate dal terreno non vengono considerati, in quanto sono inclusi nell'attenuazione dovuta all'effetto del suolo.

6. LA MODELLAZIONE ACUSTICA

Esistono ormai in commercio numerosi *software* che consentono di effettuare la modellazione acustica del territorio, spesso mediante l'ausilio di un'interfaccia grafica in ambiente CAD. Una delle tecniche di modellazione è quella denominata "*Search angle method*": essa consiste nel "tracciamento" di angoli, aventi il vertice nel punto in cui è presente il ricevitore (vedi Fig. 9), permettendo una sensibile riduzione dei tempi di calcolo rispetto alla tecnica che prevede il tracciamento dei raggi dalle sorgenti sonore.

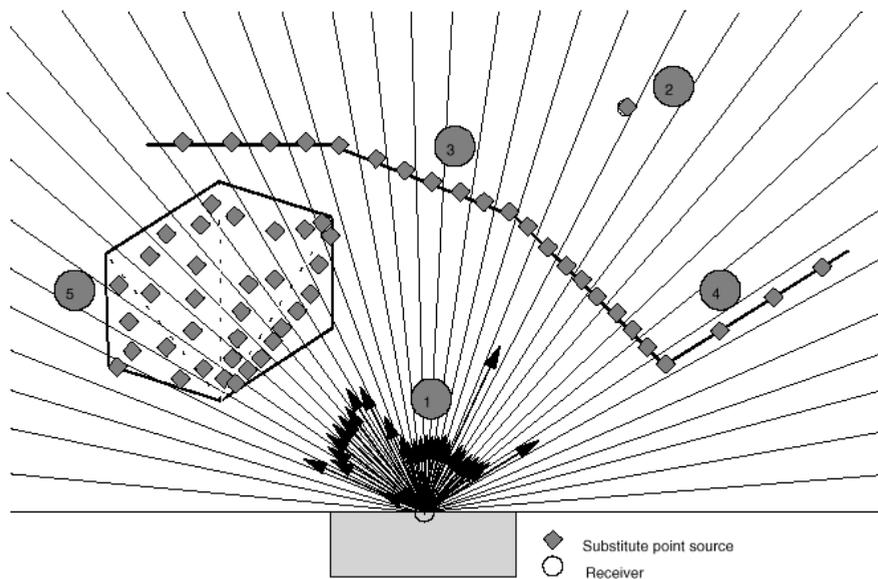


Fig. 9 – Schematizzazione del tracciamento dei raggi dal ricevitore secondo il metodo "search angle method"

Nella Fig. 10 è visibile la modellazione di un'area ospedaliera e di quelle limitrofe per l'uso dell' applicativo considerato.

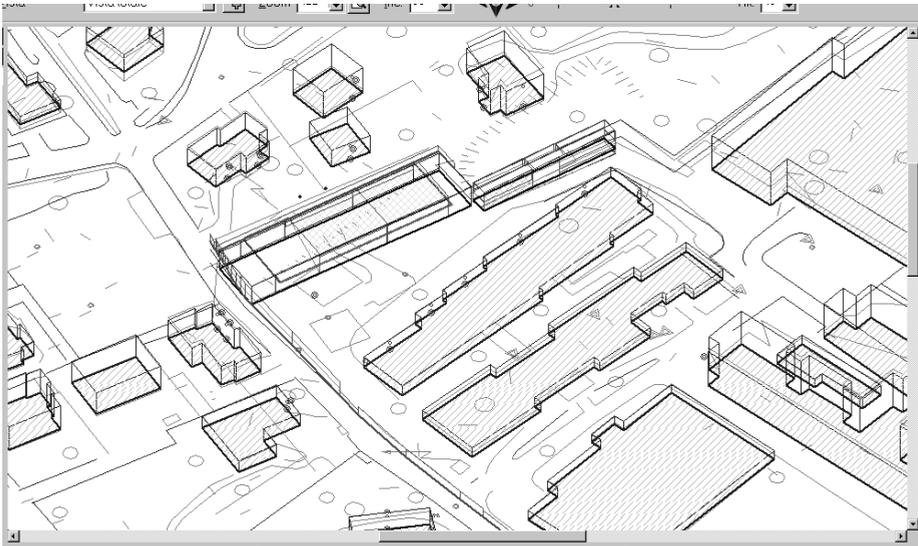
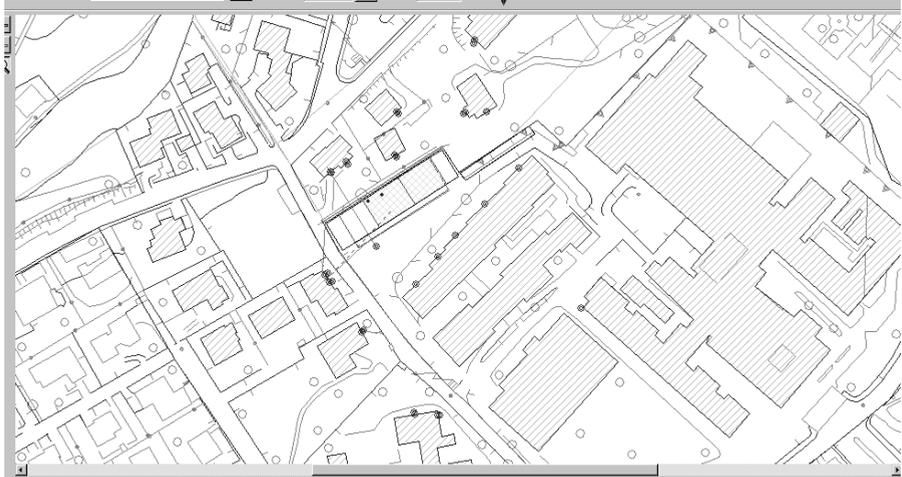


Fig. 10 – Esempio di modello 3D e delle relative planimetrie per un'area ospedaliera e zone limitrofe [15]

Il modello di calcolo illustrato è basato sulla norma ISO 9613 [14]. Si riporta sinteticamente un esempio di insonorizzazione per un complesso di torri evaporative posto nell'area ospedaliera di Fig. 10. Per dette torri, pur essendo esse dotate di silenziatori, è previsto un ulteriore intervento di mitigazione atto a contenere le immissioni acustiche nell'ambiente ospedaliero e verso l'ambiente esterno.

La soluzione adottata consiste nella realizzazione di una struttura fonoisolante di contenimento costituita da pannelli fonoassorbenti e fonoisolanti e da muratura, e dotata

di griglie afoniche per il passaggio dell'aria utilizzata dai ventilatori delle torri.

Per limitare le emissioni acustiche verso i ricettori esterni all'area ospedaliera, le griglie di espulsione e di presa dell'aria sono posizionate sul lato Sud, mentre altre aperture di ridotta superficie sono previste lateralmente.

Per un corretto funzionamento delle torri devono essere previsti internamente percorsi separati dell'aria, aspirata ed espulsa, tramite l'adozione di pannelli fonoisolanti e fonoassorbenti.

L'effetto acustico delle torri è stato simulato mediante una modellazione della struttura come un parallelepipedo che irradia energia acustica su cinque lati, come illustrato in Fig. 11. A ciascuna faccia è stata associata una specifica potenza sonora, in base ai dati di potenza acustica delle torri, attenuata secondo l'effetto delle chiusure e delle griglie.

La copertura della struttura di contenimento che racchiude le torri è realizzata mediante pannelli fonoisolanti e fonoassorbenti di spessore pari a circa 120 mm, costituiti da rivestimento esterno in lamiera di acciaio zincato (verniciato sul lato esterno) da 12/10 mm, da uno strato viscoelastico antirombo e fonoisolante, da un pannello in lana minerale, protetto da polietilene, di densità 80 kg/m^3 , spessore di 8 cm, rivestito da una lamiera forata di alluminio da 10/10 mm. I pannelli, provvisti di un sistema ad incastro in acciaio zincato maschio - femmina, hanno un coefficiente di assorbimento sul lato interno non inferiore ai valori riportati in Tab. V.

Tabella V: Coefficienti minimi di assorbimento per la struttura di contenimento delle torri dell'esempio illustrato

Frequenza [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Coeff. di assorbimento minimo	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8

L'indice di valutazione del potere fonoisolante dei pannelli, secondo la norma ISO 717/1 [12], è non inferiore a 39 dB. I pannelli sono posti in opera entro struttura in profilati metallici HEA o IPE fissata mediante tirafondi e bulloni.

I tamponamenti verticali a Sud sono costituiti da una muratura in blocchi di conglomerato di argilla espansa intonacata sul lato esterno; la muratura, di spessore non inferiore a 200 mm, e peso non inferiore a 200 kg/m^2 , ha un indice di valutazione del potere fonoisolante R_w non inferiore a 41 dB e, per la porta interna non intonacata, un assorbimento acustico NRC non inferiore a 0,25.

Le prese e le espulsioni dell'aria dovranno essere realizzate mediante griglie afoniche doppie, in grado di fornire un'attenuazione per banda d'ottava non inferiore a quanto riportato in Tab. VI:

Tab. VI – Attenuazione minima delle griglie afoniche dell'esempio illustrato

Frequenza [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Attenuazione [dB]	8	10	12	15	25	28	24	18

I percorsi interni del flusso dell'aria sono realizzati mediante pannelli sandwich fonoisolanti e fonoassorbenti di spessore 50 mm, in acciaio zincato (forato su entrambi i lati) e lana minerale ad alta densità, protetta da polietilene.

L'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w (secondo ISO 717-1) delle porte di accesso è non inferiore a 30 dB.

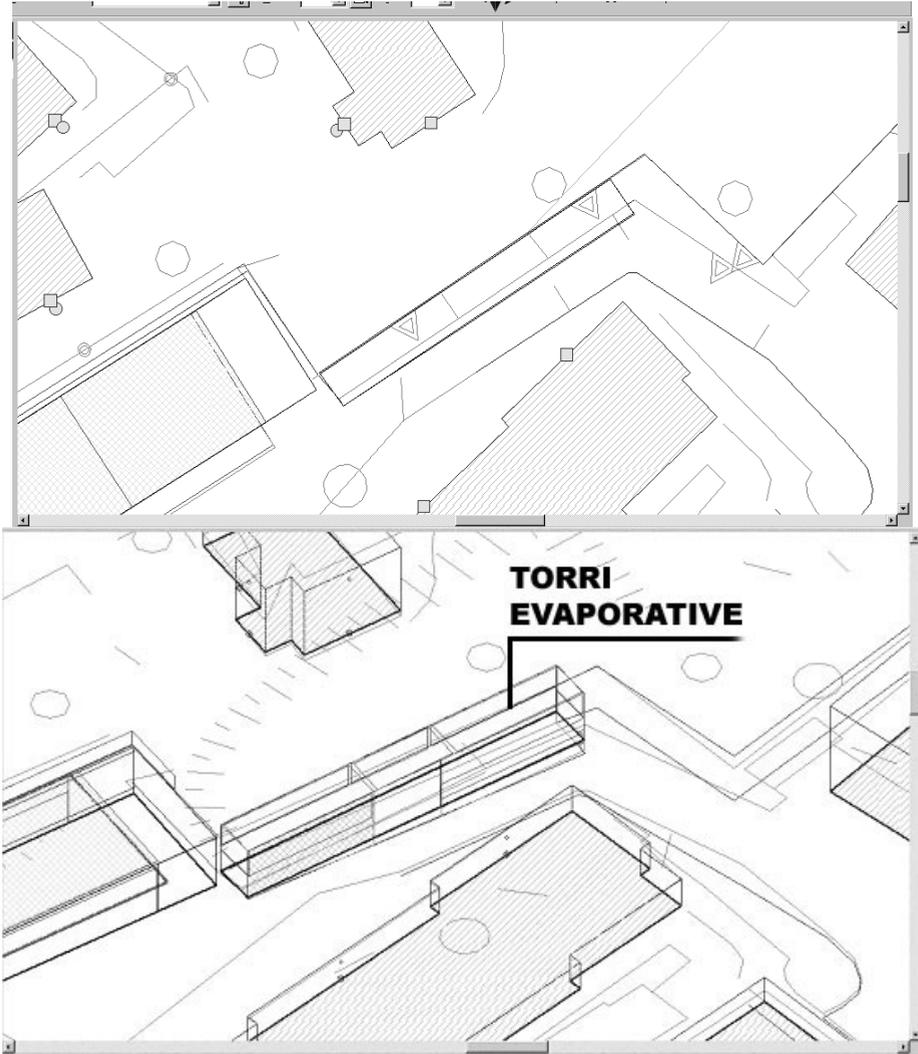


Fig. 11 – Modellazione delle torri evaporative all'interno della struttura fonoisolante

7. LE VERIFICHE DI LEGGE

7.1 La valutazione del disturbo secondo la recente legislazione

La normativa acustica di riferimento che fissa i limiti dei livelli di rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno è il DPCM 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore" [16]. Il decreto stabilisce, in attuazione dell'art. 3 della Legge Quadro sull'inquinamento acustico (Legge 447/95) [17], i limiti di emissione e di immissione di rumore, confermando quanto già disposto dal DPCM 1 marzo 1991 [18] per quanto riguarda la suddivisione del territorio in sei classi acusticamente omogenee e per i valori limite di immissione.

I valori limite di immissione, riportati in tabella VII, rappresentano i livelli massimi che in una determinata area non debbono essere superati considerando i contributi di tutte le sorgenti sonore.

Tabella VII: valori limite assoluti di immissione – Leq in dB(A)

Classi di destinazione d'uso del territorio	Diurno (6-22)	Notturmo (22-6)
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

I limiti di emissione, introdotti con la Legge 447/95, si riferiscono alla singola sorgente sonora e sono inferiori di 5 dB(A) rispetto a quelli di immissione. Il fatto che tali limiti siano inferiori a quelli di immissione sembra derivare (in carenza di chiarimenti ufficiali del legislatore) dalla necessità di escludere sorgenti sonore in grado di "saturare", da sole, il limite di immissione, permettendo la coesistenza di più sorgenti sonore di diversa natura in grado di rispettare complessivamente i valori massimi. A titolo di esempio la differenza di 5 dB(A) consentirebbe di rispettare i limiti di immissione, quando tre sorgenti sonore generano al ricettore ciascuna un livello sonoro pari al limite di emissione [19].

Tuttavia qualche incertezza può derivare dalla definizione stessa del limite di emissione. La Legge 447/95 lo definisce (art.2, comma 1, lettera e) in modo ambiguo come "il valore massimo di rumore che può essere emesso da una sorgente sonora, misurato in prossimità della sorgente stessa" (quanto in prossimità?). Il DPCM 14 novembre 1997, pur richiamando la precedente definizione della Legge Quadro (art.2, comma 1) fornisce successivamente (art.2, comma 3) la precisazione che "i rilevamenti e le verifiche sono effettuati in corrispondenza degli spazi utilizzati da persone o comunità", affermazione che non risulta coerente con la definizione della Legge Quadro.

La definizione del limite di emissione all'art.2 della Legge 447/95 sembra più coerente con quanto definito da altri decreti (come il DPR 18/11/98 n. 459 sul traffico ferroviario [20]) dove viene associata ad un valore massimo LA_{max} una specifica distanza "in prossimità della sorgente", ma è da osservare che in questo caso esiste una "fascia di rispetto" che non trova riscontro nella applicazione di cui si tratta in questa sede.

Oltre ai limiti di emissione ed immissione che caratterizzano il valore assoluto delle sorgenti, vi è un'ulteriore prescrizione (art.4 del DPCM. 14 novembre 1997) per quanto riguarda l'incremento massimo di rumore generato da una specifica sorgente rispetto al livello residuo (si tratta del cosiddetto "criterio differenziale"). I valori limite sono assunti pari a 5 dB(A) per il periodo diurno e 3 dB(A) per il periodo notturno e vanno applicati solo all'interno degli ambienti abitativi. Le prescrizioni di tale articolo non si applicano:

- alle aree esclusivamente industriali (Classe VI);
- alle emissioni acustiche generate da infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali e marittime;
- alle emissioni acustiche generate da attività e comportamenti non connessi con esigenze produttive, commerciali e professionali;
- alle emissioni acustiche generate da servizi e impianti fissi dell'edificio adibiti ad uso comune, limitatamente al disturbo provocato all'interno dello stesso.

Secondo il Decreto, i valori limite differenziali non si applicano, inoltre, quando si verificano contestualmente i seguenti casi:

- il livello di rumore ambientale misurato a finestre aperte sia inferiore a 50 dB(A) durante il periodo diurno e 40 dB(A) durante il periodo notturno;
- il livello di rumore ambientale misurato a finestre chiuse sia inferiore a 35 dB(A) durante il periodo diurno e 25 dB(A) durante il periodo notturno.

In campo impiantistico tali limiti sono molto importanti poiché spesso sono quelli che vincolano maggiormente le immissioni di rumore negli ambienti abitativi.

7.2 La verifica dei limiti assoluti di immissione ed emissione

La non facile applicazione del sopracitato decreto in fase di verifica di impianti già installati e funzionanti, al fine di caratterizzare il livello di emissione (seguendo altresì quanto indicato dal D.M. 16 marzo 1998 sulle tecniche di misura [21]), si traduce in una altrettanto complessa attività progettuale, che dovrebbe garantire livelli di rumore coerenti con i limiti di legge.

La struttura dei decreti attuativi della Legge Quadro [17,21] prevede che il controllo debba essere effettuato a due livelli:

- verifica dei limiti assoluti (immissione, emissione);
- verifica dei limiti differenziali di immissione.

Il DPCM 14 novembre 1997 stabilisce inoltre la validità dei limiti provvisori dell'art.6 del DPCM 1 marzo 1991, qualora i Comuni non abbiano ancora provveduto agli adempimenti relativi alla classificazione acustica del proprio territorio. È da osservare che in sede progettuale, in carenza di classificazione acustica, vale comunque la pena di fare qualche plausibile ipotesi (per esempio sulla scorta del P.R.G.), per non

rischiare palesi incompatibilità al momento dell'emanazione della classificazione. Per quanto concerne il limite differenziale, anche se non esplicitamente citato dalla legislazione, si osserva che esso va rispettato anche nel caso in cui i Comuni non abbiano ancora provveduto alla classificazione acustica del territorio comunale [17].

Si consideri, quindi, un'apparecchiatura caratterizzata da una data potenza sonora, che irradia energia acustica in un'area di potenziale disturbo. Coerentemente con quanto previsto dal DPCM 14 novembre 1997, che pone l'attenzione specificatamente a spazi utilizzati da persone o comunità, è ragionevole confrontare i limiti di emissione, definiti dalla zonizzazione acustica comunale (se esistente), con i livelli sonori generati dall'apparecchiatura (sorgente specifica) in questi spazi.

Nel caso della verifica del limite di emissione "in prossimità della sorgente stessa", secondo la definizione della Legge Quadro, è possibile riscontrare casi di difficile soluzione tecnico-economica. Infatti, i valori limite risultano molto più bassi di quelli generati usualmente dalle apparecchiature [18]. Indipendentemente dalla classe di appartenenza dell'area nella quale è situata la sorgente, non è necessario rispettare i limiti di emissione, in prossimità di una sorgente, qualora non vi siano spazi utilizzati da "persone o comunità". Analogamente anche in spazi occupati da edifici contenenti apparecchiature rumorose non risulta necessario (oltre che economicamente svantaggioso) il conseguimento dei limiti di zona.

Esistono situazioni per le quali non è immediato il rispetto del limite di emissione, in particolare nel caso in cui la sorgente sonora sia all'interno dell'area stessa in cui può provocare disturbo. Nel caso di ospedali, situazione tra le più complesse, spesso è presente un cospicuo numero di apparecchiature situate generalmente in un edificio (centrale tecnologica) posto all'interno dell'area ospedaliera.

Mentre è indubbio il fatto che si debba rispettare il livello di emissione per soggetti differenti dall'emettitore di rumore (in questo caso l'ospedale), per spazi interni all'area ospedaliera è opportuno differenziare due situazioni: all'interno degli ambienti (in particolare le degenze) e negli spazi esterni occupati dagli utenti.

Nel primo caso i valori di rumore presenti possono trovare una loro più appropriata limitazione nella norma UNI 8199 [22] che, in quanto norma UNI, non è cogente, ma costituisce "regola dell'arte", atta a garantire situazioni accettabili da parte dell'utenza. Questo modo di procedere risolve, in qualche modo, l'incertezza introdotta dal DPCM 5 dicembre 1997, relativamente al rumore prodotto dagli impianti tecnologici, laddove fissa, inopinatamente, un limite di 25 dB(A) per il rumore prodotto da impianti a servizio continuo, con un oscuro riferimento all'ambiente di misura che "deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina" (nota: probabilmente lo spirito del DPCM sui "requisiti acustici passivi degli edifici" era quello di limitare il rumore prodotto verso unità immobiliari distinte da quella in cui il rumore si origina, per analogia con la prescrizione in calce alla Tabella B del decreto relativamente al potere fonoisolante apparente di elementi edilizi di separazione tra due distinte unità immobiliari). La verifica acustica va pertanto effettuata calcolando l'energia sonora che, generata dalle apparecchiature, si trasmette all'interno del locale più esposto, valutando l'attenuazione delle chiusure dello stesso. A tal proposito va osservato che il DPCM 5 dicembre 1997 [23] impone specifici valori di isolamento acustico di facciata in funzione della destinazione d'uso del fabbricato.

Nei confronti di eventuali spazi esterni situati all'interno dell'area ospedaliera ed effettivamente utilizzati dagli utenti dell'ospedale stesso, quali parchi o aree verdi (ma non necessariamente per parcheggi o aree di carico e scarico o stivaggio merci), è coerente con lo spirito della legge rispettare i limiti assoluti di emissione e immissione (che nel caso degli ospedali risultano essere quelli della Classe I).

Un aspetto progettuale sul quale è opportuno porre particolare attenzione riguarda le posizioni in cui effettuare le verifiche acustiche. Può accadere, infatti, che il livello massimo di emissione sonora non si verifichi per la posizione del ricettore più vicina alla sorgente. È il caso di una sorgente di rumore schermata da un recinto, il quale può comportarsi a tutti gli effetti come una barriera acustica (Fig. 12). I punti di osservazione più vicini (ricettori R2 e R3), all'interno delle adiacenti aree private, risultano, data la loro altezza, adeguatamente schermati. Per il ricettore R1, invece, posizionato su una terrazza dell'edificio, pur essendo più distante dalla sorgente, il livello di pressione sonora può risultare maggiore.

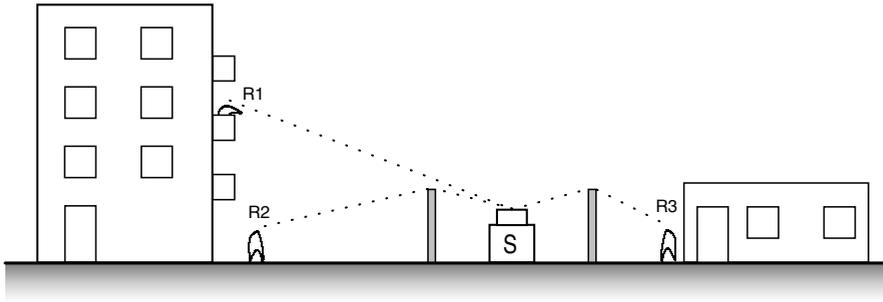


Fig. 12 - Esempio di diversi casi di esposizione al rumore di ricettori, rispetto ad una medesima sorgente

È pertanto da assumere come livello di pressione sonora di calcolo, da confrontare con il limite di emissione di zona, quello generato da una specifica sorgente, nella posizione in cui esso risulta maggiore, limitatamente a spazi utilizzati da persone o comunità. Particolare attenzione va posta per i risultati forniti dai software di previsione dei livelli sonori nell'ambiente, in quanto, se non viene considerato il livello di rumore residuo, la simulazione fornisce una distribuzione di livelli di pressione sonora, che vanno confrontati con i limiti di emissione e non con quelli di immissione (più elevati di 5 dB(A)). Nel caso di un'eventuale presenza di più apparecchiature rumorose (torri evaporative, gruppi frigoriferi, gruppi elettrogeni, centrali di trattamento aria, ecc.), appartenenti ad un unico gestore, è da ritenersi corretto considerarle come un'unica sorgente, soggetta nel suo complesso al valore limite di emissione (anche se ciò è non chiaramente prescritto dalla legge). Quest'aspetto implica particolare attenzione nella valutazione dell'effettivo peso dei differenti contributi energetici, in relazione al periodo di funzionamento delle singole apparecchiature e della contemporaneità di utilizzo delle stesse, evitando di sommare inutilmente tutti i contributi energetici massimi.

Molto spesso la previsione del paesaggio acustico generato dalla rumorosità degli impianti tecnici deve fare riferimento al periodo notturno, in quanto condizione più

gravosa ai fini della verifica della situazione acustica rispetto ai valori imposti dalla classificazione acustica del territorio. Si ricorda, infatti, che la differenza tra i limiti diurni e notturni è pari a 10 dB(A) ed implica, quindi, un rapporto energetico pari a 10, situazione che difficilmente si verifica nell'eventuale funzionamento notturno ridotto degli impianti.

Per quanto riguarda la verifica del limite di immissione questa può essere effettuata sommando, ai valori di emissione, il contributo energetico del rumore residuo dell'area in esame, ottenuto da misure sperimentali o tramite specifiche simulazioni.

7.3 La verifica del criterio differenziale

Noto il valore del livello di pressione sonora generato da una o più sorgenti sulla facciata esterna di un edificio (luogo di potenziale disturbo), la verifica, in fase di progettazione, dei valori limite differenziali di immissione richiede la conoscenza dei seguenti livelli:

- il livello di rumore residuo;
- il livello di rumore prodotto dalla sorgente all'interno dell'ambiente.

Al fine di valutare tale effetto è indispensabile conoscere preliminarmente le caratteristiche geometriche e di assorbimento acustico e del locale ipoteticamente disturbato, nonché la superficie e il potere fonoisolante di ciascun elemento che ne costituisce le pareti perimetrali; parametri raramente noti o di facile acquisizione.

Per quanto riguarda il livello residuo, l'adozione di un valore rappresentativo ai fini della verifica acustica risulta tutt'altro che agevole, data la molteplicità di sorgenti e la loro notevole variabilità anche all'interno del periodo di riferimento. L'acquisizione di misure sperimentali è certamente utile, tenendo tuttavia presente che vi è la possibilità che nuovi insediamenti possano incrementare in futuro le attività della zona e conseguentemente modificare il livello di rumore residuo; in ogni caso il livello di rumore residuo, in occasione di eventuali verifiche a posteriori, potrebbe presentarsi imprevedibilmente diverso da quanto ipotizzato.

Una possibile indicazione progettuale cautelativa è quella di ridurre il livello indotto della specifica sorgente all'interno dell'ambiente abitativo, in modo da conseguire in ogni caso il soddisfacimento di quanto prescritto dall'art. 4 del DPCM 14 novembre 1997, indipendentemente dal valore del livello residuo.

Si ipotizzi, ad esempio, di prevedere un livello di rumore L , generato da una apparecchiatura sulla facciata di un edificio, durante il periodo notturno.

Considerando la situazione a finestre aperte, è possibile ottenere il corrispondente livello interno L_i , dovuto esclusivamente all'apparecchiatura, sottraendo, dal livello sonoro esterno, l'attenuazione A tra esterno e interno dell'ambiente.

A tale proposito si riportano in Fig. 13 alcuni diagrammi ottenuti da rilievi sperimentali, effettuati secondo la norma ISO 140-5 [24], che mostrano l'andamento in frequenza della differenza tra il livello di pressione sonora, misurato in prossimità della faccia esterna di un fabbricato, e quello interno a finestre aperte e chiuse, prefissata una specifica sorgente sonora. Si può notare come il valore medio di attenuazione tra esterno e interno (differenza di livello di pressione sonora) nel caso di finestre aperte sia di circa 5-6 dB.

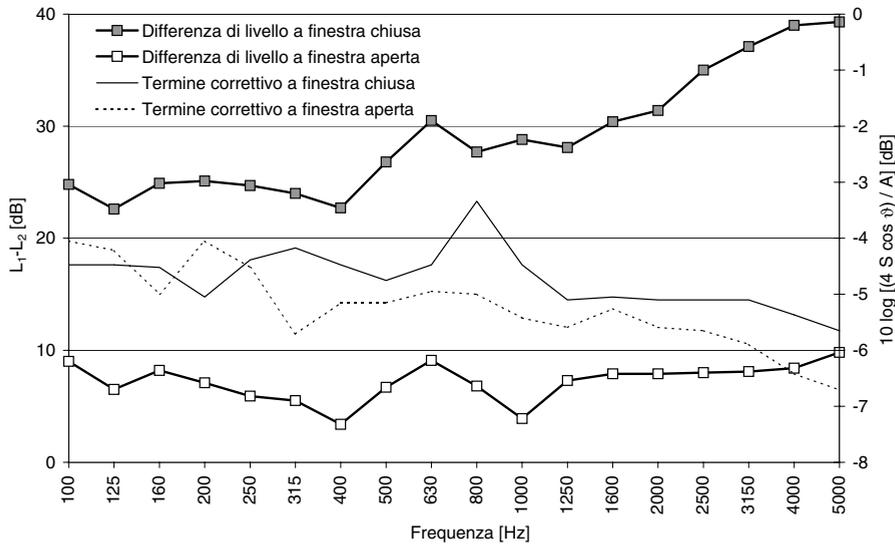


Fig.13 – Esempio di andamento in frequenza della differenza fra il livello di pressione sonora misurato in prossimità della facciata e quello interno in un edificio (a finestra chiusa ed a finestra aperta). Il termine correttivo si riferisce al metodo di calcolo proposto dalla norma ISO 140-5 per la determinazione dell’isolamento acustico di facciata con sorgente sonora elettroacustica (RJ), che tiene conto dell’angolo di incidenza del suono generato dalla sorgente e dell’assorbimento acustico dell’ambiente interno all’edificio.

Il livello di pressione sonora che si ottiene risulta pertanto:

$$L_i = L - A \tag{17}$$

Conseguentemente, il livello ambientale L_A , oggetto di verifica, è pari alla somma energetica del livello L_i e del livello residuo L_R .

Come visto in precedenza per il rispetto del limite differenziale notturno, è necessario sottostare alternativamente ad uno dei seguenti requisiti:

- $L_A \leq 40$ dB(A);
- $L_D = L_A - L_R \leq 3$ dB(A) (18)

dove L_D è il differenziale massimo consentito dalla legge.

Il rispetto del limite differenziale, indipendentemente dall’entità del livello residuo, può essere pertanto ottenuto quando il valore di L_A è inferiore a 40 dB(A) e il livello residuo L_R è trascurabile (condizione 1), mentre la condizione 2 è rispettata quando il livello residuo L_R è particolarmente alto e tale da non differire più di 3 dB(A) dal livello ambientale L_A .

Se, a titolo di esempio, ipotizziamo un livello generato da un’apparecchiatura $L = 40$ dB(A) in corrispondenza alla facciata di un edificio, otteniamo all’interno, con l’atte-

nuazione precedentemente considerata, $L_i = 35$ dB(A). Tale valore rispetta il limite differenziale per ogni valore del livello residuo, come indicato nel diagramma in Fig. 14.

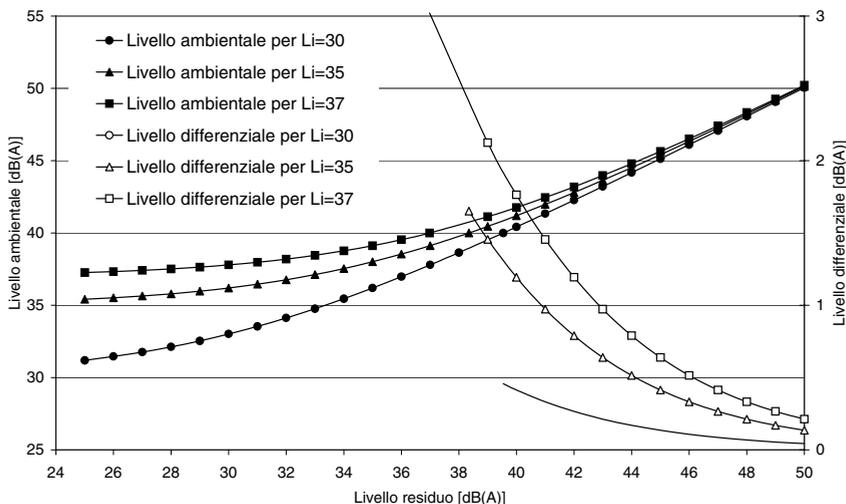


Fig. 14 - Livelli di pressione sonora ambientale in funzione del livello sonoro residuo, per diversi valori del livello L_i indotto all'interno di un ambiente con finestre aperte, durante il periodo notturno, dal solo funzionamento dell'apparecchiatura considerata.

Dal grafico si osserva infatti che per livelli residui inferiori a 38 dB(A), il livello ambientale è inferiore a 40 dB(A) e non risulta pertanto applicabile il criterio (pur con livello differenziale superiore a 3 dB(A)), mentre, per livelli residui superiori a 38 dB(A), il criterio differenziale è applicabile perché L_A è maggiore di 40 dB(A), ma la differenza $L_A - L_R$ risulta sempre inferiore a 3 dB(A). In questo caso la situazione limite si ha con un livello di emissione esterno di circa 42 dB(A) (e pertanto con $L_i = 37$ dB(A)). Tale valore permette di rispettare il limite notturno di emissione di Classe III. Ne consegue che il soddisfacimento del criterio assoluto per le Classi I e II comporta automaticamente il rispetto del criterio differenziale, mentre per le Classi superiori alla III questo diventa più restrittivo del criterio assoluto.

Le stesse osservazioni valgono nel caso di finestre chiuse, che risulta comunque, per sorgenti esterne all'edificio, una situazione meno vincolante, in quanto il potere fonoisolante dei serramenti compensa generalmente il decremento di 15 dB al limite tra situazione limite a finestre aperte e situazione limite a finestre chiuse. Peraltro, nel caso di nuove costruzioni, i valori minimi del potere fonoisolante sono ricavabili dal DPCM 5 dicembre 1997 attraverso l'indice del potere fonoisolante di facciata $D_{2m,nT,w}$, di gran lunga superiore a 15 dB.

Analoghe considerazioni si possono fare per il criterio differenziale diurno, con la differenza del limite di 50 dB(A) per l'applicabilità a finestre aperte e 5 dB come limite incrementale (Fig. 15).

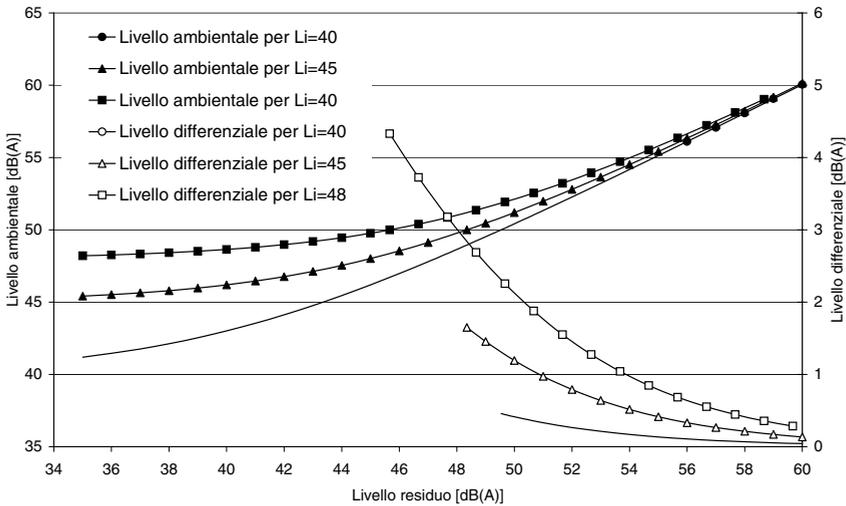


Fig. 15 - Livelli di pressione sonora ambientale in funzione del livello sonoro residuo, per diversi valori del livello L_i indotto all'interno di un ambiente con finestre aperte, durante il periodo diurno, dal solo funzionamento dell'apparecchiatura considerata.

È da evidenziare che il criterio differenziale può essere praticamente verificato solo “a posteriori” sulla base della differenza tra il valore ambientale e quello residuo [18] all'interno degli ambienti nei quali effettivamente si riscontri il disturbo, ambienti quasi sempre inaccessibili in fase progettuale, perché di proprietà diversa da quella del Committente dell'impianto. Infatti, come già detto, i livelli sonori negli ambienti abitativi dipendono dall'isolamento acustico delle chiusure dell'edificio considerato, dall'assorbimento acustico interno degli ambienti stessi, ma anche dalla specifica configurazione del clima acustico puntuale al momento della misura.

Nella verifica dei limiti assoluti e differenziali deve essere considerata l'eventuale presenza di rumori con componenti impulsive, tonali, o di bassa frequenza, che penalizzano il livello ambientale, come previsto dal D.M. 16 marzo 1998 [21].

In fase di progettazione tali indicazioni dovrebbero essere fornite dai produttori delle apparecchiature, ma a tutt'oggi si rilevano di difficile acquisizione data l'alta percentuale dei valori di rumorosità forniti dai produttori semplicemente come valore globale di pressione sonora a una certa distanza.

Si osserva che per alcuni autori, in certe condizioni, sarebbe più significativo effettuare la verifica dei limiti differenziali sul livello residuo, ma rispetto ai più bassi livelli statistici L_{AF90} o L_{AF95} (rumore di fondo). È il caso di un ricettore interessato da una sorgente disturbante (ad esempio un impianto) e da un livello residuo dovuto principalmente a traffico veicolare transiente; in queste condizioni il ricettore è in grado di percepire nettamente la sorgente sonora disturbante (l'impianto) nell'intervallo temporale in cui non passano i veicoli.

Una verifica del criterio differenziale effettivo, come precedentemente descritto, indipendentemente dal livello residuo, sarebbe appropriata anche in relazione a questo

modo di vedere. E' da osservare comunque che la legislazione si riferisce esplicitamente al livello di rumore residuo inteso come livello equivalente di pressione sonora.

Un caso particolare è quello di un livello residuo dovuto ad un flusso veicolare continuo, in una posizione ove non possa essere percepito il singolo passaggio dei veicoli: in questo caso il livello residuo e il livello di fondo sono praticamente coincidenti.

7.4 Esempi applicativi

Un primo esempio riguarda il polo tecnologico di un nuovo ospedale. All'interno dell'edificio a ciò destinato sono previsti i seguenti impianti di particolare rilevanza acustica:

- la centrale frigorifera;
- la centrale termica;
- due gruppi elettrogeni all'interno dei locali del sistema di emergenza.

La collocazione planimetrica delle sorgenti è illustrata in Fig. 16.

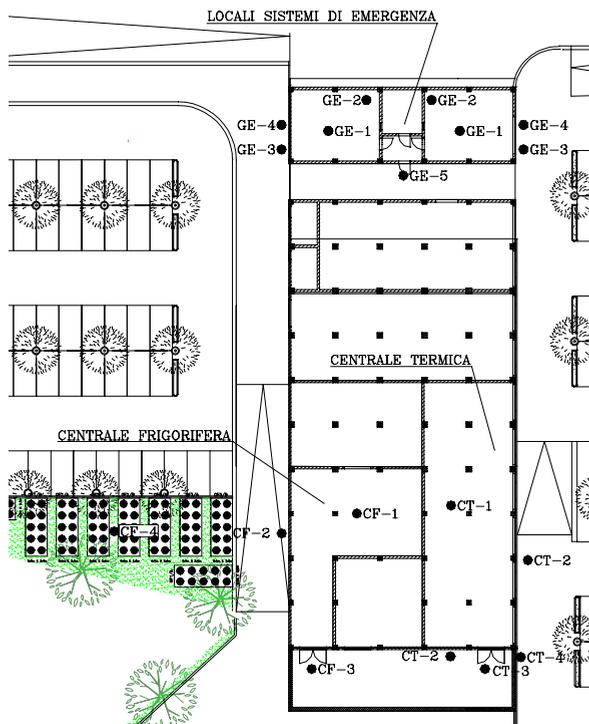


Fig. 16 - Vie di trasmissione sonora dalle centrali verso l'esterno

Al piano copertura dei vari corpi di fabbrica dell'Ospedale è prevista la collocazione delle unità di trattamento d'aria (UTA), in numero di 31 apparecchiature.

Il rumore emesso nel funzionamento corrente dalle centrali frigorifera e termica, dalle UTA e, in occasione delle periodiche verifiche funzionali, dai gruppi elettrogeni, interessa sia gli ambienti interni alle strutture ospedaliere che le adiacenti aree, ove è ubicata, a una distanza di circa 40 m, un'abitazione di due piani fuori terra. Sono state pertanto definite le opportune opere di mitigazione atte a contenere le emissioni sonore nell'ambiente esterno.

Anche gli ambienti ospedalieri, in particolar modo le degenze, devono essere adeguatamente protetti dalle emissioni acustiche prodotte dalle apparecchiature.

Per quanto riguarda i livelli di pressione sonora generati dalle apparecchiature all'interno degli ambienti ospedalieri, si fa riferimento, come già precisato, ai limiti previsti dalla norma UNI 8199 [21] (pari a 30 dB(A), nel caso di degenze) nella condizione di massimo funzionamento.

All'interno della centrale frigorifera sono collocati tre gruppi frigoriferi, con compressori di tipo a vite, di potenza frigorifera pari a circa 1500 kW. Ai tre gruppi frigoriferi sono connessi nove condensatori remoti (*dry-cooler*) raffreddati ad aria. Il funzionamento massimo contemporaneo previsto, sia durante il periodo notturno che diurno, è di due gruppi frigoriferi insieme ai relativi condensatori.

I valori LW dei livelli di potenza sonora, per le apparecchiature della centrale frigorifera, sono indicati nella tabella VIII.

In centrale termica sono previsti tre generatori di vapore e tre generatori di calore ad acqua calda, di potenza termica rispettivamente pari a 2000 kW e 2800 kW. In condizioni di massimo funzionamento sono attivi, sia durante il periodo notturno che diurno, due generatori di vapore e due caldaie.

Nel sottotetto dell'Ospedale trovano luogo le centrali o unità di trattamento aria (UTA), di portata complessiva pari a 550000 m³/h. All'interno dei locali del sistema di emergenza sono previsti due gruppi elettrogeni, di potenza elettrica nominale di circa 800 kVA ciascuno, le cui emissioni acustiche sono riportate in tabella IX.

Tabella VIII: livelli di potenza sonora di un gruppo frigorifero con compressore a vite e di un condensatore remoto

Frequenza centrale di banda	[Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Globale [dB(A)]
L _w gruppo frigorifero	[dB]	86	90	87,3	86	86,2	82,3	76,9	88,1	91,7
L _w condensatore remoto	[dB]	77,3	76,6	74,8	77,8	75	71	65,2	56,2	79,4

Tabella IX: livello di potenza sonora LW di un gruppo elettrogeno da 800 kVA

Frequenza centrale di banda	[Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Globale [dB(A)]
L _w	[dB]	107,9	119,9	123,9	121,9	122,9	121,9	117,9	123,9	128,9

Il funzionamento dei gruppi elettrogeni, che può essere anche contemporaneo, è generalmente limitato (fatta eccezione per i casi di emergenza dovuti a mancanza di alimentazione dalla rete) a collaudi settimanali, durante il periodo diurno e per una durata non superiore a mezz'ora.

Per la valutazione dei livelli sonori degli ambienti, si è fatto riferimento alle relazioni fondamentali dell'acustica relative al campo riverberato ed alla trasmissione sonora attraverso le strutture degli edifici [25]; per l'esterno è stata considerata la propagazione in campo libero, valutando eventuali attenuazioni offerte da barriere o schermature mediante gli algoritmi di Fresnel per ogni banda di frequenza [26].

Le elaborazioni effettuate hanno permesso di individuare le tipologie degli interventi di mitigazione acustica qui descritti, in modo da ottenere livelli di pressione sonora coerenti con i limiti di legge.

Gli interventi di isolamento acustico e gli accorgimenti progettuali adottati sono i seguenti.

Centrale frigorifera e centrale termica

È stato limitato il rumore generato dai ventilatori dei bruciatori dei generatori di calore e dei generatori di vapore imponendo uno spettro di livello di potenza sonora corrispondente a livelli globali di non più di 91 dB(A) e 86 dB(A) rispettivamente: si tratta di valori compatibili con la produzione corrente.

Sono state definite le modalità per migliorare l'isolamento acustico delle partizioni esterne, adottando porte fonoisolanti di accesso alle centrali termica e frigorifera (indice di valutazione del potere fonoisolante non inferiore a 25 dB); le griglie di aerazione naturale delle centrali termica e frigorifera sono state silenziate mediante l'installazione di griglie afoniche o di adeguati attenuatori acustici, tenendone opportunamente conto in fase di definizione della sezione libera effettiva.

Sono stati previsti ulteriori attenuatori acustici, oltre a quelli già installati all'interno delle UTA stesse, sulla presa d'aria esterna e sull'espulsione delle UTA; inoltre sulle due UTA che apportano maggiore contributo di energia sonora sono stati aggiunti attenuatori acustici sulle canalizzazioni di mandata e ripresa.

Locali dei sistemi di emergenza

Per questi locali sono stati previsti trattamenti fonoassorbenti dell'intradosso del solaio tramite un controsoffitto costituito da pannelli acustici, fonoassorbenti e fonoisolanti, in lana di legno mineralizzato di spessore pari a 50 mm. Anche per le pareti del filtro aerato di accesso è previsto un rivestimento fonoassorbente tramite pannelli in lana minerale.

L'isolamento acustico rispetto all'ambiente esterno è ottenuto mediante installazione di porte fonoisolanti ed è stato incrementato il potere fonoisolante delle pareti tramite una placcatura di spessore totale di 65 mm, costituita da lastre di cartongesso e intercapedine con strato in lana di vetro di spessore di 50 mm.

Sono stati inoltre previsti attenuatori acustici sull'espulsione e sulla presa d'aria esterna.

Le simulazioni hanno permesso di valutare i livelli di pressione sonora in dB(A) in alcune posizioni significative, nelle ipotesi che siano realizzati gli interventi di

mitigazione acustica sopra descritti. Sono state considerate sia le posizioni esterne all'area ospedaliera (A1, A2) che le posizioni interne (B1, B2) più significative, illustrate in Fig. 17.

Le verifiche sono state eseguite facendo riferimento a condizioni di massimo funzionamento delle apparecchiature durante il periodo diurno e quello notturno, secondo lo schema riportato in tab. X.

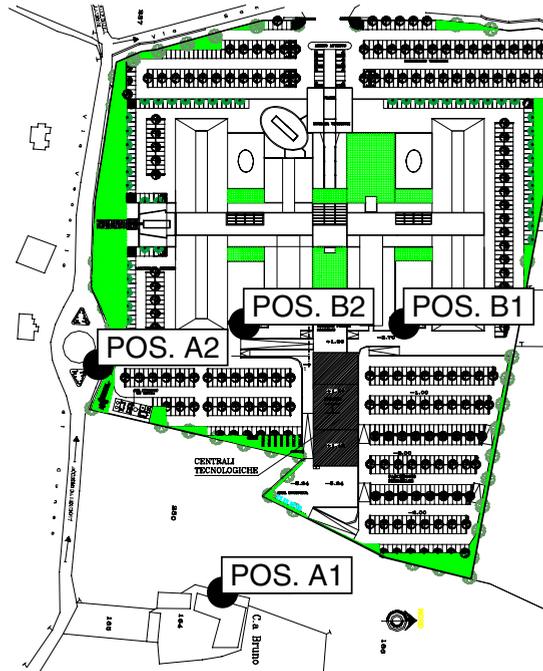


Fig. 17 - Posizioni di verifica acustica all'interno ed all'esterno di un'area ospedaliera

Tabella X: schema delle verifiche di emissione sonora in condizioni di massimo funzionamento delle apparecchiature durante il periodo diurno e quello notturno

Periodo	Centrale frigorifera e termica	Gruppo elettrogeno	UTA
Diurno (6-22)	2 gruppi frigoriferi, 6 condensatori, 1 generatore di vapore, 1 caldaia	Funzionamento contemporaneo dei 2 gruppi elettrogeni	Tutte le UTA funzionanti
Notturno (22-6)	2 gruppi frigoriferi, 6 condensatori, 1 generatore di vapore, 1 caldaia	Assenza di funzionamento	Tutte le UTA funzionanti

In fig. 16 sono indicate le principali vie di trasmissione sonora dalle centrali tecnologiche verso l'ambiente esterno, ciascuna delle quali contribuisce all'emissione sonora totale. Per quanto riguarda il locale dei sistemi di emergenza si possono individuare pertanto le seguenti vie di trasmissione sonora:

- il solaio di copertura (GE-1);
- gli attenuatori acustici di presa d'aria esterna (GE-2) ed espulsione aria (GE-3);
- l'espulsione dei gas di scarico (GE-4);
- le porte e le pareti della centrale (GE-5).

Per la centrale frigorifera e la centrale termica si possono individuare:

- il solaio di copertura della centrale frigorifera (CF-1) e termica (CT-1);
- gli attenuatori acustici o griglie afoniche per l'aerazione naturale della centrale frigorifera (CF-2) e termica (CT-2);
- le porte e le pareti della centrale frigorifera (CF-3) e termica (CT-3);
- i condensatori remoti (CF-4);
- i camini dei generatori di calore e dei generatori di vapore (CT-4).

Come precedentemente osservato altre sorgenti sonore (non indicate in figura) sono le unità di trattamento aria al piano copertura dell'ospedale.

Nella tabella XI sono riportati i valori globali ponderati A valutati in corrispondenza all'edificio più vicino (pos. A1) e al confine lungo la strada (pos. A2), sia durante il periodo diurno che notturno. Da questa tabella si osserva come i livelli di pressione sonora in dB(A) previsti siano inferiori ai limiti di emissione diurno e notturno pari rispettivamente a 55 dB(A) e 45 dB(A), per la Classe III di destinazione d'uso del territorio. Modesto risulta il contributo del gruppo elettrogeno in quanto funzionando per un periodo molto limitato (mezz'ora), genera un livello di pressione sonora corretto pari a 27 dB(A) nella posizione A1 (non si è ritenuto infatti di dover tener conto delle sporadiche quanto imprevedibili entrate in servizio per *black-out* della rete pubblica).

Tabella XI: livelli di pressione sonora globali ponderati A dei singoli impianti e complessivo all'esterno dell'area ospedaliera.

		Pos. A2	Pos. A2	Limite di emissione Classe III
Altezza sul p.c.	[m]	1,7	1,7	
L _p gruppo elettrogeno	[dB(A)]	45	46	
L _p UTA [dB]	[dB(A)]	32,5	38,5	
L _p centrale frigorifera + termica	[dB(A)]	42	40,5	
L _p massimo diurno complessivo delle apparecchiature	[dB(A)]	47	48	
L _p diurno (*) complessivo delle apparecchiature	[dB(A)]	43	43	55
L _p notturno complessivo delle apparecchiature	[dB(A)]	42,5	42,5	45

(*) Il livello diurno complessivo differisce dal livello massimo in quanto tiene conto della ridotta durata del contributo del gruppo elettrogeno, in base al periodo di utilizzo

Per quando riguarda il rispetto del criterio differenziale all'interno degli ambienti abitativi (art. 4 del DPCM 14 novembre 1997) sono state inoltre verificate le due situazioni relative al periodo diurno e notturno.

I valori limite assoluti di emissione posti a base del calcolo sono stati assunti in modo da garantire quanto previsto dal sopracitato Decreto.

Il limite di livello di pressione sonora, con gli interventi di mitigazione descritti precedentemente, risulta pertanto rispettato sia per quanto riguarda il livello assoluto che per il criterio differenziale.

Le verifiche condotte all'interno dell'area ospedaliera hanno permesso di confrontare infine i livelli di pressione sonora generati dalle apparecchiature con quelli di riferimento previsti dalla norma UNI 8199. In tabella XII sono riportati i valori massimi previsti all'interno di due camere di degenza situate lungo il lato est dell'ospedale (posizioni B1-B2 in Fig. 17) e pertanto le più esposte al rumore generato dalla centrale tecnologica e dalle sottocentrali di climatizzazione.

Tabella XII: livelli di pressione sonora L_p globali ponderati A all'interno delle degenze

		Pos. B1	Pos. B2	L_p riferimento
L_p gruppo elettrogeno	[dB(A)]	27	27	
L_p UTA p.a.e., espulsione [dB]	[dB(A)]	21	15	
L_p centrale frigorifera + termica	[dB(A)]	18	14,6	
L_p diurno complessivo delle apparecchiature	[dB(A)]	28,5	27,5	30
L_p notturno complessivo delle apparecchiature	[dB(A)]	23	18	30

Un secondo esempio riguarda la futura situazione acustica nell'ambiente esterno ad un Centro Commerciale e Direzionale dovuta alle apparecchiature di climatizzazione (di tipo *roof-top*) e refrigerazione alimentare, collocate sulla copertura dell'edificio.

Gli edifici ubicati a minor distanza si trovano a circa 50 m dal Centro Commerciale.

Mediante opportuni codici di calcolo è stata simulata la futura situazione acustica, verificando, conseguentemente, i livelli sonori immessi nelle prospicienti aree residenziali in rapporto ai limiti imposti dall'attuale legislazione.

La zonizzazione acustica comunale assegna alle aree di pertinenza degli edifici interessati la terza classe (limiti massimi di emissione della singola sorgente disturbante pari a 45 dB(A) nel periodo notturno e a 55 dB(A) in quello diurno).

In tabella XIII sono riportati i livelli di pressione sonora globale in dB(A) in campo libero a 10 m di distanza prodotti dalle quattro centrali per il freddo alimentare. Poiché il funzionamento di tali apparecchiature risulta continuo nelle 24 ore, il livello generato è il medesimo nei due periodi di riferimento (periodo diurno/notturno).

Tabella XIII: livelli di pressione sonora delle centrali frigorifere a 10 m di distanza

Apparecchiatura	L_p [dB(A)]
Impianto centralizzato TN 1	53
Impianto centralizzato TN 2	54
Impianto centralizzato BT 1	45
Impianto centralizzato BT 2	45

Sulla copertura sono installati nove condizionatori roof-top, ciascuno di potenza frigorifera pari a 200 kW; tre di questi possono essere considerati a servizio dell'ambiente della galleria, mentre i restanti sei a servizio dell'ipermercato.

La potenza sonora relativa alla motocondensante e la potenza sonora del ventilatore centrifugo della UTA per la distribuzione dell'aria negli ambienti sono riportate in tab. XIV.

Tabella XIV: livelli di potenza sonora delle sorgenti sonore del singolo condizionatore roof-top.

Apparecchiatura	L_w [dB(A)]
Ventilatore centrifugo UTA	85,5 (*)
Motocondensante	88

(*) energia acustica emessa nell'ambiente esterno

Queste apparecchiature costituiscono sorgente sonora solo durante il periodo di funzionamento, quello diurno.

In Fig. 18 è illustrata schematicamente la pianta della copertura del Centro Commerciale, ove si riconoscono, indicate da lettere, le sorgenti corrispondenti alle diverse apparecchiature:

- g, i, j, h: apparecchiature frigorifere per il freddo alimentare;
- a, c, e, k, m, o, q, s, u: ventilatori della UTA dei *roof-top*;
- b, d, f, l, n, p, r, t, v: motocondensante del *roof-top*.

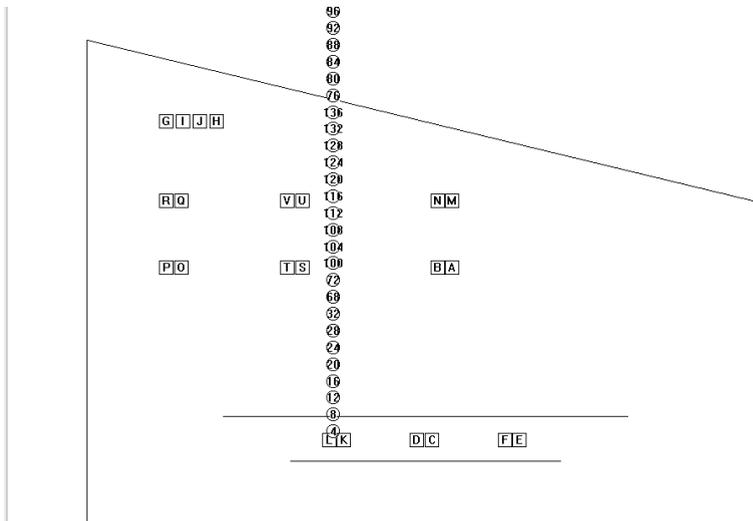


Fig. 18 - Schema della copertura di un centro commerciale, con le sorgenti sonore (indicate da lettere) e la griglia verticale dei punti di verifica (indicati da numeri).

Una prima simulazione ha permesso di individuare quale, tra il vicino gruppo di edifici, risente maggiormente delle emissioni acustiche generate dalle apparecchiature.

In corrispondenza dei singoli piani dell'edificio è stato valutato il contributo energetico di ogni sorgente. Il livello di pressione sonora equivalente durante il periodo di riferimento è stato ottenuto sommando energeticamente le sorgenti sonore attive in quel periodo. Nelle tabelle XV-XVI sono riportati rispettivamente i livelli equivalenti, in dB(A), corrispondenti al periodo di riferimento notturno, generati dalle apparecchiature del freddo alimentare, e al periodo di riferimento diurno, causati da tutte le macchine (freddo alimentare e *roof-top*). Questi valori vanno confrontati con i livelli di emissione ammissibili in corrispondenza a ciascuno dei quattro piani dell'edificio considerato.

Tabella XV: livelli equivalenti di pressione sonora durante il periodo notturno (22:00-6:00)

Piano	L_p calcolato [dB(A)]	Limite di emissione Classe III [dB(A)]
Terra	27	45
Primo	29,5	
Secondo	32	
Terzo	36,5	

Tabella XVI: livelli equivalenti di pressione sonora durante il periodo diurno (6:00-22:00)

Piano	L_p calcolato [dB(A)]	Limite di emissione Classe III [dB(A)]
Terra	38,5	55
Primo	41,5	
Secondo	44,5	
Terzo	53,5	

Sulla sezione di calcolo relativa all'edificio più esposto è stata inoltre ottenuta, per le sopracitate due situazioni, la rappresentazione grafica mediante curve isovalore (Fig. 19 a, b) del livello di pressione sonora globale espresso in dB(A).

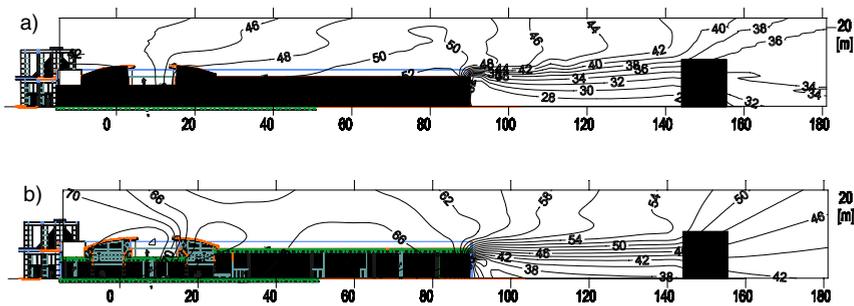


Fig. 19 - Curve isovalore, riferite ad una sezione verticale, del livello di pressione sonora ponderato A generato dalle apparecchiature di figura 18 durante il periodo notturno (a) e diurno (b)

Si osserva che i livelli di pressione sonora in dB(A) previsti sono inferiori ai limiti di emissione notturno e diurno, pari rispettivamente a 45 dB(A) e 55 dB(A) per la Classe III di destinazione d'uso del territorio.

Per quanto riguarda il rispetto del criterio differenziale all'interno degli ambienti abitativi sono state inoltre verificate le situazioni notturna e diurna. I valori limite assoluti di emissione prodotti dalle apparecchiature risultano tali da soddisfare alle prescrizioni di legge a questo proposito, indipendentemente dal livello residuo presente nell'area in oggetto.

8. CONCLUSIONI

La recente legislazione sull'inquinamento acustico impone un'attenta valutazione preliminare del possibile disturbo provocato dal rumore delle macchine correntemente utilizzate per la climatizzazione, in quanto i limiti di emissione ed immissione stabiliti dalla legge sono in certi casi notevolmente restrittivi.

Questa situazione impone ai costruttori, in primo luogo, l'adeguamento della loro produzione mediante una scrupolosa ottimizzazione acustica di componenti e strutture delle macchine, e, in secondo luogo, una rigorosa determinazione e documentazione del comportamento acustico delle macchine per agevolare il non facile compito di progettisti e installatori nel soddisfare i requisiti di legge.

Per quanto concerne i progettisti è necessario procedere ad una verifica revisionale in corrispondenza a tutti i ricettori eventualmente disturbati; tale verifica, nelle situazioni geometricamente più complesse, può richiedere la predisposizione di modelli numerici per l'impiego di software specifici. Non va dimenticata infine l'importanza di una accurata esecuzione delle opere di mitigazione acustica, poiché risulta molto facile vanificare, per effetto di sigillature imperfette, pannellature incomplete ecc., i valori revisionali di isolamento acustico.

GLOSSARIO

(Le voci di glossario qui riportate sono tratte dalla norma ISO 31/7 [27])

- Frequenza [Hz]: 1 Hz è la frequenza di un fenomeno periodico il cui periodo sia 1 secondo;
- Intervallo di frequenza: l'intervallo di frequenza tra due frequenze è il logaritmo del rapporto tra la frequenza più alta e quella più bassa. L'intervallo di frequenza tra f_1 e f_2 è di un'ottava se $f_2/f_1 = 2$;
- Pressione statica [Pa]: è la pressione che esiste in assenza di propagazione di onde sonore;
- Pressione sonora (istantanea) [Pa]: è la differenza tra la pressione istantanea totale e la pressione statica;
- Potenza sonora [W]: energia sonora trasferita in un dato intervallo di tempo, divisa per la durata di tale intervallo;
- Intensità sonora [W/m²]: per un flusso di energia sonora unidirezionale, è il flusso di energia sonora attraverso un'area perpendicolare alla direzione di propagazione, diviso per quest'area;
- Livello di pressione sonora espresso in decibel [dB]: è il logaritmo decimale, moltiplicato per 20, del rapporto tra una data pressione sonora e una pressione sonora di riferimento p_0 , pari a 20 μ Pa;
- Livello di potenza sonora espresso in decibel [dB]: è il logaritmo decimale, moltiplicato per 10, del rapporto tra una data potenza sonora e una potenza sonora di riferimento W_0 , pari a 1 pW;
- Livello di intensità sonora espresso in decibel [dB]: è il logaritmo decimale, moltiplicato per 10, del rapporto tra una data intensità sonora e una intensità sonora di riferimento I_0 , pari a 10-12 W/m².

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Di Bella, F. Fellin, R. Zecchin, "Un'indagine di mercato sulla rumorosità delle apparecchiature per la climatizzazione installate in ambiente esterno", Quaderno di Dipartimento n° 4, Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Padova, 2003.
- [2] A. Di Bella, F. Fellin, M. Tergolina, R. Zecchin, "L'emissione acustica in ambiente esterno delle macchine per la climatizzazione: normativa di riferimento e situazione di mercato" (Cda, Giugno 2001, Luglio 2001, Dicembre 2001).
- [3] ISO 3740: 1980 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Guidelines for the use of basic standards and for the preparation of noise test codes", ISO 1980.
- [4] ISO 3741: 1988 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms", ISO 1988.
- [5] ISO 3742: 1988 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for discrete frequency and narrow-band sources in reverberation rooms", ISO 1988.
- [6] ISO 3743: 1988 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Engineering methods for special reverberation test rooms", ISO 1988.
- [7] ISO 3744: 1981 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Engineering methods for free-field conditions over a reflecting plane", ISO 1981.
- [8] ISO 3745: 1977 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for anechoic and semi- anechoic rooms", ISO 1977.
- [9] ISO 3746: 1979 (E) Acoustics, "Determination of sound power levels of noise sources - Survey method", ISO 1979.
- [10] Direttiva 2000/14/CE, 8 Maggio 2000, "Ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri concernenti l'emissione acustica delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto".
- [11] Decreto Legislativo 4 settembre 2002, n.262, "Attuazione della direttiva 2000/14/CE concernente l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto".
- [12] UNI EN ISO 717-1 (1997) Acustica, "Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Isolamento acustico per via aerea".
- [13] DM 12-4-96, "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio degli impianti termici alimentati da combustibili gassosi".
- [14] ISO 9613-2:1996, Acoustics, "Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation", ISO 1996.
- [15] SOUNDPLAN di Braunstein + Berndt GmbH.
- [16] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 14/11/97, "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore", G.U. del 1/12/1997, n. 280.
- [17] Legge 26 ottobre 1995, n. 447, "Legge Quadro sull'inquinamento acustico", in S.O. n. 125 alla G.U. n. 254, del 30 ottobre 1995.
- [18] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 1 marzo 1991, "Limiti massimi