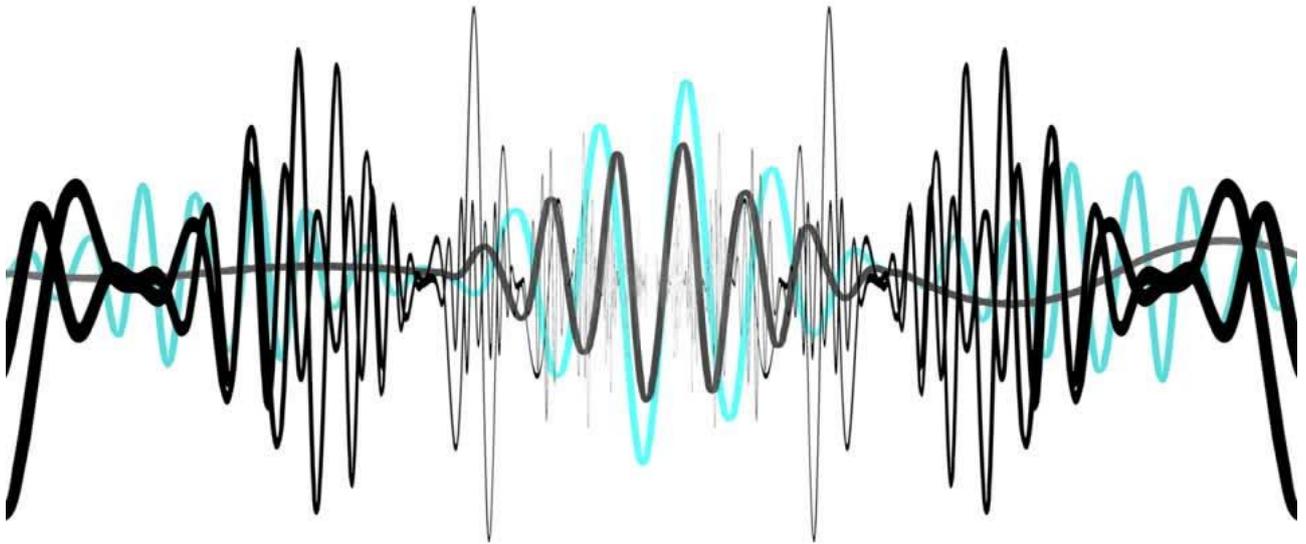


Regione Molise

Comune di Campomarino

Provincia di Campobasso



Valutazione Previsionale Impatto Acustico

“Impianto Fotovoltaico da 46.75 MWp”

Ditta: AGRIEKO Campomarino s.r.l. – Isernia (IS)

Relazione Generale e Tecnica

ANNO 2023

Progettista: **ing. Ernesto Storto**

Tecnico Competente Acustica Ambientale n° 2791 Elenco Nazionale

Via India 36/a – 86039 TERMOLI (CB)

Tel & Fax 0875/704753

ing.storto@gmail.com

Rilievi Fonometrici ed Elaborazioni Previsionali effettuati dalla società



Via India 36/a – 86039 TERMOLI (CB)

INDICE

PREMESSA

- 1.0 Modello Matematico Utilizzato**
 - 1.1 I descrittori del rumore ambientale**
 - 1.2 Descrittori acustici supplementari**
- 2.0 Modellizzazione delle sorgenti di rumore**
 - 2.1 Tipo di emissione (punto, linea, superficie)**
 - 2.2 Intensità di emissione**
 - 2.3 Direttività di emissione**
 - 2.4 Rumore da traffico stradale**
 - 2.5 Modello C.N.R.**
 - 2.6 Altri modelli di carattere generale**
 - 2.6.1 Il modello "generale" in ambito urbano**
 - 2.6.2 Il modello "generale" in ambito extraurbano**
- 3.0 Propagazione in ambienti aperti**
 - 3.1 L'equazione fondamentale**
 - 3.2 Le attenuazioni in eccesso**
 - 3.3 Effetti meteo**
 - 3.4 Effetti della vegetazione, presenza di edifici**
- 4.0 Sintesi dei modelli più diffusi ed utilizzati per la previsione**
 - 4.1 Metodi di calcolo "ad interim" (estratto dir. 2002/49)**
- 5.0 Riferimenti normativi Italiani e Regionali**
- 6.0 Condizioni Meteo del Modello**
- 7.0 Limiti di zona, sorgente di rumore oggetto della valutazione e sorgenti di rumore del modello.**
- 8.0 Giudizio Conclusivo**

PREMESSA

La sottoscritta società ISOAMBIENTE s.r.l. con sede in via India n.36/A in Termoli qualificata in servizi per l'ingegneria e l'Ambiente, con la consulenza tecnica dell'ing. Ernesto STORTO, amministratore unico della società, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Campobasso al n.766 e Tecnico Competente in materia di acustica ambientale iscritto al n.2791 Elenco Nazionale, a seguito dell'incarico avuto dallo STUDIO EKO' S.r.l., con sede in Termoli in via Dante n. 6, per conto della società AGRIEKO Campomarino S.r.l. con sede legale in Via Giulio Pastore 1/a in Termoli (CB) con P.Iva 01906880701 ha provveduto ad effettuare la Valutazione Previsionale di Impatto Acustico per la realizzazione di un IMPIANTO FOTOVOLTAICO DA 46,75 MW in agro di CAMPOMARINO (cb) da parte della stessa società agrieko s.R.L.

La presente Relazione Tecnica Acustica è composta da n. 67 pagine e da n. 2 allegati.

1.0 Modello Matematico Utilizzato

E' stato utilizzato il software revisionale e di calcolo IMMI 2018 della Wolfel di Hochberg (Germania).

Tale software per ambiente Windows specificatamente progettato per l'acustica previsionale ed inquinanti gassosi ed il cosiddetto "noise mapping".

Il calcolo viene è stato condotto attraverso algoritmi normalizzati riconosciuti dalla normativa italiana.

L'Unione Europea, nello sforzo di armonizzare le metodologie di approccio all'inquinamento acustico ambientale, ha fornito nella **direttiva 2002/49** una traccia per applicare metodologie di calcolo previsionale comuni nell'attesa di un modello armonizzato europeo, su cui stanno lavorando da tempo i maggiori esperti del settore.

Come appresso specificato per tale previsione si è utilizzato i seguenti algoritmi:

- ISO 9613 per sorgenti di rumore generiche ed aree industriali
- XPS 31-133 per traffico veicolare
- DIN 18500 per tutto le sorgenti rimanenti

IMMI 2018 è uno dei software previsionali per l'acustica ed emissioni in atmosfera più diffusi a livello europeo per la sua completezza e facilità d'uso.

Il risultato è poi collegato alla normativa nazionale in vigore.

Attualmente IMMI è in dotazione di numerose ARPA Regionali Italiane.

Si riportano di seguito i principi utilizzati per la modellistica utilizzata nello studio effettuato.

1.1 I descrittori del rumore ambientale

I descrittori del rumore sono indici o parametri che permettono di sintetizzare una o più proprietà del rumore attraverso un numero il più possibile correlato con tale proprietà.

Tali descrittori si differenziano notevolmente in funzione del tipo di sorgente di rumore trattata: traffico veicolare, ferroviario, aereo, oppure emissioni acustiche di prodotti quali automobili, elettrodomestici, ecc.

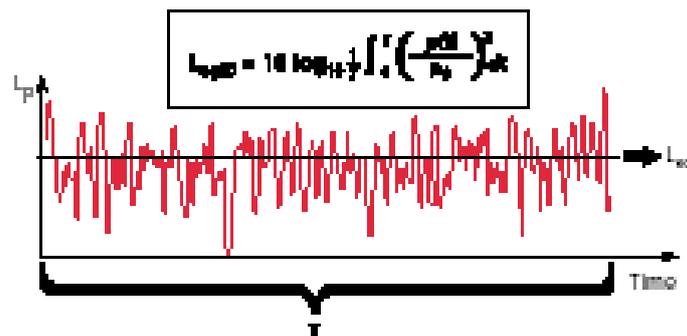
L'importanza dei descrittori è notevole, in quanto essi costituiscono sia a livello normativo, sia a livello scientifico la modalità prevalente per trattare di fenomeni connessi al rumore.

Nel caso dell'inquinamento acustico ambientale, e in particolare nel caso di traffico veicolare su strada, i parametri più usati sono sicuramente i seguenti:

- Il livello sonoro equivalente ponderato "A", L_{Aeq} ;
- I livelli percentili (o statistici), L_{AX} (in particolare i livelli L_1 , L_5 , L_{10} , L_{50} , L_{90} ed L_{95});
- Il livello massimo, indicato come L_{AFmax} ;
- Il Livello di Esposizione sonora, SEL o L_{AE} ;
- Il livello medio giorno-notte, L_{DN} o DNL; (Nuova norma)
- Il livello sonoro equivalente della comunità, CNEL; (Nuova norma)
- Il livello sonoro giorno-sera-notte, L_{DEN} . (Nuova norma)

Naturalmente l'utilizzo di tali parametri dipende da molti fattori, primo fra tutti l'ambito di appartenenza geografico-politico e, di conseguenza, la normativa del Paese.

In Italia ed in Europa il parametro sicuramente più importante è il livello sonoro equivalente ponderato "A", L_{Aeq} , che rappresenta una ottima sintesi di tipo energetico del rumore ambientale.



L_{Aeq} è definito dalla relazione:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{0,T} 10^{L_A(t)/10} dt \right]$$

dove

$L_A(t)$ rappresenta il segnale variabile nel tempo ed esprimibile come:

$$L_A(t) = 10 \log [p(t) / p_0(t)]^2$$

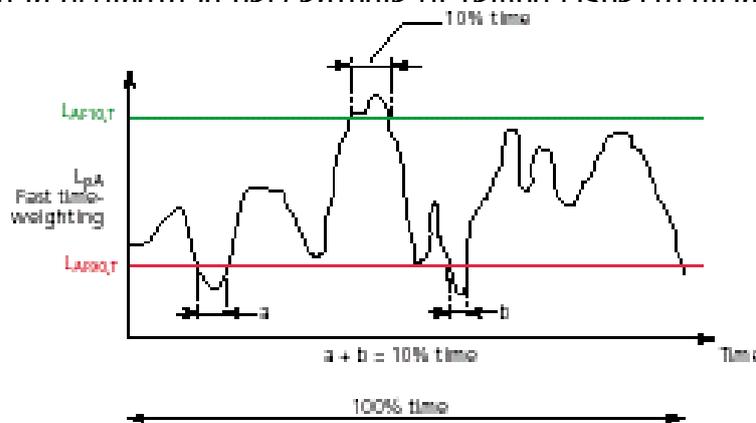
Il livello equivalente rappresenta pertanto quel livello che possiede, nell'intervallo di tempo considerato, la stessa energia sonora del segnale variabile nel tempo da cui esso deriva (media integrale).

Da un punto di vista analitico, il livello equivalente non è null'altro che una **media logaritmica dei valori di energia sonora** (si ricordi che $p^2(t)$ è proporzionale alla potenza, e dunque all'energia).

Altri parametri molto utili in ambito italiano ed europeo spesso utilizzati sono i **livelli percentili ponderati "A"** L_{AX} , definiti come quei livelli sonori che vengono superati per una percentuale del tempo di misura corrispondente al parametro X. Ad esempio, il livello L_{10} rappresenta il livello sonoro superato per il 10% del tempo di misura.

Ne consegue che L_1 rappresenterà una significativa indicazione dei picchi di rumorosità, mentre L_{95} sarà un buon indicatore del rumore di fondo.

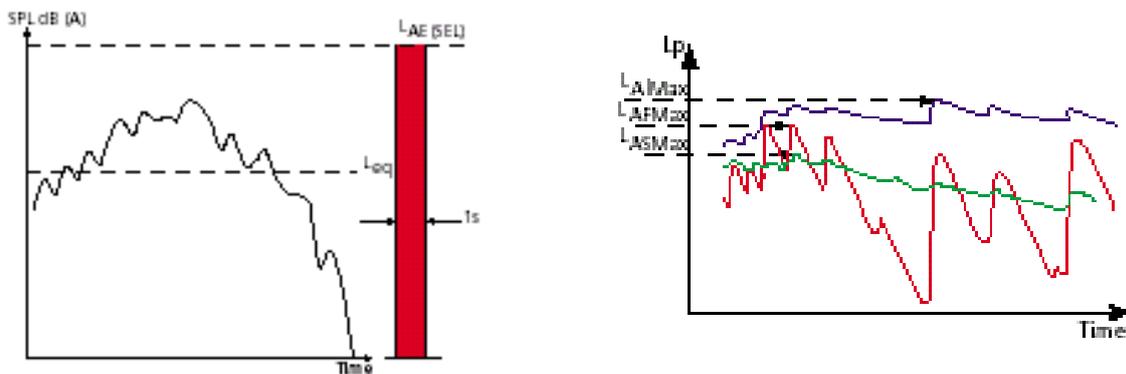
I livelli percentili possono anche essere utilizzati per dare una rappresentazione statistica degli eventi sonori: in questo caso si parla di distribuzione cumulativa dei livelli, che individua in ordinata la percentuale di tempo rispetto all'intero intervallo di misura in cui cias



Molto spesso, in acustica ambientale, vengono utilizzati alcuni livelli statistici di particolare significato, anche se nella normativa non vi è alcuna associazione definita: L_{90} (o L_{95}) viene associato al rumore di fondo, mentre L_{50} è il livello mediano, spesso vicino al livello equivalente. L_{10} rappresenta i picchi del rumore.

In alcuni casi vengono utilizzate anche combinazioni di questi parametri, come ad esempio la differenza $L_{10}-L_{90}$.

Altri parametri molto utilizzati sono correlati ad eventi, e dunque utilizzati per il rumore ferroviario ed aereo: SEL (o L_{AE}) e L_{ASmax} (non è tuttavia escluso che vengano utilizzati per il rumore da traffico stradale, in quanto esistono correlazioni fra questi ed il livello equivalente).



Nella direttiva europea di prossima pubblicazione concernente l'inquinamento acustico ambientale il parametro principale scelto per quantificare il rumore ambientale è il livello L_{DEN} **giorno-sera-notte**, che rappresenta un livello equivalente sull'intero arco delle 24 ore, ponderato secondo un criterio di differente sensibilità al rumore nei tre periodi standard della giornata.

1.2 Descrittori acustici supplementari

In alcuni casi può essere utile usare speciali descrittori acustici con relativi valori limite

Ad esempio nelle circostanze seguenti:

- la sorgente di rumore in questione è attiva solo per un tempo parziale (ad esempio meno del 20 % rispetto al totale dei periodi diurni di un anno, al totale dei periodi serali di un anno o al totale dei periodi notturni di un anno),
- in media, in uno o più periodi considerati, si verifica un numero esiguo di fenomeni sonori (ad esempio meno di uno all'ora; ove si può intendere per fenomeno sonoro un evento di durata inferiore a cinque minuti, ad esempio il passaggio di un treno o di un aeromobile),
- il rumore ha forti componenti di bassa frequenza,
- L_{Amax} , o SEL (livello di esposizione a un suono) ai fini della protezione durante il periodo notturno in caso di picchi di rumore,
- protezione supplementare nei fine settimana o in particolari stagioni dell'anno,
- protezione supplementare nel periodo diurno,
- protezione supplementare nel periodo serale,
- una combinazione di rumori da diverse sorgenti,
- zone silenziose in aperta campagna,
- il rumore contiene forti componenti tonali,
- il rumore contiene forti componenti impulsive.

2.0 MODELLIZZAZIONE DELLE SORGENTI DI RUMORE

I modelli oggi utilizzati comunemente e disponibili in commercio si basano su equazioni di tipo semi-empirico, ossia ottenute partendo da una raccolta di dati sperimentali supportati da fondamenti teorici.

Si tratta dunque di relazioni piuttosto semplici, che hanno il vantaggio di poter prendere in considerazione aspetti anche complessi della propagazione acustica (effetto del terreno, diffrazioni, riflessioni multiple) senza per questo richiedere una mole eccessiva di dati o una competenza troppo specialistica da parte dell'utente.

Solitamente tali modelli si avvalgono di tecniche di calcolo improntate alle teorie classiche del "ray-tracing" (tracciamento dei raggi) e delle "sorgenti immagine". In sostanza, tali tecniche permettono di costruire delle *funzioni di trasferimento* parametriche fra sorgente e ricevitore (ray-tracing classico) o anche, al contrario, fra ricevitore e sorgente (ray tracing inverso) attraverso le quali è possibile tenere in opportuno conto la divergenza geometrica e le attenuazioni in eccesso.

Esistono, oltre a modelli semi-empirici di questo tipo, modelli assai più dettagliati (FEM e BEM), di tipo numerico, in grado di valutare con grande precisione, il comportamento del campo sonoro: tali modelli, oltre ad essere molto più costosi, richiedono una maggiore perizia da parte dell'utente ed una grande attenzione nel fornire i dati di input: si giustifica l'uso solo qualora sia di interesse lo studio di

particolari comportamenti del suono, come ad es. la modellizzazione ai fini dell'ottimizzazione di un top di una barriera antirumore.

Nel campo dell'acustica ambientale, e più specificamente riguardo alla modellizzazione del traffico stradale, si utilizzano solitamente modelli basati su relazioni matematiche semi-empiriche del tipo

$$L_i = L_e + A$$

dove L_i è il livello sonoro di immissione, L_e è il livello di emissione della sorgente e A rappresenta la sommatoria degli effetti acustici dovuti al percorso fra sorgente e ricevitore (divergenza geometrica, riflessione, diffrazione...).

Il problema della previsione si suddivide quindi in due sotto-problemi:

- *modellizzazione della sorgente*
- *modellizzazione della propagazione*

I modelli per la previsione del rumore possono essere considerati come modelli "completi" quando trattano il problema della modellizzazione di entrambe gli aspetti, mentre sono da considerarsi "dedicati" ad un particolare aspetto quando trattano solo uno dei due sotto-problemi (o parti di essi).

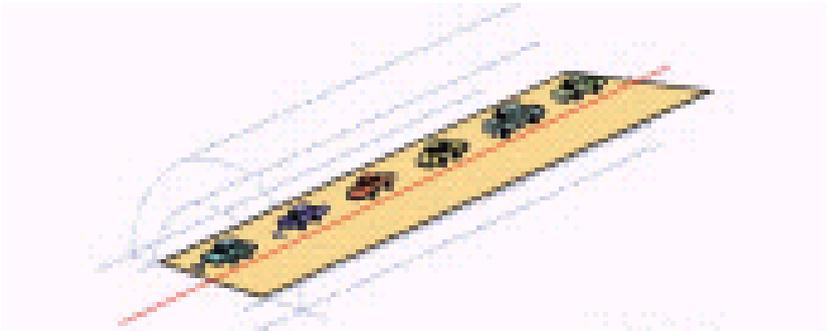
Vedremo più avanti diversi modelli normalizzati, ma per esemplificare è già possibile affermare che un modello come quello proposto dalla norma tedesca DIN 18005 è "completo" (tratta cioè della modellizzazione del rumore da traffico sia in termini di

descrizione delle sorgenti sia in termini di propagazione), mentre il modello ISO 9613 è "dedicato" al problema della propagazione in ambiente esterno, senza fare riferimento nè descrivere alcuna tecnica di modellizzazione specifica per le sorgenti.

Nei modelli per il traffico (stradale o ferroviario) possiamo trovare modelli che trattano la sorgente (lineare) come sorgente lineare vera e propria e altri che la riconducono ad un insieme di sorgenti puntiformi.

Nel primo caso la strada viene considerata come un **unico segmento** la cui energia sonora è distribuita in modo omogeneo e di conseguenza i calcoli vengono eseguiti in termini di un valore integrato nei termini descritti nei primi capitoli.

Nel secondo caso la sorgente viene ricondotta ad un insieme di tratti o segmenti di strada dai quali la propagazione avviene tramite **sorgenti puntiformi baricentriche** al segmento stesso. Quest'ultimo caso è di gran lunga il più utilizzato nei pacchetti software commerciali, in quanto più semplice da trattare in termini di calcolo.



La sorgente oggetto della modellizzazione viene suddivisa in tratti omogenei, rappresentati acusticamente da sorgenti puntiformi, dove ogni punto è caratterizzato da una potenza acustica proporzionale alla lunghezza del segmento di strada relativo.

Il numero di punti richiesto per rappresentare correttamente una sorgente rettilinea è determinato dal cosiddetto "criterio della distanza":

$$l < C s$$

dove l è la lunghezza del tratto lineare, C una costante dipendente dal singolo modello ed s la distanza dal centro del segmento al punto ricevitore.

Mentre la determinazione dei livelli di emissione è strettamente legata alla sorgente e quindi i livelli risultanti possono variare a secondo della tipologia del traffico esistente e dalle sue caratteristiche intrinseche (modo di guida, tipologia delle strade, limiti di velocità, tipo di veicolo ecc.), la parte di propagazione ne è ovviamente indipendente.

Pertanto, mentre i livelli di emissione derivano dalla regressione lineare dei risultati di campagne di misure in svariate configurazione dei parametri d'ingresso, la parte propagativa segue leggi fisiche che approssimano i complessi fenomeni ad essa legati.

Verranno pertanto presentati alcuni esempi di modelli matematici, alcuni anche datati ma proprio per questo più diffusi, per illustrare in maniera generale i parametri che stanno alla base della simulazione della emissione della sorgente, per poi trattare in dettaglio gli aspetti della propagazione, che proprio perché generali possono trovare un riferimento in norme specifiche almeno per un buon numero di applicazioni.

Rumore di sorgenti generiche

Le sorgenti sonore presenti nell'ambiente esterno possono essere di vario tipo:

- Sorgenti legate al traffico (veicolare, ferroviario, aereo);
- Sorgenti di tipo industriale (compressori, gruppi elettrogeni, caldaie, ventilatori)
- Sorgenti antropiche (legate all'attività umana)
- Sorgenti naturali (vento, pioggia, animali, movimento di masse d'acqua)
- Sorgenti varie (esplosioni, attività militari)

Ciascuna di queste tipologie di sorgenti può essere schematizzata (o, più precisamente, *modellizzata*) attraverso tre tipologie di forma:

- Sorgenti puntiformi;
- Sorgenti lineari;
- Sorgenti superficiali (areiformi).

E' piuttosto ovvio pensare che il concetto di forma di una sorgente dipenda, oltre che dalla forma intrinseca della sorgente, dalla reciproca posizione di sorgente e ricevitore (funzione della distanza sorgente-ricevitore).

La sorgente sonora deve essere dunque caratterizzata dai seguenti parametri:

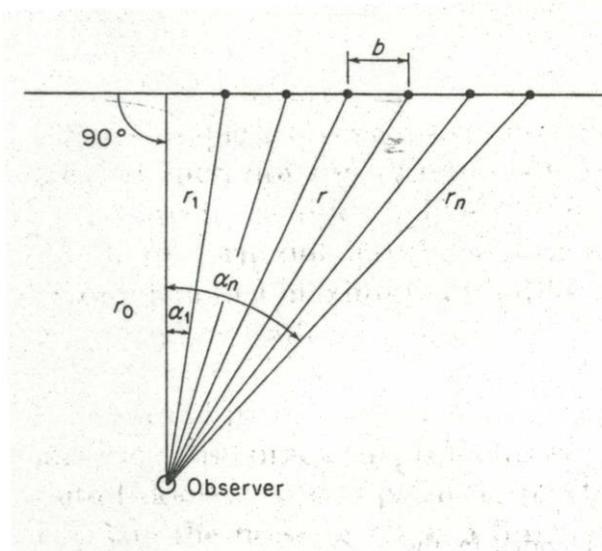
- Tipo di emissione (puntiforme, lineare, areiforme);
- Intensità di emissione (espressa in termini di potenza sonora);
- Direttività di emissione (espressa in termini di fattore di direttività).

2.1 Tipo di emissione (punto, linea, superficie)

Ora, è evidente come vi debba essere un criterio per identificare "quando" una sorgente possa essere definita puntiforme, lineare o superficiale: tale criterio è basato sul concetto di geometria della sorgente e di distanza fra sorgente e ricevitore.

Una sorgente puntiforme ideale possiede tutta la propria energia sonora concentrata in un punto, ed è ovviamente la più semplice da modellizzare in termini matematici: esempi di tali sorgenti sono difficilmente riscontrabili nel mondo reale, anche se la grandissima parte delle sorgenti reali possono essere ricondotte a puntiformi (grazie a considerazioni pratico-teoriche ed alla modellizzazione).

Consideriamo invece una sorgente di traffico stradale, e schematizziamo il flusso continuo delle auto con una serie di punti-sorgente distribuiti ad intervalli regolari (b) lungo l'asse della strada. Appare piuttosto evidente che quando la distanza b fra le sorgenti puntiformi diventa molto piccola, l'insieme delle sorgenti puntiformi stesse rappresenta proprio una sorgente lineare teorica.



Se le sorgenti sono fra loro incoerenti il livello sonoro al ricevitore può essere espresso dalla relazione seguente:

$$L_p = L_{wu} + 10 \log [(\alpha_n - \alpha_1) / r_0 b] + \Delta L - 8 \quad \text{dB}$$

dove L_{wu} è il livello di potenza di ciascun punto-sorgente, $\alpha_n - \alpha_1$ è l'angolo di vista delle n sorgenti, r_0 è la distanza perpendicolare del ricevitore dalla linea stradale, b la distanza fra due sorgenti e n il numero delle sorgenti.

ΔL rappresenta invece un termine correttivo di espressione matematicamente complessa, anche se si può assumere sia inferiore a 1 dB nel caso in cui il numero di sorgenti sia superiore a 3 e contemporaneamente valga l'espressione di Rathe:

$$r_0 / (b \cos \alpha_1) \geq (1 / \pi)$$

La condizione appena esposta, derivata appunto dalla teoria di Rathe, indica che è possibile ridurre un insieme di punti distribuiti su di una linea a sorgente lineare qualora la distanza (perpendicolare) del ricevitore dalla linea stessa sia superiore a 1/3 della distanza fra due punti-sorgente sulla linea.

Se questa condizione non è soddisfatta allora l'energia sonora derivante dal punto-sorgente più vicino al ricevitore prevale rispetto a quella dei punti-sorgente più prossimi.

Per un numero infinito di punti-sorgente $\alpha_n - \alpha_1 = \pi$ e l'equazione di cui sopra diventa:

$$L_p = L_{wu} + 10 \log [r_0 b] - 3 \quad \text{per } r_0 \geq (b/\pi)$$

$$L_p = L_{wu} - 20 \log [r_0] - 8 \quad \text{per } r_0 \leq (b/\pi)$$

Dunque, volendo riassumere, quando la distanza di un ricevitore da una sorgente lineare risulta inferiore a circa 1/3 ($= 1/\pi$) volte la distanza fra ciascuna sorgente distribuita sulla strada stessa¹ (b) la sorgente dovrà essere considerata puntiforme. Viceversa, la sorgente dovrà essere considerata lineare.

Questo risultato è fisicamente evidente: quando sono in prossimità ad una sorgente concentrata (puntiforme) distante da altre sorgenti non sento l'influenza delle altre sorgenti, che invece cominciano a farsi sentire quando la distanza del ricevitore supera la distanza critica b/3.

Risulta particolarmente interessante il caso di una sorgente lineare di dimensioni d limitate, in cui si avranno le seguenti relazioni:

$$L_p = L_{wL} + 10 \log [(\alpha_2 - \alpha_1) / r_0 b] - 8 \quad \text{dB}$$

dove L_{wL} è il livello di potenza sonora dell'intero tratto lineare.

¹ Si noti che tale distanza può essere anche considerata come la dimensione massima della sorgente o della "cella".

in prossimità della sorgente, dove $\alpha_2 - \alpha_1$ tende a π si avrà:

$$L_p = L_{wL} - 10 \log (r_0 d) - 3$$

in distanza sulla sorgente lineare, dove $\alpha_2 - \alpha_1$ tende a d/r si avrà:

$$L_p = L_{wL} - 20 \log r - 8$$

dove r indica la distanza dal centro della sorgente lineare.

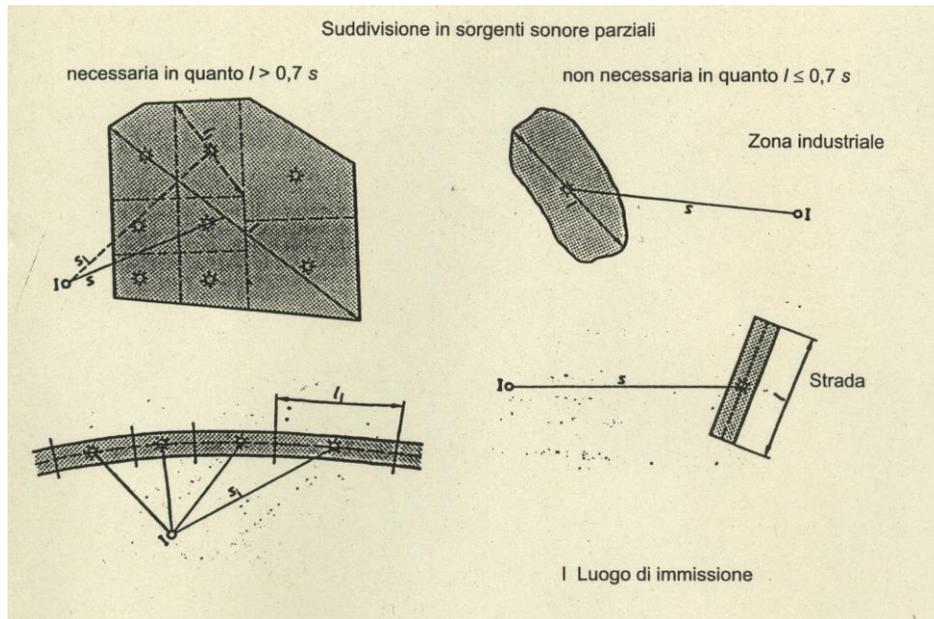
Per quanto riguarda il caso delle sorgenti superficiali, si applicano le stesse relazioni, estese ovviamente al caso bidimensionale.

In generale, la tendenza dei modelli normalizzati è quella di ridurre tutte le sorgenti lineari e superficiali a un insieme di sorgenti puntiformi.

Il criterio secondo cui viene eseguita la trasformazione dipende da modello a modello, ma in generale si applica un criterio basato sulla distanza sorgente-ricevitore l tale per cui:

$$l < \beta s$$

Pertanto, una delle attività più importanti operate dai modelli attualmente esistenti riguarda la suddivisione della sorgente sonora (lineare o superficiale) in sorgenti sonore parziali che rispettino il criterio della distanza.



La suddivisione deve innanzitutto rispettare il criterio della distanza e , in aggiunta, considerare la necessità di una ulteriore suddivisione in funzione della presenza di ostacoli in grado di frapporsi tra sorgente e ricevitore.

In questo caso, infatti, la sorgente puntiforme derivante dalla suddivisione può risultare schermata dall'ostacolo, e dunque si può avere una sottostima del livello al ricevitore.

2.2. Intensità di emissione

L'intensità di emissione è espressa in termini di potenza sonora o, equivalentemente, di livello di potenza sonora, solitamente indicato come L_w .

Si è già visto sopra come sia particolarmente utile l'utilizzo dei dB, e dunque il livello di potenza sonora sarà espresso in dB.

L'intensità di emissione di una sorgente potrà tuttavia essere data in modi diversi, in funzione del tipo di sorgente (puntiforme, lineare, superficiale) e della disponibilità di dati.

Per una sorgente puntiforme potremo ad es. trovare dati espressi in termini di livello di potenza, ma anche, spesso, trovare dati in termini di livello di pressione sonora.

In quest'ultimo caso il passaggio al livello di potenza potrà essere effettuato solo in base alla conoscenza (o all'estrapolazione, soprattutto sulla base del buon senso) di dati aggiuntivi quali la distanza di misura del livello di pressione sonora media L_p , le caratteristiche del campo sonoro e della propagazione, la direttività di emissione. In particolare, se viene fornito il livello di pressione di una sorgente a 5 m di distanza, posta su piano asfaltato e in assenza di direttività, la relazione applicabile per ricavare l'indispensabile **livello di potenza sonora** sarà:

$$L_w = L_p + 10 \log(2\pi r^2) = L_p + 10 \log(2\pi 5^2)$$

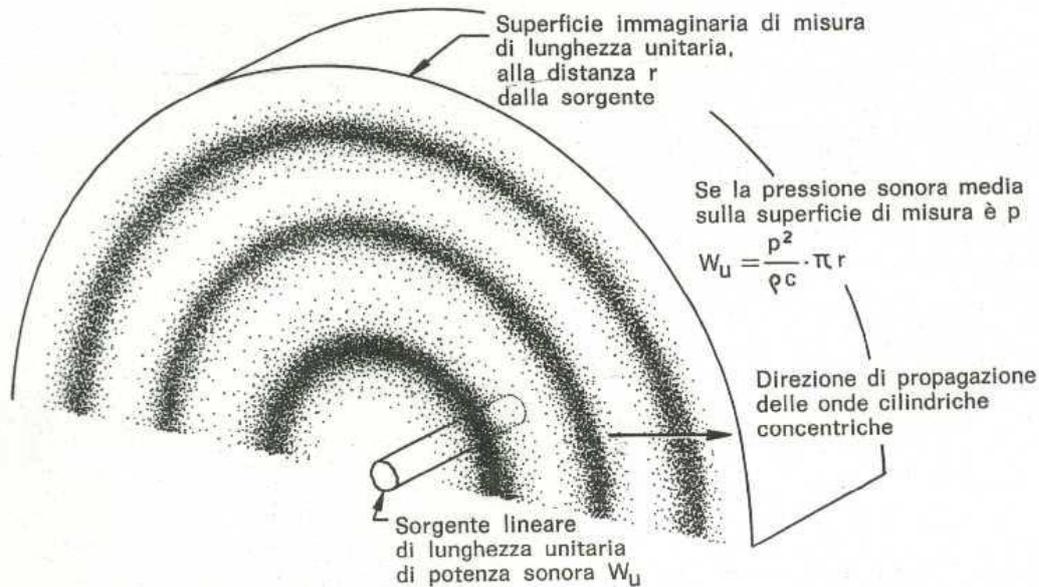
Per una **sorgente lineare** i dati potranno essere espressi in termini di livello totale di potenza sonora, oppure in termini di livello di pressione ad una certa distanza d , oppure ancora in termini di livello di potenza sonora per unità lineare (o densità di potenza lineare) $L_{w/m}$.

E' piuttosto comune l'ultima di tali possibilità, in quanto la potenza sonora distribuita lungo una linea può essere comodamente espressa come:

$$L_w = L_{w/m} + 10 \log(l/l_0)$$

dove l rappresenta appunto la lunghezza della sorgente lineare e l_0 la lunghezza di riferimento (= 1 m).

Dunque, una sorgente lineare (ad es. una strada) di lunghezza 100 m e con una densità di potenza lineare $L_{w/m} = 80$ dB avrà una potenza totale pari a $L_w = 80 + 10 \log(100) = 100$ dB.



Le stesse considerazioni si applicano alle **sorgenti superficiali**, per le quali vale la relazione:

$$L_w = L_{w/s} + 10 \log (S/S_0)$$

dove $L_{w/s}$ è utilizzabile per esprimere la potenza sonora per unità di superficie, mentre S rappresenta la superficie totale di emissione ed S_0 la superficie di riferimento ($=1 \text{ m}^2$).

Il livello di potenza sonora riferito alla superficie (densità di potenza superficiale) rappresenta la misura (logaritmica) della potenza acustica mediamente irradiata dalla sorgente sonora per ogni metro quadrato di superficie.

Supponendo ora di trovarci in un caso reale: un portone di un fabbricato industriale dal quale fuoriesce rumore (sorgente superficiale) oppure un lungo condotto di aerazione (sorgente lineare).

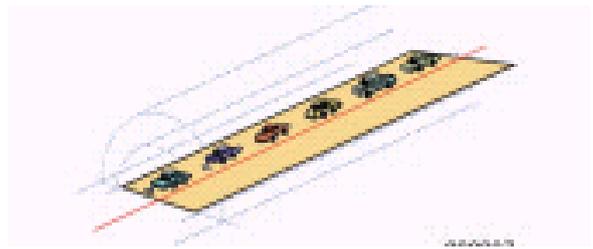
Il modo migliore per esprimere la potenza sonora di queste sorgenti sarà di misurare il livello di pressione di una superficie unitaria: tale valore rappresenta proprio la densità di potenza, e quindi per passare alla potenza complessiva è sufficiente applicare le relazioni sopra citate.

Se supponiamo, ad esempio, di misurare un livello di pressione superficiale medio a 7 m da una strada pari a:

$$L_{p\text{medio}} = 76 \text{ dBA}$$

Avremo che il livello di **densità di potenza** sarà:

$$L_{w0} = L_{p\text{medio}} + 10\text{Log}(I_0) = 76 + 10\text{Log}(\rho r) = 76 + 10\text{Log}(p7) = 76 + 13.4 = 89.4 \text{ dBA}$$



2.3 Direttività di emissione

La direttività è una caratteristica legata all'emissione sonora che si traduce in una diversificazione dell'intensità di emissione in funzione della direzione di propagazione: una sorgente direttiva è pertanto una sorgente in grado di emettere una diversa energia sonora in funzione della direzione di emissione.

Tipiche sorgenti direttive sono, ad esempio, gli altoparlanti.

La direttività è quasi sempre funzione, oltre che della direzione di emissione (ossia dell'angolo solido di emissione) anche, e soprattutto, della frequenza.

Una sorgente può infatti essere isotropica (ossia omnidirezionale, priva di direttività) sino ad una certa frequenza, per poi assumere caratteristiche di direttività da una certa frequenza in poi.

Tipicamente, la direttività si presenta a partire da frequenze medio-alte, da 500 - 1000 Hz in poi.

E' importante osservare come la direttività sia da suddividersi in due tipologie:

- **direttività intrinseca** della sorgente (legata alla forma ed alle caratteristiche proprie del modo di vibrare della sorgente);

- **direttività legata al posizionamento della sorgente** su piani o in angoli (in questo caso di possono avere incrementi della direttività a causa delle riflessioni dell'energia sonora su tali piani o angoli).

La direttività intrinseca D_I è data da:

$$D_I = L_p(\Phi) - L_{pm}$$

dove $L_p(\Phi)$ è il livello di pressione sonora misurato, in una certa banda di frequenza, ad una determinata distanza dalla sorgente in una certa direzione angolare Φ , mentre L_{pm} è il livello medio di pressione sonora, in una certa banda di frequenza, che sarebbe prodotto, alla stessa distanza, da una sorgente isotropica (ossia in grado di emettere l'energia sonora in ugual modo in tutte le direzioni).

La valutazione della direttività avviene solitamente in alcune direzioni angolari, ma data la complessità dell'operazione nella maggior parte dei casi pratici essa viene trascurata.

La direttività legata al posizionamento della sorgente può essere trattata in modo pratico con i seguenti criteri:

Collocazione della sorgente	Direttività [dB] D_Ω
In campo libero, lontano da superfici riflettenti	0
In prossimità a una superficie riflettente	0
In prossimità a due superfici riflettenti perpendicolari	3
In prossimità a tre superfici riflettenti perpendicolari	6

2.4 Rumore da traffico stradale

L'emissione del rumore da traffico stradale è un problema studiato da molti e ricondotto ormai ad equazioni classiche, che saranno riprese nei paragrafi successivi.

Ma volendo discutere dell'origine di queste equazioni dobbiamo esaminare attentamente il problema e ritornare qualche capitolo indietro, per capire le scelte possibili in materia di modellistica.

Il rumore del traffico, come anche altri tipi di rumore, è un rumore di tipo variabile: se dunque dovessimo misurarlo in termini di pressione sonora (o meglio, il Livello di pressione sonora), avremmo un andamento nel tempo sicuramente non stazionario.

La misura avviene solitamente attraverso un "fonometro", che nella sua accezione più semplice è costituito da un trasduttore (capsula microfonica) e un rivelatore di valore efficace, che visualizza il parametro p mediato nel tempo. Sappiamo che questo valore discende da una media su un tempo T data da:

$$p_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_{0,T} p^2(t) dt \right]^{(1/2)}$$

L'estensione del tempo di integrazione T ad intervalli di tempo più o meno lunghi ci porta al concetto di livello equivalente, mentre la scelta di un livello diverso, ad esempio il **livello massimo** raggiunto in un certo periodo di tempo con una costante di integrazione, oppure un certo livello percentile, costituiscono scelte diverse per esprimere uno stesso concetto: l'immissione di rumore presso un certo ricettore.

Ormai quasi tutti i modelli di fonometro sono orientati al livello equivalente ponderato "A" come parametro per esprimere il disturbo da rumore.

Il rumore da traffico presenta però ben altre difficoltà di modellizzazione, in quanto esso è costituito da sorgenti mobili (=distanza sorgente-ricevitore non costante), ad emissione non costante e con caratteristiche di propagazione di tipo dissipativo.

Queste tre condizioni rendono assai più problematica la modellizzazione di un flusso di traffico rispetto ad una sorgente di tipo industriale.

Il problema del veicolo in movimento può essere risolto "mediando" la distanza sorgente-ricevitore su un tempo T.

Ricordando che la pressione sonora è legata all'intensità I dalla relazione:

$$p_{rms}^2 = I \rho_0 c$$

e ricordando che l'emissione da parte di un punto sorgente nello spazio libero è espressa da:

$$W = I/4\pi r^2$$

Si avrà che il livello equivalente per un punto sorgente **fisso** sarà:

$$L_{Aeq} = 10 \log (P_{rms}^2/p_0) = 10 \log [(W \rho_0 c)/(p_0 4\pi r^2)]$$

Mentre per un punto **mobile** avremo:

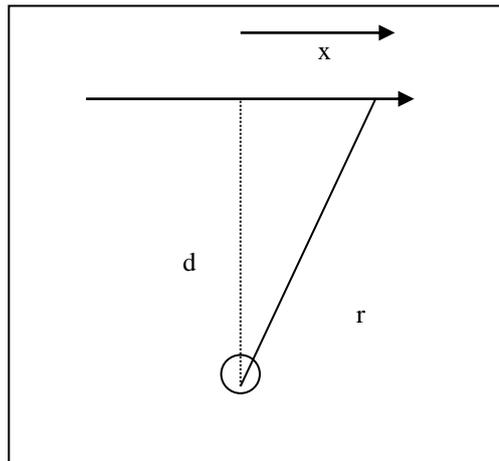
$$L_{Aeq} = 10 \log [(1/T) \int_{0,T} (W \rho_0 c)/(p_0 4\pi r^2) dt]$$

Assumendo ora che sulla strada passino N veicoli durante l'intervallo T, si avrà:

$$L_{Aeq} = 10 \log [(N/T) \int_{0,T} (W \rho_0 c)/(p_0 4\pi r^2) dt]$$

dove il parametro N/T rappresenta il flusso veicolare Q in termini di numero veicoli al secondo.

Se ipotizziamo ora di parametrizzare r (distanza sorgente-ricevitore) in modo tale da trattare matematicamente il problema con riferimento al diagramma seguente:



$$r^2 = d^2 + x^2$$

Inoltre, la velocità v può essere espressa come:

$$v = dx/dt$$

da cui consegue che:

$$L_{eq} = 10 \log \int_{-\infty}^{+\infty} [(W \cdot p_{oc}) / (p_0^2 \cdot 4 \cdot (d^2 + x^2))] dx =$$

$$= 10 \log (W \cdot p_{oc} \cdot Q) / (p_0^2 \cdot 4 \cdot vd)$$

$$= 10 \log (W_{oc}/4P_0^2) + 10 \log(Q/v) - 10 \log(d)$$

Questa equazione rappresenta la base per tutti i modelli di traffico che si sviluppano lungo una linea. Si tratta di caratterizzare tre fattori, ciascuno con un proprio significato:

- $10 \log (W_{oc}/4P_0^2)$: termine che esprime l'emissione del singolo veicolo, E, funzione della velocità del veicolo stesso
- $10 \log(Q/v)$: termine che esprime la relazione con la quantità di veicoli e la loro velocità
- $10 \log(d)$: termine che esprime l'attenuazione con la distanza

A questi termini devono poi essere aggiunti altri termini per tener conto dei parametri che possono influenzare l'emissione e dei fattori di tipo propagativo.

L'equazione diventa dunque:

$$L_{eq} = E(v) + 10 \log (Q/v) - 10 \log(d) + \Delta C_{emissione} - \Delta D_{propagazione}$$

L'emissione di rumore di un veicolo può essere espressa come un valore costante $E(v_0)$ ad una certa velocità v_0 , applicando una correzione per velocità diverse da quella di riferimento.

Le definizioni dell'emissione è basata su un gran numero di misure di veicoli transitanti su una strada, eseguite ad una certa distanza di riferimento dalla strada

stessa. Pertanto, in molti modelli l'emissione è definita in termini di pressione sonora ad una certa distanza dalla strada, il cosiddetto punto di riferimento. Tale punto di riferimento deve essere scelto in modo da minimizzare gli effetti della propagazione, ma anche in modo che il campo sonoro possa essere considerato piano.

Si ottiene allora:

$$E_{\text{rif}} = E(v_0) + 10 \log(Q) + C_v + C_s + C_g + C_i + C_p$$

dove

E_{rif} = emissione in un certo punto di riferimento

C_v = correzione per la velocità dei veicoli

C_s = correzione per la superficie stradale

C_g = correzione per i gradienti della strada (pendenze)

C_i = correzione dovuta alle differenze di fluidità del traffico

C_p = correzione per le diverse caratteristiche dei veicoli (mezzi leggeri, pesanti, motocicli...)

2.5 Modello C.N.R.

Il CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) ha elaborato un modello matematico che rappresenta un perfezionamento di una metodologia analoga già sperimentata in Germania e adattata alla situazione italiana.

E' possibile ipotizzare una relazione tra il livello medio energetico e i parametri del traffico urbano del tipo seguente:

$$L_{Aeq} = \alpha + 10 \log(N_L + \beta N_w) + 10 \log\left(\frac{d_0}{d}\right) + \Delta L_v + \Delta L_F + \Delta L_B + \Delta L_S + \Delta L_G + \Delta L_{VB}$$

ipotizzando il traffico come una sorgente di rumore lineare concentrata sulla mezzzeria della strada. Nella formula:

- N_L è il numero dei veicoli leggeri (peso < 3.5 ton) per ora.
- N_W è il numero dei veicoli pesanti (peso > 3.5 ton) per ora
- d_0 è uguale a 25 m ed è la distanza di riferimento, ossia la distanza alla quale viene calcolato il valore dell' L_{Aeq} qualora siano assenti edifici fronti stanti il punto di misura
- Δ_{LV} è la correzione per la velocità
- Δ_{LF} , Δ_{LB} sono le correzioni per le riflessioni dovute rispettivamente alla parete retrostante (+ 2.5 dB(A)), e sul lato opposto (+ 1.5 dB(A))
- Δ_{LS} è la correzione per le tipologie di manto stradale:
- Δ_{LG} è la correzione per la pendenza della strada:
- Δ_{LVB} è la correzione per la presenza di semafori o velocità bassa. Questa correzione risulta molto significativa nelle strade a basso traffico, dove il numero di veicoli ridotto può essere tale causa della presenza di un semaforo, che induce i veicoli a rallentare, o semplicemente a causa della bassa velocità degli stessi.

Tutti i suddetti parametri hanno validità generale per tutti i paesi in quanto sono legati solo a grandezze di tipo fisico o urbanistico e quindi oggettivamente misurabili. I coefficienti α e β invece variano da paese a paese dipendendo dalle condizioni e dalle caratteristiche dei singoli veicoli. In particolare α è correlato al livello di rumore medio prodotto dal singolo veicolo isolato e β è un coefficiente di ponderazione che tiene conto del più elevato livello di rumore dei veicoli pesanti.

2.6 Altri modelli di carattere generale

2.6.1 Il modello "generale" in ambito extraurbano

Si tratta di modelli caratterizzati da una equazione del tipo:

$$L_{eq} = L_{rif} + \Delta_{bar} + \Delta_{div} + \Delta_{traf}$$

dove

L_{rif} = livello sonoro di riferimento

Δ_{bar} = attenuazione dovuta ad ostacoli interposti

Δ_{div} = attenuazione per divergenza geometrica

Δ_{traf} = attenuazione dovuta alle condizioni mutevoli del traffico da sito a sito

L_{rif} viene valutato in base alla tipologia di strada, che si può differenziare in:

- Strade con sezione ad U, ossia costeggiate da entrambe i lati e tali che il rapporto altezza edifici/larghezza strada sia maggiore o uguale a 0,2;
- Strade ad L, ossia costeggiate da edifici su un solo lato e tali che il rapporto altezza edifici/larghezza strada sia minore a 0,2;
- Strade aperte su entrambe i lati.

Il livello sonoro di riferimento viene ipotizzato omogeneo (ossia costante) per tutta la sede stradale, che comprende il livello di mezzeria, il livello ai lati esterni della strada e il livello in facciata degli edifici.

Tale livello di riferimento viene calcolato con relazioni che si differenziano da modello a modello. Nei paragrafi precedenti abbiamo già visto alcuni esempi (modello CETUR, CNR, CSTB), a cui si rimanda.

Più in generale, il CNR assume l'equazione:

$$L_{rif} = \alpha + 10\log(Q_{VL} + EQ_{PL}) + \Delta_R + \Delta_V + \Delta_S + \Delta_P + \Delta_T$$

Q_{VL} flusso di veicoli leggeri in veicoli/h (peso < 3,5 ton)

Q_{PL} flusso di veicoli pesanti in veicoli/h (peso > 3,5 ton)

E coefficiente di omogeneizzazione fra veicoli leggeri e pesanti

Δ_R correzione in dBA per la presenza di riflessioni su edifici laterali

Δ_V correzione in dBA per la velocità espressa in km/h

Δ_S correzione in dBA per la pavimentazione stradale

Δ_P correzione in dBA per la pendenza della strada

Δ_Φ correzione in dBA per sorgenti lineari di lunghezza finita (Φ = angolo di vista della sorgente lineare)

Nella seguente tabella riportiamo i valori indicativi dei parametri citati.

	Strade urbane	
	Strada ad "U"	Strada ad "L"
α	+ 55	+ 20
E	vedi tabella	vedi tabella
Δ_R	- 10log(larghezza strada)	0
Δ_v		
velocità < 60 km/h	0	20log(velocità)
velocità > 60 km/h	(velocità - 60)/10	20log(velocità)
Δ_S	0	0
Δ_P	0	0
Δ_Φ	10log($\Phi/180$)	10log($\Phi/180$)

Tabella del coefficiente di omogeneizzazione E

Pendenza	< 2%	3%	4%	5%	>6%
Superstrada/autostrada	4	5	5	6	6
Strada a scorrimento veloce	7	9	10	11	12
Strada urbana	10	13	16	18	20

Per quanto riguarda Δ_{bar} , occorre dire che in ambito urbano gli ostacoli sono principalmente edifici. Se occorre prevedere il livello su scala locale ai fini di una attività di risanamento è molto difficile eseguire una valutazione corretta senza l'uso di un software previsionale, che consente di calcolare automaticamente le numerose riflessioni occorrenti. Se, invece, è sufficiente una stima grossolana, si può considerare che l'effetto di una barriera costituita da una fila di edifici è pari a circa 5 dB.

Per ciò che riguarda le condizioni del traffico il modello CNR assume

$\Delta_{traf} = 0$ dBA per condizioni di traffico scorrevole;

$\Delta_{traf} = + 1$ dBA in prossimità di incroci

$\Delta_{traf} = - 1,5$ dBA in condizioni di traffico congestionato (velocità inferiore a 30 km/h).

2.6.2 Il modello "generale" in ambito extraurbano

Valgono le stesse considerazioni di cui al paragrafo precedente, con le seguenti variazioni.

	Strade extraurbane	
	Strada ad "U"	Strada ad "L"
α	+ 35,1	+ 35,1
E	8	8
Δ_R		
lato edificio	+ 4	2,5
lato aperto	+ 4	1,5
Δ_V	Vedi tabella	Vedi tabella
Δ_S	Vedi tabella	Vedi tabella
Δ_P	Vedi tabella	Vedi tabella
Δ_Φ	$10\log(\Phi/180)$	$10\log(\Phi/180)$

Tabella del coefficiente di velocità

Velocità flusso (Km/h)	Δ_V
30-50	0
60	+ 1
70	+2
80	+ 3
100	+ 4

Tabella del coefficiente di pavimentazione

Pavimentazione	Δ_S
Asfalto liscio	- 0,5
Asfalto ruvido	0
Conglomerato cementizio	+ 1,5
Pavimentazione in blocchi	+ 4,0

Tabella del coefficiente di pendenza

Pendenza	Δp
< 5%	0
6	+ 0,6
7	+ 1,2
8	+ 1,8
9	+ 2,4
10	+ 3
Ad ogni % in più	+ 0,6

3.0 PROPAGAZIONE DEL RUMORE IN AMBIENTI APERTI

Introduzione

Le leggi della propagazione acustica in ambiente aperto sono assai complesse, in quanto i fenomeni fisici coinvolti in tale processo seguono le leggi della propagazione ondosa formulabili matematicamente attraverso le equazioni d'onda.

Tuttavia, nella corrente prassi ingegneristica, salvo in casi del tutto particolari, è ammissibile il ricorso a formulazioni semplificate del problema, che si avvalgono di equazioni assai più semplici e in grado, comunque, di fornire risultati assolutamente vicini alla realtà.

Pertanto, nel seguito tratteremo il problema della propagazione acustica in ambiente aperto (ossia al di fuori di ambienti confinati quali ambienti di vita, sale per conferenze ed auditoria) avvalendoci di formulazioni semplificate ampiamente utilizzate dagli acustici.

La propagazione del suono

Il problema della propagazione sonora si può ridurre all'identificazione di una o più sorgenti di rumore, di uno o più ricevitori posti ad una determinata distanza dalle

sorgenti e alla caratterizzazione di tutti quei parametri che possono influenzare l'onda sonora nel suo percorso dalla sorgente verso il ricevitore.

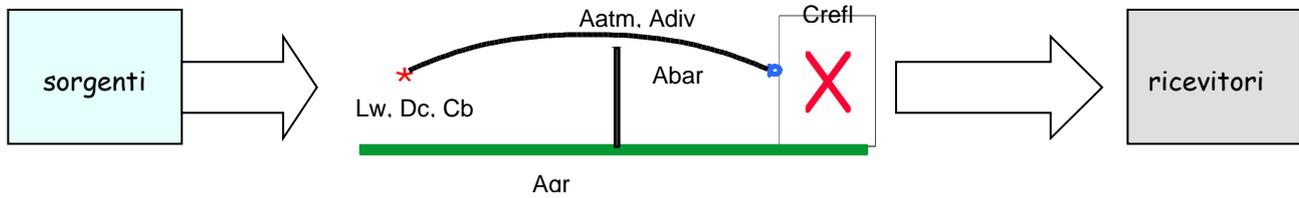


Figura - Rappresentazione del problema della propagazione acustica

3.1 L'equazione fondamentale

Rinunciando ad esprimere il problema in termini di modelli matematici complessi, siamo costretti, senza troppo ramarico, a presentare l'equazione fondamentale della propagazione sonora in termini semplificati:

$$L_p = L_w + D_c - A$$

dove

L_w = livello di potenza sonora espresso in dB prodotto dalla sorgente e riferito a 1 pW
 D_c = correzione per la **direttività** della sorgente, espressa in dB e composto da un termine D_Ω legato alla "collocazione" della sorgente sonora ed un termine D_I legato alle caratteristiche intrinseche di emissione della sorgente stessa

A = termine che rappresenta l'attenuazione del suono durante il percorso di propagazione, dato dall'insieme di tutti i fattori che possono contribuire all'attenuazione; fra questi vi sono:

- Divergenza geometrica A_{div} ;
- Assorbimento atmosferico A_{atm}
- Effetto del terreno A_{gr}
- Riflessioni da parte di superfici riflettenti
- Schermatura da parte di ostacoli, edifici, barriere A_{ba}

Solitamente si preferisce suddividere il fattore A in un termine legato alla **divergenza geometrica** A_{div} (e dunque alla distanza sorgente-ricevitore) ed un termine legato a tutti gli altri fattori di attenuazione aggiuntiva (chiamati, per questo motivo, "attenuazioni in eccesso" A_{ecc}).

Dunque, l'equazione fondamentale diventa:

$$L_p = L_w + D_c - A_{div} - A_{ecc}$$

L'equazione della propagazione ci dice, dunque, che il livello di pressione sonora L_p in un punto qualunque a distanza r dalla sorgente può essere noto sulla base della conoscenza delle caratteristiche della sorgente (L_w e D_c) e delle caratteristiche di attenuazione del percorso sorgente-ricevitore (A).

Supponiamo ora che la sorgente sia omnidirezionale e puntiforme: in tal caso $D_c = 0$ e l'energia sonora sarà concentrata in un unico punto. Se la sorgente irradia onde sferiche e se, per il momento, non si considerano attenuazioni in eccesso ($A_{ecc} = 0$), si avrà che l'equazione della propagazione si tramuta in:

$$L_p = L_w - A = L_w - 10 \log S$$

dove $S = 4\pi r^2$ (superficie della sfera di raggio r).

Riscrivendo ancora l'equazione sostituendo il termine S con il suo equivalente per la superficie sferica, si avrà:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11$$

che rappresenta l'equazione semplificata della propagazione da parte di una **sorgente puntiforme in campo libero** sotto le ipotesi descritte sopra.

Da questa equazione, spesso abusata (in quanto si trascura di verificare attentamente le gravose ipotesi di validità), si deduce la proprietà assai nota secondo la quale, per una sorgente puntiforme in campo libero, al raddoppio della distanza dalla sorgente (da r a $2r$) si ottiene una attenuazione aggiuntiva di 6 dB.

$$L_p = L_w - 20 \log 2r - 11 = L_w - 20 \log 2 - 20 \log r - 11 = L_w - 6 - 20 \log r - 11$$

Nel caso di propagazione da una sorgente puntiforme in campo semilibero (ossia di una sorgente puntiforme che "poggia" su un piano riflettente), la propagazione sarà di tipo emi-sferico, e dunque la superficie S sarà pari a $2\pi r^2$.

In tal caso la relazione di propagazione diventa:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 10 \log S = L_w - 10 \log 2\pi r^2 = L_w - 20 \log r - 8$$

Nel caso di emissione da parte di una superficie cilindrica la superficie S vale $2\pi r l$, e dunque il livello sonoro per unità di lunghezza sarà dato da:

$$L_p = L_w - 10 \log S = L_w - 10 \log r - 10 \log 2\pi r l = L_w - 10 \log r - 8$$

Nel caso di sorgente semicilindrica (caso tipico per una strada), si avrà:

$$L_p = L_w - 10 \log S = L_w - 10 \log r - 10 \log \pi r l = L_w - 10 \log r - 5$$

Riassumendo si hanno le seguenti relazioni fondamentali di propagazione:

Propagazione	Campo sonoro	Equazione semplificata di propagazione (senza attenuazioni in eccesso e direttività di emissione)
Sferica	Libero	$L_p = L_w - 20 \log r - 11$ (dB)
"	Semi-libero	$L_p = L_w - 20 \log r - 8$ (dB)
Cilindrica	Libero	$L_p = L_w - 10 \log r - 8$ (dB/m)
"	Semi-libero	$L_p = L_w - 10 \log r - 5$ (dB/m)

3.2 Le attenuazioni in eccesso

Assorbimento atmosferico

L'assorbimento atmosferico è dovuto essenzialmente a due fenomeni distinti:

- Perdite dovute ad attriti viscosi e conduzione del calore nell'aria;
- Movimenti di tipo rotazionale e vibrazionale delle molecole d'aria.

Il primo meccanismo è significativo solo a temperature molto basse ed è proporzionale al quadrato della frequenza dell'onda sonora.

Il secondo meccanismo è invece particolarmente dipendente dall'umidità relativa e dalla temperatura.

Sebbene esista una vasta letteratura in materia, la trattazione approfondita di tali argomenti non è consentita in questo testo, e si rimanda alle norme internazionali ISO 3856-1 (1978) e ISO 9613-1.

L'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico a 20° C può essere stimata tramite la relazione

$$A_{\text{atm},20^\circ} = 7.4 [f^2 r / UR] 10^{-8} \quad \text{dB}$$

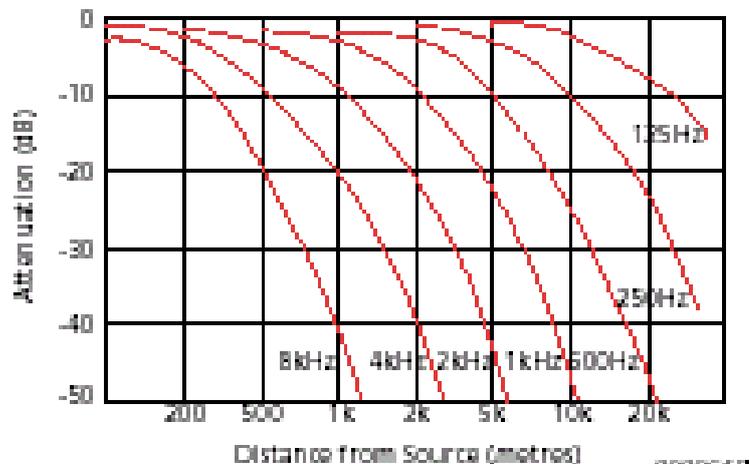
dove f rappresenta la frequenza della banda di frequenza considerata, UR l'umidità relativa ed r la distanza sorgente-ricevitore.

A temperature diverse, per una umidità relativa pari al 50%, si può applicare la relazione:

$$A_{\text{atm},(T,50\%)} = A_{\text{atm},20^\circ} / (1 + \Delta t f) \quad \text{dB}$$

con Δt = differenza di temperatura fra la temperatura esistente e 20 °C e Δ = costante pari a $4 \cdot 10^{-6}$.

L'attenuazione per assorbimento atmosferico può essere considerevolmente influenzata dalle disomogeneità meteorologiche quali vento, turbolenze, gradienti di temperatura e umidità, in particolare in presenza di **distanze considerevoli** fra sorgente e ricevitore (alcune centinaia di metri).



Inoltre, poiché l'attenuazione del rumore è proporzionale al quadrato della frequenza, ne consegue una **notevole dipendenza dallo spettro di emissione della sorgente considerata**: in particolare, se la sorgente emette maggiormente in bassa frequenza, l'attenuazione per assorbimento atmosferico sarà molto meno rilevante rispetto ad una sorgente con emissioni a frequenze elevate.

Casi particolari di attenuazione sono dovuti a particolari fenomeni atmosferici quali nebbia, pioggia o neve: ad oggi non esistono dati particolarmente esaurienti su tali condizioni, ma è tuttavia chiaro che la gran parte delle "sensazioni" acustiche dovute alla presenza di questi fattori sono derivanti da cause secondarie, quali ad es. la ridotta attività che si verifica proprio a causa di tali fattori.

Dunque, l'effetto della nebbia e della neve porta ad una notevole riduzione del rumore di fondo perché le attività antropiche sono rallentate.

Per quanto riguarda l'aspetto più propriamente acustico, la presenza di pioggia determina una diminuzione delle disomogeneità atmosferiche, e dunque il suono si propaga effettivamente meglio.

Effetto del terreno

L'attenuazione in eccesso dovuta al terreno è dovuta essenzialmente al **tipo di terreno** ed alla sua forma, ma dipende anche fortemente dall'altezza di sorgente e ricevitore e dalla frequenza di emissione della sorgente.

Un ricevitore posto vicino al terreno è particolarmente influenzato dalla presenza del terreno, mentre un ricevitore posto in alto rispetto al piano di campagna riceverà il suono dalla sorgente secondo un meccanismo propagativo molto più vicino a quello teorico calcolabile con la teoria della propagazione semplificata.

L'effetto acustico del terreno non è pertanto sicuramente un fenomeno di facile comprensione e modellizzazione teorica, e quasi sempre, almeno nei calcoli ingegneristici, si è costretti a fare ipotesi semplificative che riducono il terreno a due sole categorie:

- Terreno "duro"

- Terreno "soffice"

Il terreno "duro" si riferisce ad asfalto, terra battuta, cemento, superfici acquatiche, ossia, più in generale, a superfici molto riflettenti sulle quali il suono che si propaga conserva la propria fase.

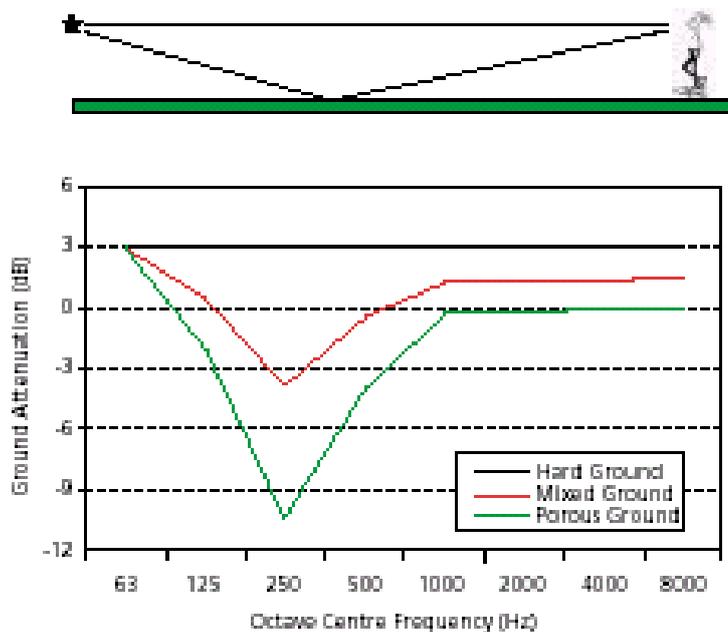
Il terreno "soffice" comprende invece terreno ricoperto di erba o vegetazione fitta, terreno agricolo, terreno ricoperto di neve fresca.

Un terreno "duro" favorisce la propagazione del suono e può causare significativi incrementi (dell'ordine di 1 - 3 dB), mentre un terreno soffice ha un effetto contrario.

Il terreno viene solitamente trattato in modo empirico utilizzando un coefficiente *G* che vale 0 nel caso di terreno "duro" e 1 nel caso di terreno "soffice" (si veda anche la norma ISO 9613-2).

L'effetto del terreno può essere trascurato fino a distanze di circa 70 m dalla sorgente, mentre a distanze superiori occorre sicuramente considerarlo: si è verificato sperimentalmente una attenuazione in eccesso di 5 - 10 dB su distanze di 250 m, con punte molto elevate (fino a 50 dB) nel range delle medio-alte frequenze.

A lato si può vedere l'effetto del tipo di terreno a 100 m di distanza (altezza sorgente = altezza ricevitore = 2m)



La presenza di erba o arbusti bassi può essere valutata tramite la seguente espressione:

$$A_{erba} = [0.18 \log(f) - 0.31] r$$

dove r è il percorso sorgente-ricevitore su terreno erboso. In generale l'attenuazione su terreno erboso è dell'ordine di 5 dB/100m per ogni raddoppio di frequenza.

Riflessioni e rifrazioni

Le riflessioni e le rifrazioni sono trattate in acustica secondo le regole dell'ottica geometrica; pertanto, se la propagazione viene schematizzata tramite raggi sonori, questi saranno riflessi o rifratti da superfici con proprietà diverse secondo le leggi classiche di Huygens.

Le riflessioni sono un fenomeno piuttosto comune sia in acustica ambientale che in acustica architettonica e possono talvolta assumere una importanza di rilievo in situazioni geometriche quali ad esempio edifici in "seconda linea" (cioè schermati da una prima linea di edifici), strade con sezioni ad U, tettoie, facciate...

Nel concetto di riflessione non viene tenuta in considerazione la riflessione del terreno in quanto già inclusa nel concetto di "effetto del terreno".

Affinchè una riflessione sia considerata devono essere applicabili le seguenti condizioni:

- Deve essere possibile una riflessione di tipo speculare;
- Il coefficiente di riflessione α (reciproco del coefficiente di fonoassorbimento) deve essere superiore a 0.2;
- La superficie riflettente deve essere sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda del suono di interesse (si considerano ovviamente bande di frequenza). Tale condizione si traduce, secondo la ISO 9613-2, nella seguente espressione:

$$1/\alpha > [2/(I_{\min} \cos\theta)]^2 [d_{s,o}d_{o,r}/(d_{s,o} + d_{o,r})]$$

dove

λ = lunghezza d'onda del suono di interesse ($\lambda = c/f$)

$d_{s,o}$ = distanza sorgente-ostacolo

$d_{o,r}$ = distanza ostacolo-ricevitore

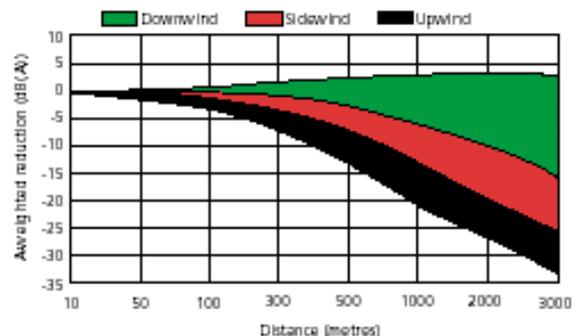
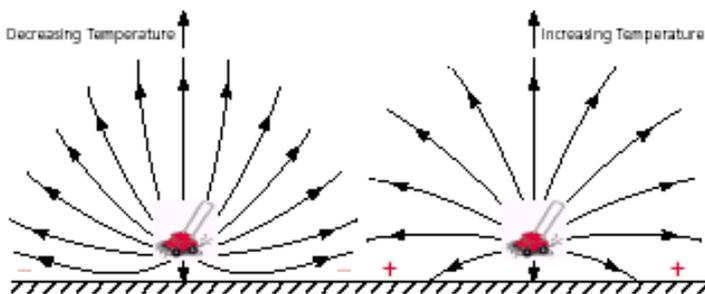
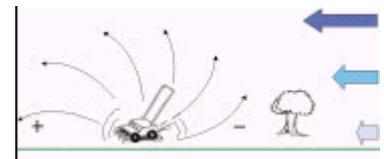
θ = angolo di incidenza, in radianti

l_{min} = minima dimensione (altezza, lunghezza) dell'ostacolo riflettente

Se le condizioni sopra descritte non sono rispettate la riflessione può essere trascurata.

3.3 Effetti meteo

La propagazione sonora nell'atmosfera è fortemente dipendente dai profili di vento e temperatura nell'atmosfera stessa. Nei primi 10 o 20 m da terra in condizioni di bassa velocità del vento si possono creare percorsi curvilinei dei raggi sonori in conseguenza di gradienti di temperatura. Per velocità del vento mediamente più elevate la curvatura è dominata dal gradiente del vento ed è caratterizzata da un andamento dal basso all'alto in posizione contro-vento e dall'alto verso il basso in posizione sotto-vento.



La curvatura controvento determina delle grandi differenze di livello sonoro in quanto si possono creare zone di ombra acustica: per questo motivo molti modelli fanno unicamente riferimento alla posizione sottovento del ricevitore.

La previsione accurata del livello sonoro in posizione controvento è talvolta molto ardua. A velocità del vento ancora più elevate e ad altezze maggiori da terra si può generare turbolenza atmosferica, che può originare situazioni molto difficili da prevedere, specialmente in casi di distanze elevate fra sorgente e ricevitore.

3.4 Effetti della vegetazione, presenza di edifici

Vegetazione

L'effetto di foreste, boschi o arbusti è poco conosciuto e spesso sovrastimato, forse per l'effetto psicologicamente positivo che deriva dalla separazione di sorgente e ricevitore. Alcuni modelli trattano file di piante in termini di barriere acustiche, altri modelli considerano la vegetazione alla stregua di un particolare tipo di terreno.

La vegetazione può comunque interferire sui gradienti di temperatura e vento in prossimità del terreno, sull'effetto del terreno e in altri modi complessi.

In casi di aree con vegetazione molto fitta gli effetti possono accentuarsi.



Aree edificate

In aree residenziali densamente edificate si possono creare effetti complessi e combinati di scherature e riflessioni, che portano a complesse distribuzioni dei livelli sonori.

In particolare, possono determinarsi notevoli errori qualora il modello di calcolo esegua interpolazioni basate su griglie non sufficientemente fitte.

4.0 Sintesi dei modelli più diffusi ed utilizzati per la previsione

Nella seguente tabella presentiamo alcuni dei modelli normalizzati più diffusi in ambito europeo, con una sintesi delle rispettive caratteristiche.

Modello	Risultati del calcolo	strada infinita/segmenti di strada	condizioni di propagazione	composizione del modello
ISO 9613	spettro 63 Hz - 8000 Hz + dBA. Leq	il modello si applica a sorgenti puntiformi	condizioni favorevoli alla propagazione	divergenza geometrica, assorbimento atmosferico, assorbimento terreno, schermi, assorbimento da vegetazione e insediamenti industriali, riflessioni, effetti meteo
TEMANOR D (DK, S, SF, N)	LAeq, LAmaz	strada infinita; è possibile la divisione in segmenti	condizioni meteo medie	divergenza geometrica, assorbimento terreno, schermi, riflessioni
CRTN (UK)	LAeq, LAmaz	strada infinita; è possibile la divisione in segmenti	condizioni meteo medie	divergenza geometrica, assorbimento terreno, schermi, riflessioni
NMPB (F)	LAeq	strada infinita; è possibile la divisione in segmenti	condizioni meteo medie	divergenza geometrica, assorbimento atmosferico, assorbimento terreno, schermi, riflessioni, effetti meteo
RLS90 (D)	LAeq	strada infinita; è possibile la divisione in segmenti	condizioni favorevoli alla propagazione	divergenza geometrica, assorbimento atmosferico, assorbimento terreno, schermi, riflessioni
SRM II (NL)	LAeq in 1/1 ottava	divisione in segmenti, angolo visuale < 5°	condizioni favorevoli alla propagazione	divergenza geometrica, assorbimento atmosferico, assorbimento terreno, schermi, riflessioni, effetti meteo
RVS 3.114 (A)	LAeq	divisione in segmenti, angolo visuale < 9°; metodo semplificato per strade infinite	condizioni favorevoli alla propagazione	divergenza geometrica, assorbimento atmosferico, assorbimento terreno, schermi, assorbimento da vegetazione e insediamenti industriali, riflessioni

L'Unione Europea, nello sforzo di armonizzare le metodologie di approccio all'inquinamento acustico ambientale, ha fornito nella **direttiva 2002/49** una traccia per applicare metodologie di calcolo previsionale comuni nell'attesa di un modello armonizzato europeo, su cui stanno lavorando da tempo i maggiori esperti del settore.

4.1 Metodi di calcolo "ad interim" (estratto dir. 2002/49)

Per gli Stati membri che non dispongono di metodi nazionali di calcolo o che intendono passare a un metodo di calcolo diverso, si raccomandano i metodi in appresso:

- **Per il RUMORE DELL'ATTIVITÀ INDUSTRIALE: ISO 9613-2:** «Acoustics — Attenuation of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation». Possono essere ottenuti dati di rumorosità (dati di ingresso) idonei a questa metodologia mediante una delle seguenti tecniche di rilevamento:
 - ISO 8297: 1994 «Acoustics — Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment — Engineering method»,
 - EN ISO 3744: 1995 «Acoustics — Determination of sound power levels of noise using sound pressure — Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane»,
 - EN ISO 3746: 1995 «Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using an enveloping measurement surface over a reflecting plane».
- **Per il RUMORE DEGLI AEROMOBILI: documento 29 ECAC.CEAC** «Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports», 1997. Tra i diversi approcci per la modellizzazione delle linee di volo, va usata la tecnica di segmentazione di cui alla sezione 7.5 del documento 29 ECAC.CEAC.
- **Per il RUMORE DEL TRAFFICO VEICOLARE: metodo di calcolo ufficiale francese** «NMPB-Routes-96 (SETRACERTU- LCPC-CSTB)», citato nell'«Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel du 10 mai 1995, article 6» e nella norma francese «XPS 31-133». Per i dati di ingresso concernenti l'emissione, questi documenti fanno capo al documento «Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980».

- *Per il RUMORE FERROVIARIO: metodo di calcolo ufficiale dei Paesi Bassi pubblicato in «Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaï '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 November 1996».*

Il modello ISO per il rumore industriale

La norma internazionale ISO 9613 è dedicata alla modellizzazione della propagazione acustica nell'ambiente esterno, ma non fa riferimento alcuno a sorgenti specifiche di rumore (traffico, rumore industriale...), anche se è invece esplicita nel dichiarare che non si applica al rumore aereo (durante il volo dei velivoli) e al rumore generato da esplosioni di vario tipo. L'Unione Europea ha scelto tale norma come riferimento per la modellizzazione del rumore industriale.

E' dunque una norma di tipo ingegneristico rivolta alla previsione dei livelli sonori sul territorio, che prende origine da una esigenza nata dalla norma ISO 1996 del 1987, che richiedeva la valutazione del livello equivalente ponderato "A" in condizioni meteorologiche "favorevoli alla propagazione del suono²"; la norma ISO 9613 permette, in aggiunta, il calcolo dei livelli sonori equivalenti "sul lungo periodo" tramite una correzione forfettaria.

La prima parte della norma (ISO 9613-1:1993) tratta esclusivamente il problema del calcolo dell'assorbimento acustico atmosferico, mentre la seconda parte (ISO 9613-2:1996) tratta in modo complessivo il calcolo dell'attenuazione acustica dovuta a tutti i fenomeni fisici di rilevanza più comune, ossia:

- la divergenza geometrica;
- l'assorbimento atmosferico;
- l'effetto del terreno: Le riflessioni da parte di superfici di vario genere;
- l'effetto schermante di ostacoli;
- l'effetto della vegetazione e di altre tipiche presenze (case, siti industriali).

² E' noto che le condizioni favorevoli alla propagazione del suono sono assimilabili a condizioni di "sotto-vento" (downwind, DW) e di inversione termica.

La norma ISO, come abbiamo già rimarcato, non si addentra nella definizione delle sorgenti, ma specifica unicamente criteri per la riduzione di sorgenti di vario tipo a sorgenti puntiformi.

In particolare, viene specificato come sia possibile utilizzare una sorgente puntiforme solo qualora sia rispettato il seguente criterio:

$$d > 2 H_{\max}$$

dove d è la distanza reciproca fra la sorgente e l'ipotetico ricevitore, mentre H_{\max} è la dimensione maggiore della sorgente.

L'equazione che permette di determinare il livello sonoro $L_{AT}(DW)$ in condizioni favorevoli alla propagazione in ogni punto ricevitore è la seguente:

$$L_{AT}(DW) = L_w + D_c - A$$

dove L_w è la potenza sonora della sorgente (espressa in bande di frequenza di ottava) generata dalla generica sorgente puntiforme, D_c è la correzione per la direttività della sorgente e A l'attenuazione dovuti ai diversi fenomeni fisici di cui sopra, espressa da:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$$

con A_{div} attenuazione per la divergenza geometrica, A_{atm} attenuazione per l'assorbimento atmosferico, A_{gr} l'attenuazione per effetto del terreno, A_{bar} l'attenuazione di barriera, A_{misc} l'attenuazione dovuta agli altri effetti non compresi in quelli precedenti.

La condizione di propagazione ottimale, corrispondente alle condizioni di "sottovento" e/o di moderata inversione termica (tipica del periodo notturno), è definita dalla ISO 1996-2 nel modo seguente:

Direzione del vento compresa entro un angolo di $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione individuata dalla retta che congiunge il centro della sorgente sonora dominante alla regione dove è situato il ricevitore, con il vento che spira dalla sorgente verso il ricevitore;

Velocità del vento compresa fra 1 e 5 m/s, misurata ad una altezza dal suolo compresa fra 3 e 11 m.

Allo scopo di calcolare un valore medio di lungo-periodo $L_{AT}(LT)$, la norma ISO 9613 propone di utilizzare la seguente relazione:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met}$$

dove C_{met} è una correzione di tipo meteorologico derivante da equazioni approssimate che richiedono una conoscenza elementare della situazione locale.

$$C_{met} = 0 \text{ per } d_p < 10 (h_s + h_r)$$

$$C_{met} = C_0 [1 - 10(h_s + h_r)/d_p] \text{ per } d_p > 10 (h_s + h_p)$$

dove h_s è l'altezza della sorgente dominante, h_r è l'altezza del ricevitore e d_p la proiezione della distanza fra sorgente e ricevitore sul piano orizzontale.

C_0 è una correzione che dipende dalla situazione meteo locale e può variare in una gamma limitata (0 - 5 dB): la ISO consiglia che debba essere un parametro determinato dall'autorità locale.

Per quanto riguarda le attenuazioni aggiuntive dovute alla presenza di vegetazione, di siti industriali o di gruppi di case, la ISO 9613 propone alcune relazioni empiriche per il calcolo, che pur avendo una limitata validità possono essere utili in casi particolari.

Un argomento molto più importante è la possibilità di determinare una incertezza associata alla previsione: a questo proposito la ISO ipotizza che, in condizioni favorevoli di propagazione (sottovento, DW) e tralasciando l'incertezza con cui si può determinare la potenza sonora della sorgente sonora, nonché problemi riflessioni o schermature, l'accuratezza associabile alla previsione di livelli sonori globali sia quella presentata nella tabella sottostante.

Altezza media di ricevitore e sorgente [m]	Distanza 0 < d < 100 m	Distanza 100 m < d < 1000 m
0 < h < 5	± 3 dB	± 3 dB
5 < h < 30	± 1 dB	± 3 dB

Naturalmente, la corrispondente accuratezza associabile su misure sul lungo periodo può essere molto maggiore.

Il modello francese NMPB per il traffico veicolare (XP S31-133)

Si tratta del "Nouvelle Methode de Prevision de Bruit" messo a punto da alcuni noti Istituti francesi costituenti i Servizi Tecnici del Ministère de l'Equipement (CSTB, SETRA, LCPC, LRPC). L'Unione Europea ha scelto tale norma come riferimento per la modellizzazione del rumore da traffico stradale.

Il metodo è rivolto esclusivamente alla modellizzazione del rumore da traffico stradale, ed è nato come evoluzione di un metodo risalente agli anni '80 (esposto nella "Guide de Bruit" del 1980) e proposto ufficialmente per essere di ausilio agli Enti pubblici ed agli studi professionali privati nelle attività di previsione riguardanti il rumore.

Tale evoluzione è stata necessariamente richiesta in quanto un decreto del 1995 aveva richiesto espressamente che "nelle valutazioni e previsioni di livelli sonori a lunga distanza, cioè superiori a 250 m, deve essere presa in considerazione l'influenza delle condizioni meteo sulla propagazione del rumore." (arrêté 5/5/95, art. 6).

Poiché le linee guida del 1980 non tenevano in conto gli effetti della propagazione a distanza, e anche al fine di recepire i le novità proposte nel frattempo dalla ISO 9613, è stato pubblicato nel 1996 il "Nouvelle Methode".

Le caratteristiche salienti del NMPB sono sicuramente:

- La possibilità di modellizzare il traffico stradale con dettagli relativi al numero di corsie, flussi di traffico, caratteristiche dei veicoli, profilo trasversale delle strade, altezza delle sorgenti ecc.
- L'attenzione rivolta alla propagazione su lunga distanza;
- La definizione di due diverse condizioni meteorologiche standard, definite come "condizioni favorevoli alla propagazione" e "condizioni acusticamente omogenee",

allo scopo di arrivare ad una definizione di previsione dei livelli sonori sul lungo periodo.

L'evoluzione rispetto alla precedente Guide de Bruit è notevole: si passa da una modellizzazione basata su abachi ad una vera caratterizzazione del traffico stradale considerato nella sua complessità e inserito in un contesto spazio-temporale adeguato alla rappresentazione del disturbo.

I parametri richiesti dal NMPB per caratterizzare le sorgenti del traffico stradale sono essenzialmente legati al flusso orario Q del traffico veicolare: tale flusso permette di calcolare il valore di emissione sonora a partire dagli abachi 4.1 e 4.2 della "Guide du Bruit des Transports terrestres - Partie IV: Methode détaillée route" del 1980.

Tale abaco indica per lettura diretta il valore del livello sonoro equivalente su un'ora in dB(A) (chiamato emissione sonora E) generato dalla circolazione di un veicolo leggero o di un veicolo pesante.

La relazione finale utilizzata per calcolare il livello di potenza acustica di una sorgente puntiforme L_{AWi} rappresentante un tratto omogeneo di strada è dunque:

$$L_{AWi} = [(E_{VL} + 10 \log Q_{VL}) + (E_{PL} + 10 \log Q_{PL})] + 20 + 10 \log(I_i) + R(j)$$

dove E_{VL} ed E_{PL} sono i livelli di emissione calcolati con l'abaco del C.ET.UR. per i veicoli leggeri e pesanti, Q_{VL} e Q_{PL} i corrispondenti flussi orari, I_i è la lunghezza in metri del tratto di strada omogeneo ed $R(j)$ il valore dello spettro di rumore stradale normalizzato tratto dalla EN 1793-3.

Riassumendo, per arrivare a modellizzare completamente il traffico stradale occorre introdurre le seguenti informazioni:

- Flusso orario di veicoli leggeri e veicoli pesanti;
- Velocità dei veicoli leggeri e pesanti;
- Tipo di traffico (continuo, pulsato, accelerato, decelerato);
- Numero di carreggiate;
- Distanza del centro della carreggiata dal centro strada;

- Profilo della sezione stradale.

La Guide de Bruit del 1980 definiva il problema della propagazione in termini di livello globale in dBA.

Il nuovo modello proposto dalla NMPB tiene invece conto del comportamento della propagazione al variare della frequenza a causa dell'effetto fondamentale che tale parametro assume in relazione alla propagazione a distanza: ciò viene realizzato facendo uso di uno spettro normalizzato del traffico stradale proposto in sede normativa dal CEN attraverso la norma EN 1793-3(1995).

Il criterio di distanza adottato per la suddivisione della sorgente lineare in sorgenti puntiformi è classico:

$$L = 0.5 d$$

dove L è la lunghezza del tratto omogeneo di strada e d la distanza fra sorgente e ricevitore. Il metodo di scomposizione della sorgente lineare in sorgenti puntiformi può essere scelto fra diversi tipi:

- Metodo della scomposizione equiangolare;
- Metodo della scomposizione per passi uniformi;
- Metodo della scomposizione variabile.

Il suolo, da cui si ricava la componente di attenuazione relativa all'assorbimento del terreno, viene modellizzato assumendo che il coefficiente G (adimensionale, definito dalla ISO 9613) possa valere 0 (assorbimento nullo, suoli compatti, asfalto) oppure 1 (assorbimento totale, suoli porosi, erbosi). In realtà, poiché tale coefficiente può variare in modo continuo fra 0 e 1, è possibile assegnare un valore G_{tragitto} calcolabile secondo un metodo dettagliato che permette di ottenere un valore medio che tiene anche conto delle condizioni di propagazione.

Per quanto riguarda l'aspetto delle condizioni meteorologiche, è giusto riconoscere che già la ISO 9613 permetteva il calcolo in condizioni "favorevoli alla propagazione del rumore", proponendo una correzione forfettaria per ricondursi ad una situazione di lungo periodo.

Tali condizioni, tuttavia, non rappresentano che una delle condizioni meteo osservabili su un sito, e dunque le nuove linee guida francesi hanno cercato di migliorare il metodo ricercando due condizioni meteo "tipo": "condizioni favorevoli alla propagazione" (corrispondenti a quelle della norma ISO) e "condizioni atmosferiche omogenee" (corrispondenti ai metodi di calcolo utilizzati precedentemente in Francia).

Il risultato finale della previsione a lungo termine ($L_{i,LT}$) è ottenuto sommando i contributi derivanti dalle due condizioni "tipo", ovviamente ponderati secondo le percentuali di effettiva presenza sul sito considerato.

$$L_{i,LT} = 10 \log [p_i 10 (L_{iF}/10) + (1-p_i) 10 (L_{iH}/10)]$$

dove L_{iF} è il livello globale calcolato in presenza di condizioni favorevoli alla propagazione per una percentuale p_i di presenze annuali, mentre L_{iH} è l'analogo livello calcolato per condizioni omogenee.

E' importante osservare che lo scopo di tale metodo non è, dunque, quello di descrivere tutte le situazioni meteo osservabili in un particolare sito, ma di approssimarle, rappresentandole con due tipi di situazioni atmosferiche convenzionali.

La ISO 9613 suppone che i livelli sonori in condizioni non favorevoli alla propagazione siano trascurabili, laddove la NMPB cerca di individuare una situazione "media", che tenga effettivamente conto del disturbo verso l'individuo sul lungo periodo.

E' importante ricordare che l'attenzione posta alle condizioni meteo è dovuta alla consapevolezza di una influenza assolutamente determinante di tali condizioni nella propagazione a distanza: a titolo di illustrazione di questo fenomeno riportiamo una tabella estratta dalla NMPB che riassume i risultati sperimentali di misure del livello equivalente su 10 minuti ottenuti su un terreno piatto, con una sorgente puntiforme e per una grande varietà di condizioni meteorologiche.

Distanza sorgente- ricevitore [m]	Scarti tra i livelli minimi e massimi [dBA]	Deviazione standard [dBA]
160	18.6	4.4
320	26.8	8.4
640	37.8	11.2

Per quanto i valori in tabella siano stati ottenuti su un periodo molto breve, i valori corrispondenti ottenuti su periodi più lunghi restano comunque soggetti a variazioni assai rilevanti.

Per quanto riguarda i dati meteo relativi ai singoli siti, la NMPB prevede che siano ottenuti in più modi alternativi:

Se i livelli sonori in condizioni di propagazione favorevole rispettano i limiti di legge, si è certi che tali limiti saranno rispettati anche nel lungo periodo. Dunque non vi è necessità di affinare l'analisi meteorologica del sito in esame.

Se i livelli sonori in condizioni di propagazione favorevole e in condizioni omogenee sono abbastanza simili, le imprecisioni sulla conoscenza delle rispettive presenze meteorologiche avranno poca influenza sul livello sonoro di lungo termine. Dunque, anche in questo caso non sarà necessario affinare l'analisi meteo del sito.

Se non si ricade nei due casi precedenti, occorrerà verificare le seguenti caratteristiche morfologiche del sito:

- sito relativamente piatto e orizzontale, con poca vegetazione alta (sono ammessi alberi isolati);
- assenza di oggetti di dimensioni importanti in rapporto alle dimensioni della zona di propagazione;
- assenza di grandi masse d'acqua (laghi, fiumi...);
- altitudine del sito inferiore a 500 m s.l.m.

In caso di analisi positiva, si possono desumere i dati di presenza delle condizioni favorevoli ed omogenee da tabelle fornite dal Servizio Meteorologico nazionale francese, che ha rilevato tali dati in 40 stazioni collocate su tutto il territorio.

Altrimenti, se l'analisi fornisce una non corrispondenza delle caratteristiche, si dovrà necessariamente scegliere una delle seguenti alternative:

- elaborare dati meteo locali esistenti;
- elaborare dati meteo locali raccolti in proprio;

- adottare i valori di cui all'All. 1 del NMPB (soluzione che richiede una descrizione precisa del sito, e che comunque risente di un maggior grado di incertezza);
- adottare valori forfettari "per eccesso".

5.0 Riferimenti normativi Italiani e Regionali

Il quadro normativo italiano principale:

- **DPCM 01/03/1991** (G.U. 08/03/1991 n.57) "Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno"; Riferito per Rumore Assoluto
- **DIRETTIVA REGIONE MOLISE** (Delib. G.R. 24/06/1994 n.2478) "Limiti di esposizione al rumore";
- **LEGGE 26/10/1995 n.447** (G.U. 30/10/1995 n.254) "Legge quadro sull'inquinamento acustico";
- **DPCM 14/11/1997** (G.U. 01/12/1997 n.280) "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore"; Riferito per Livelli Differenziali
- **DM 16/03/1998** (G.U. 01/04/1998 n.76) "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico".

Definizioni

Di seguito si riportano alcune definizioni, già citate precedentemente, utili per l'interpretazione dei risultati:

- **Sorgente specifica**, sorgente sonora selettivamente identificabile che costituisce la causa del potenziale inquinamento acustico o disturbo.

- **Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A"**

$$L_{Aeq, T} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_o^2} dt \right] \text{ dB (A)}$$

T	intervallo di tempo che inizia all'istante t1 e termina all'istante t2
P _A (t)	valore istantaneo della pressione ponderata "A" del segnale acustico in pascal
P _o	pressione sonora di riferimento (20 μ pascal)

- **Livello di rumore ambientale (L_A)**, è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" prodotto da tutte le sorgenti esistenti in un dato luogo e durante un determinato tempo. Il rumore ambientale è costituito dall'insieme del rumore residuo e da quello prodotto dalle specifiche sorgenti disturbanti con l'esclusione degli eventi sonori singolarmente identificabili di natura eccezionale rispetto al valore ambientale della zona.
- **Livello di rumore residuo (L_R)**, è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" che si rileva quando si esclude la specifica sorgente disturbante.

Deve essere misurato con le identiche modalità impiegate per la misura del rumore ambientale e non deve contenere eventi sonori atipici. Esso non va confuso con il rumore di fondo che è il disturbo che rimane in assenza di tutte le sorgenti identificabili.

- **Livello differenziale di rumore (L_D)**, differenza tra il livello di rumore ambientale e quello di rumore residuo.

- **Livello di rumore corretto (L_C)**, è definito dalla seguente relazione:
 $L_C = L_A + K_I + K_T + K_B$, dove i K_i sono dei fattori correttivi introdotti per tener conto della presenza di rumori con componenti impulsive, tonali o in bassa frequenza il cui valore è di seguito indicato:
 - presenza di componenti impulsive $K_I = 3$ dB (A);
 - presenza di componenti tonali $K_T = 3$ dB (A);
 - presenza di componenti in bassa frequenza $K_B = 3$ dB (A).

- **Valori limite assoluti di immissione**, ai sensi dell'art.6 comma 1 del DPCM 1 marzo 1991 e dell'art. 8 comma 1 del DPCM 14 novembre 1997, per quei Comuni sprovvisti di piani di zonizzazione acustica (quale è il Comune di Campomarino (CB)) , si applicano i seguenti limiti di zona:

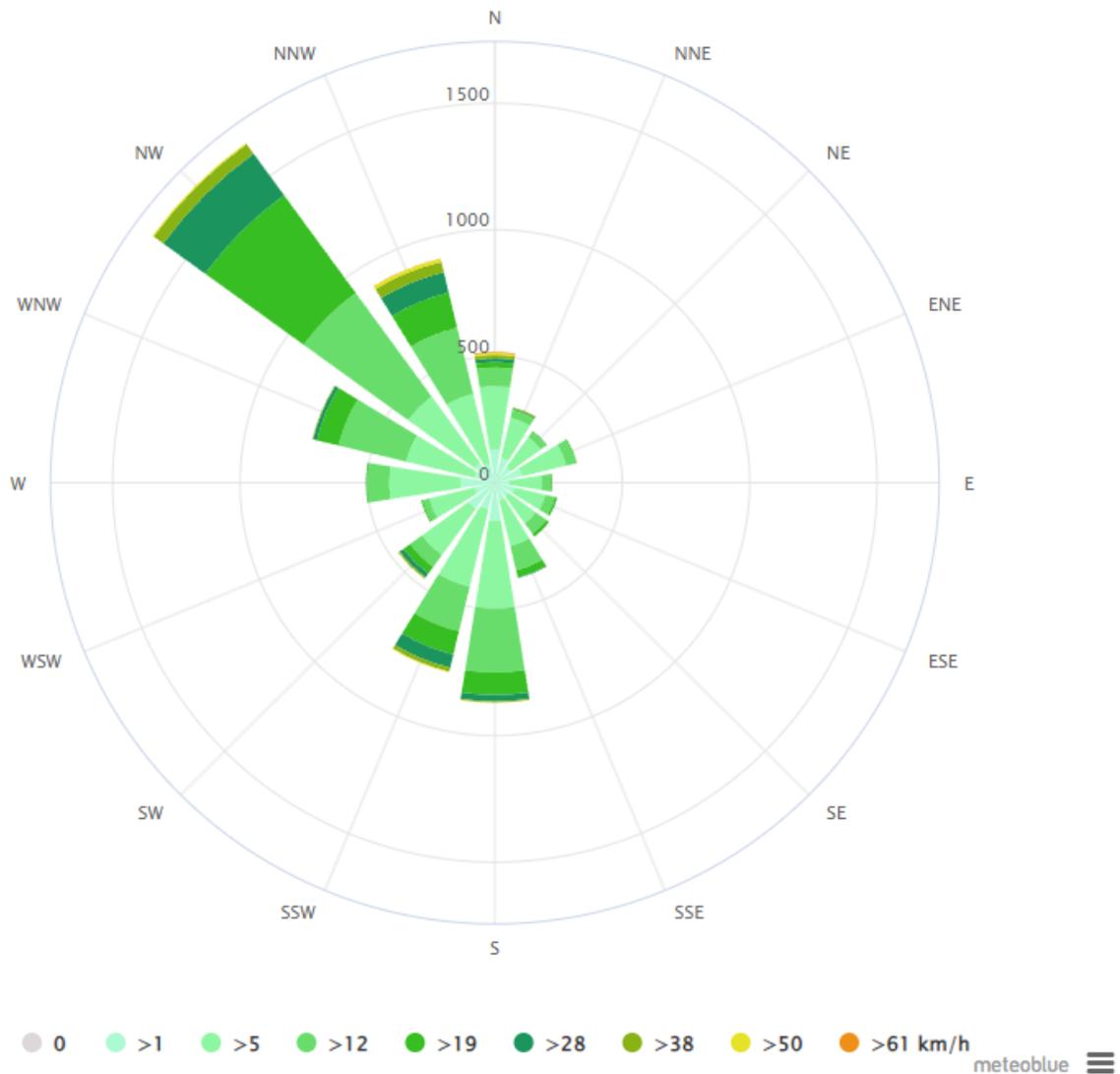
Zonizzazione	Limite diurno Leq (A) [dB (A)]	Limite notturno Leq (A) [dB (A)]
Tutto il territorio nazionale	70	60
Zona A (art.2 DM 1444/68)	65	55
Zona B (art.2 DM 1444/68)	60	50
Zona esclusivamente industriale	70	70

- **Valori limite differenziali di immissione**, ai sensi dell'art.6 comma 2 del DPCM 1 marzo 1991 e dell'art. 4 comma 1,2 e 3 del DPCM 14 novembre 1997, per le zone non esclusivamente industriali si applicano i seguenti limiti differenziali: 5 dB (A) per il periodo diurno e 3 dB (A) per il periodo notturno.

6.0 Condizioni Meteo del modello

I dati sull'attività di zona del vento sono stati desunti dal sito Meteoblue sulla stazione di Campomarino (CB).

Si riporta di seguito la rosa dei venti elaborata in km/h ed inserita nel modello:



La Temperatura media di calcolo è stata : 12°C

L'umidità di calcolo è stata: 70%

Il Fattore G (tipologia terreno) di calcolo è pari: 2.00 (Hard Reflecting)

7.0. Limiti di zona, sorgente di rumore oggetto della valutazione e sorgenti di rumore del modello.

Limiti di zona

I limiti assoluti del rumore i quali per la zona in esame sono:

Tutto il territorio Nazionale

70 dB (A) per il periodo diurno

60 dB (A) per il periodo notturno

Tale limite è stato scelto perché la zona non ricade né in fascia A e né in fascia B (art.2 DM 1444/68), .

Il Comune di Campomarino (CB) non ha adottato un Piano di Zonizzazione acustica rendendo dunque non possibile l'applicazione dei livelli assoluti di cui al D.M. 14/11/1997.

Sorgente di rumore oggetto della valutazione

La società AGRI EKO S.r.l. intende avviare un impianto Fotovoltaico da 46,75 MW su un'area di circo 80 H in agro di Campomarino (CB). L'area è attualmente a destinazione agricola.

Si riporta la planimetria di zona ove sono riportate le ubicazioni degli impianti fotovoltaici e delle sorgenti sonore previste nell'impianto e la loro emissione sonora in $L_w(A)$ di ogni sorgente.



Sorgenti Sonore principali di progetto:

S(x): n. 10 (dieci) - SMA - Medium Voltage Transformer 3780 kVA for Medium Voltage Power Station MVPS-4200-S2 - posizionati come in planimetria.

Sorgenti di rumore previste nel modello

Il modello di ricostruzione dello stato di fatto acustico è stato realizzato previa misurazioni fonometriche in punti di controllo (n. 2) per avere una rispondenza acustica veritiera sulla modellazione.

La strumentazione utilizzata per la valutazione è conforme alle specifiche di classe "1" delle norme CEI EN 60651 (misuratori di livello sonoro - fonometri), CEI EN 60804 (fonometri integratori mediatori) e CEI EN 60942 (calibratori acustici) ed è la seguente:

	Strumento	Marca e Modello	N. Matricola	C.d.T. Accredia	Data Taratura
F1	Fonometro	Norsonic Nor 145	14529962	LAT 146 15519	03/01/2023
	Filtro 1/3 d'ottava	Norsonic Nor 145	14529962	LAT 146 15520	03/01/2023

Prima e dopo ogni serie di misurazione è stata controllata la calibrazione della strumentazione mediante calibratore in dotazione, verificando che lo scostamento del livello della taratura acustica non sia superiore a 0.5 dB.

Per la costruzione del modello sono stati riportati i flussi di traffico esistenti con la specifica tipologia di mezzi di attraversamento che insistono sulle arterie viarie presenti nell'area in esame, ed altre arterie minori o strade locali di accesso alle proprietà e realtà produttive confinanti.

Sono state inserite le principali sorgenti sonore presenti nell'area rappresentate dalle abitazioni e rimessaggi rurali..

L'elaborazione di calcolo del modello senza l'inserimento delle sorgenti oggetto dello studio e la successiva verifica della rispondenza dei valori di pressione sonora rilevati nei punti di controllo, danno una garanzia sull'attendibilità dei risultati.

L'area risulta essere comunque a basso insediamento abitativo (quasi nullo), con alcune abitazioni poste a grande distanza dalla sorgente oggetto di studio..

Le valutazioni previsionali di impatto acustico sono comunque state effettuate presso le abitazioni più esposte le quali risultano sulle carte tecniche fornite dal committente, oltre a punti limitrofi alla sorgente sonora per verificare l'effettiva emissione totale del futuro insediamento produttivo.

Si precisa che la Valutazione previsionale di Impatto Acustico ha riguardato la verifica dei Valori Assoluti di immissione in ambiente esterno su tutta l'area esaminata ed in particolare nei punti ricevitori posizionati nei pressi di possibili

ricettori utili (sempre in esterno), omettendo la verifica del criterio differenziale da effettuarsi all'interno degli ambienti abitativi sensibili. Il Committente si rende disponibile per una verifica del criterio differenziale in abitazione se richiesto.

E' comunque possibile, dai dati elaborati, quantificare l'aumento di clima acustico di zona su tali ricettori sensibili che è l'indicatore principale per la valutazione della rispondenza/accettabilità del differenziale.

Il valore della sorgente sonora principale è inserita il $L_w (A)$. Le rimanenti sorgenti sono espresse il $Leq (A)$.

I valori previsionali ai punti ricevitori sono riportati in $Leq (A)$.

Nel modello previsionale sono state dunque inserite le sorgenti sonore di rumore di zona principali ed identificabili:

- 1) Sorgenti sonore previste nell'impianto di nuova realizzazione
- 2) Arterie viarie principali con pressione sonora dei rispettivi volumi di traffico valutati in frequenza
- 3) Impianti rurali presenti nell'area industriale
- 4) Arterie secondarie

Sono state inserite:

- 1) Tipologie costruttive acustiche delle facciate degli edifici identificati (materiale liscio, composito, con assorbimento di rumore, ecc.) con parametri legati alla riflessione acustica.
- 2) Ricostruzione plano-altimetrica di zona con curve di livello
- 3) Aree di Vegetazione
- 4) Parametri del terreno (fattore G).

5) Parametri dell'aria (Temperatura ed Umidità)

Si rimanda all'allegato per i valori di input del modello e delle emissioni delle singole sorgenti Acustiche.

8. GIUDIZIO CONCLUSIVO

Dal modello matematico dello stato di fatto ed implementato per la previsione con i parametri delle sorgenti da valutare costituenti IMPIANTO FOTOVOLTAICO DA 46,75 MW in agro di CAMPOMARINO (cb) e le planimetrie tecniche di progetto, ambedue forniti dalla ditta committente AGROEKO S.r.l. , si evince nei Punti Ricevitori inseriti :

	Stato di Fatto h=3 mt	Stato Futuro h=3 mt
Pos. 1	45.36	45.37
Pos. 2	50.62	50.63
Pos. 3	55.22	55.22
Pos. 4	52.82	52.82
Pos. 5	49.92	49.92
Pos. 6	51.84	51.84

e dunque inferiori o uguale a 70,0 dB(A) per il periodo diurno e inferiori o uguale a 60,0 dB(A) per il periodo notturno, quindi **CONFORMI** essendo inferiori ai limiti assoluti consentiti dall'art. 6 comma 1 del D.P.C.M. 01/03/91 per aree "Tutto il Territorio Nazionale".

In generale, comunque, non sono necessarie opere di bonifica acustica anche perché il modello non evidenzia alcuna differenza dallo stato di fatto risultando l'inserimento degli impianti del tutto irrilevante per l'impatto sonoro prodotto al clima acustico di zona, con aumenti di pressione sonora inferiori contenuti nei punti ricevitori immediatamente vicini alle future installazioni, come risulta nullo l'aumento di pressione sonora vicino ai ricettori utili distanti (abitazioni).

Si indicano comunque tali prescrizioni:

- 1) Dopo la realizzazione dell'impianto è necessario effettuare una serie di misure in ambiente esterno e nei punti ricevitori di tale relazione per verificare quanto elaborato, con sorgenti a pieno regime.
- 2) Effettuare nello stesso giorno di tale verifica, una valutazione del rumore di fondo (sorgente spenta) in ambiente esterno e negli stessi punti come ulteriore riscontro a quello elaborato in questa relazione.
- 3) Monitorare l'emissione sonora degli impianti effettuando con cadenza regolare e non inferiore ai 3 anni (e sempre negli stessi punti ricevitori) l'effettivo mantenimento delle caratteristiche di emissione acustica degli impianti.

Si rimanda alle tavole planimetriche dello Stato di Fatto e della Valutazione Previsionale Acustica , ed ai tabulati di calcolo dei valori dello stato di fatto e previsionali ai punti ricevitori.

La presente relazione deve essere integrata se vengono cambiate le sorgenti sonore previste, se vengono aumentate/diminuite, se cambia la loro posizione e se il progetto subisce variazioni.

Tanto per quanto richiesto.

Termoli 18/12/2023

La ditta

(per conoscenza ed accettazione)

Il tecnico

(ing. Ernesto STORTO)

ALLEGATI

- ❑ Dati Sorgenti e Previsionali
- ❑ Planimetrie Isofoniche dello Stato di Fatto e Stato Futuro (Previsionale)ù
- ❑ Planimetrie Valori ai Punti Ricevitori dello Stato di Fatto e Stato Futuro (Previsionale)