

Caratterizzazione delle componenti emissiva e residua dei livelli di rumore misurati in prossimità di impianti eolici in esercizio ai fini della stima dell'impatto acustico ai ricettori:

Problemi e proposte...



Gallo P. - Arpa Toscana, Via Vittorio Veneto 27, 56127 Pisa (PI), p.gallo@arpat.toscana.it
Fredianelli L. - Università di Pisa, Largo Pontecorvo 3, 56127 Pisa (PI), fredianelli@df.unipi.it
Licitra G. - Arpa Toscana, Via A. Vallisneri 6, 55100 Lucca (LU), g.licitra@arpat.toscana.it
Palazzuoli D. - Arpa Toscana, Via Porpora 22, 50144 Firenze (FI), d.palazzuoli@arpat.toscana.it
Marsico G. - ISPRA, Via Vitaliano Brancati 48, 00144 Roma (RM), g.marsico@isprambiente.it

Aumento produzione di energia da fonti alternative



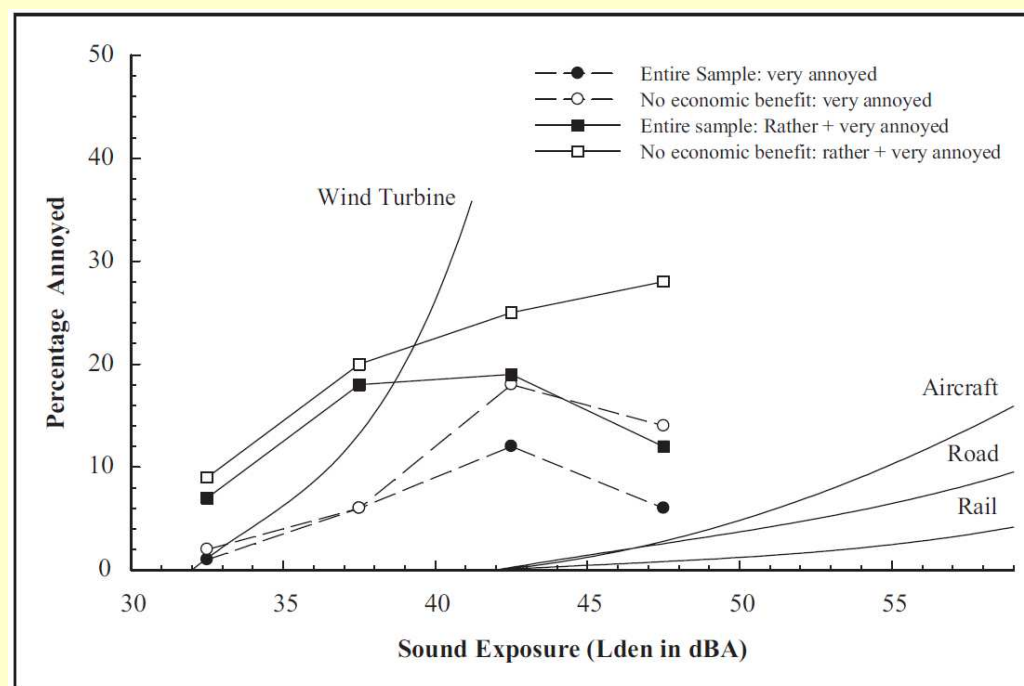
Costante diffusione di parchi eolici



Aerogeneratori installati sempre più vicini ad edifici abitati.

L'impatto acustico prodotto da impianti eolici può essere significativo presso ricettori anche molto distanti.

Studi recenti mostrano che rumore da impianti eolici, a parità di intensità, è più disturbante rispetto ad altre tipologie di sorgenti.



Da Shepherd et al. 2011 con dati da: Miedema et al., 2001; Pedersen et al., 2004; Van der Berg et al. 2008

La valutazione di impatto acustico prodotto da turbine eoliche presenta aspetti peculiari e complessi rispetto a fonti di rumore industriale o infrastrutturale.

Ad esempio:

- Emissione, residuo e propagazione dipendono tutti fortemente, e in modo differenziato, da **condizioni meteo**.
- **Misurazioni da eseguire in presenza di vento** ➔ contributi di rumore aggiuntivi (reali o fittizi) al livello complessivo di rumore misurato al ricettore.
- Dipendenza dalle **condizioni orografiche del sito**.
- **Manca di normativa nazionale e tecnica specifica**.
- Contesto dei **limiti normativi** attualmente vigenti risulta **poco funzionale** alla verifica di questa tipologia di impatto.

Scopo dello studio:

- **Analizzare le problematiche** relative ai principali fenomeni di generazione e propagazione del rumore da impianti eolici.
- **Determinare parametri e metodologie più opportune** per misura e valutazione dell'impatto acustico di parchi eolici in relazione a normativa vigente.
- **Elaborare una metodologia standard di misura e di analisi dati** finalizzata a valutazione dell'impatto acustico prodotto da impianti eolici multi-aerogeneratore (anche già in esercizio).
- **Definire procedure chiare e non eccessivamente complesse** per l'utilizzo ai fini del controllo e della consultazione da parte della popolazione. Le procedure devono anche garantire la necessaria precisione e accuratezza dei risultati.

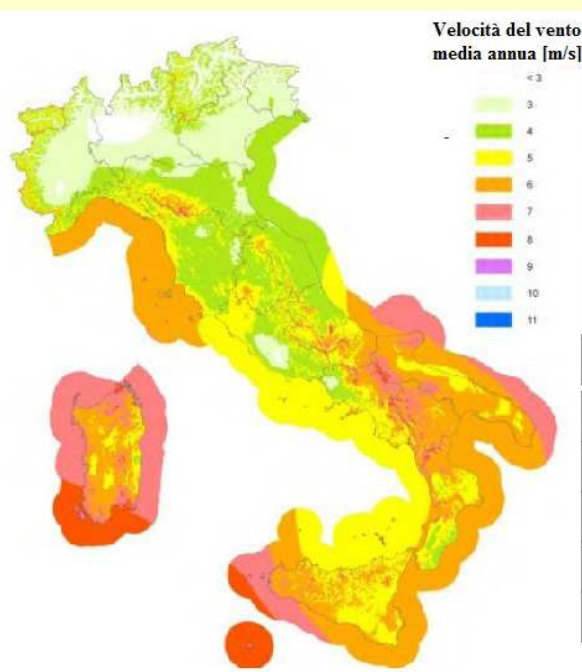
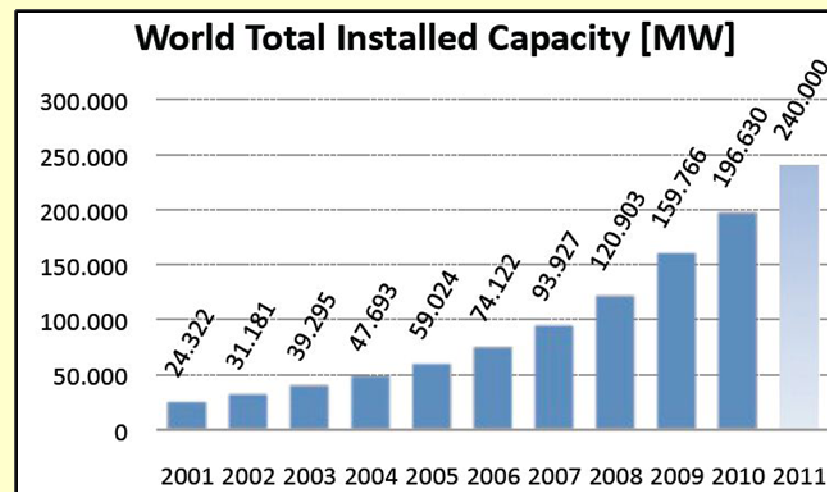
Significativi miglioramenti della tecnologia

Incentivi statali ed europei



Forte sviluppo della potenza eolica prodotta
negli ultimi anni

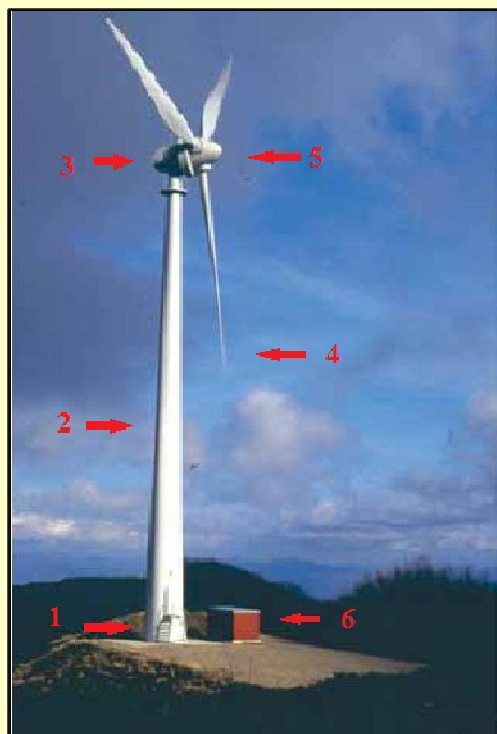
In Italia (5797 MW):



*In Toscana: installati 45 MW
totali, ma sono già
autorizzati altri 5 parchi
con un raddoppio di
potenza generata*

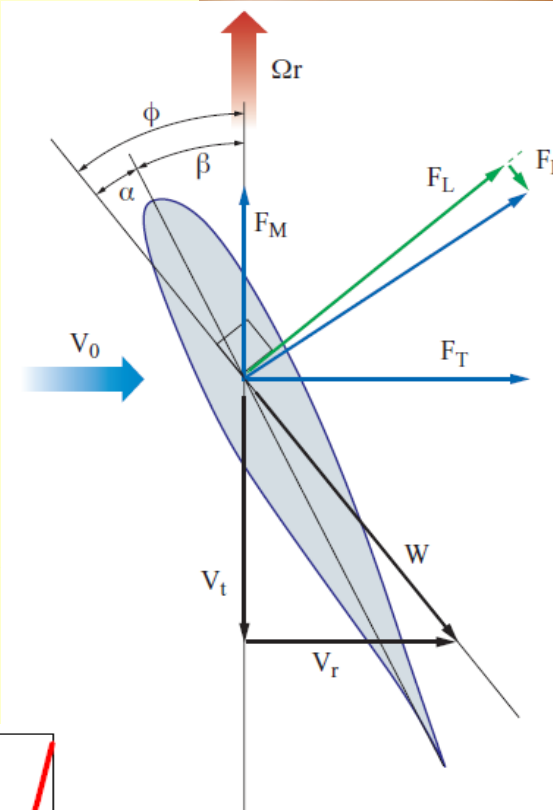
| Località | Potenza installata [MW] | N. turbine |
|--------------------------------|-------------------------|------------|
| Scansano (GR) | 20 | 10 |
| Montemignaio (AR) | 1,8 | 3 |
| Pontedera (PI) | 8 | 4 |
| Montecatini Val di Cecina (PI) | 6 | 4 |
| Chiarni (PI) | 5,9 | 7 |

Gli aerogeneratori



- 1 Fondazioni
- 2 Torre
- 3 Navicella
- 4 Tip
- 5 Hub
- 6 Trasformatore

α = angolo di attacco
 β = angolo di pitch
 V_0 = velocità vento
 Ω = velocità rotazione
 Ωr = velocità di tip
 F = forze agenti sulla pala
 W = direzione vento app.



Potenza elettrica generata

Legge di Betz:

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3$$

dove:

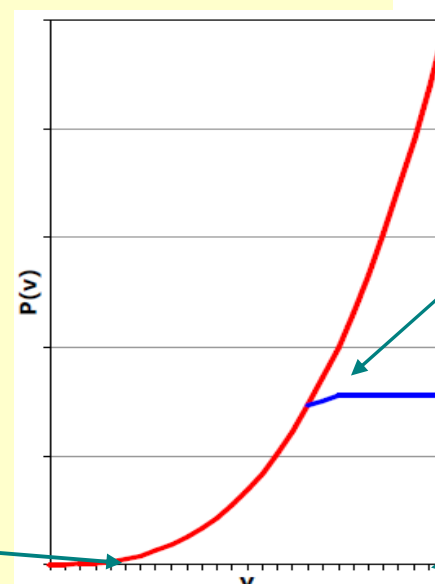
ρ = densità dell'aria (T, P)

A = sezione trasversale

v = velocità del vento

C_p = coefficiente di potenza (v)

Curva di potenza:



Velocità di **cut-in**

Alle velocità più elevate la potenza viene tagliata per motivi di stabilità e sicurezza

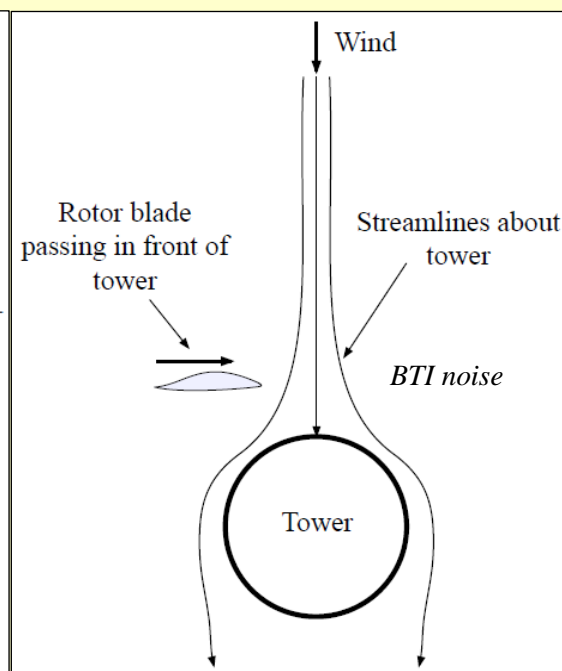
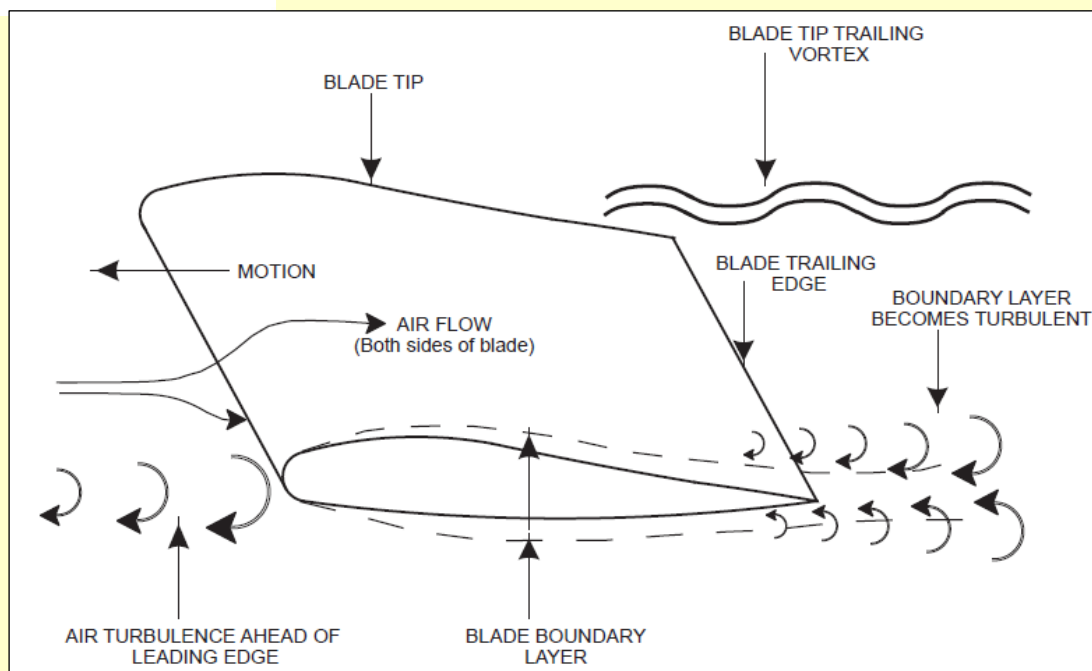
Velocità di **cut-off**

**ARPAT**Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

Generazione del rumore eolico

**ISPRA**Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

[Doolan 2012;
Tonin 2012].



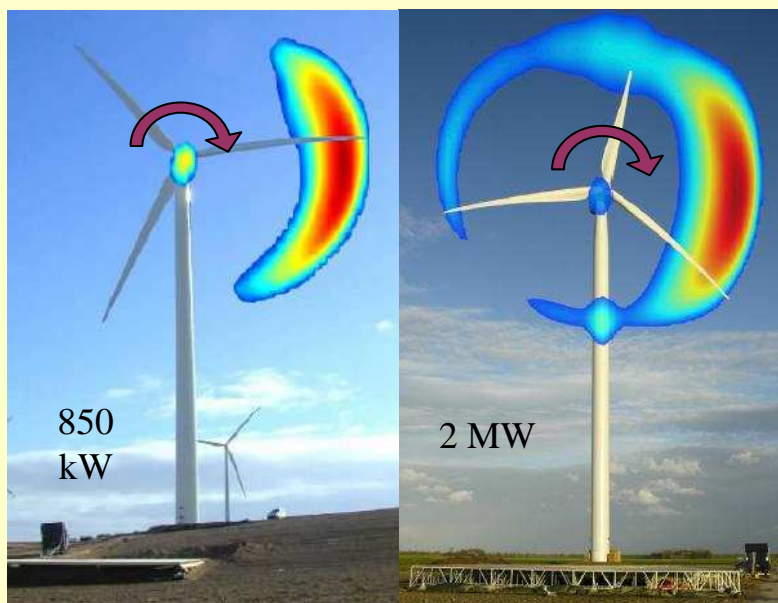
| Tipologia di rumore | Spettro tipico | Direttività | Meccanismo di origine |
|---|---|-------------|---|
| Rumore dal bordo di ingresso della pala (<i>Leading-edge noise</i>) | Banda larga con range a bassa frequenza entro 1 kHz. | Dipolo | Interazione del bordo di ingresso della pala con la turbolenza naturale del flusso entrante (inflow turbulence) |
| Rumore dal bordo di uscita della pala (<i>Trailing-edge noise</i>) | Banda larga con energia compresa essenzialmente tra 200 e 1500 Hz. | Cardioide | Interazione di vortici di superficie turbolenti con il bordo di uscita della pala. |
| Interazione Pala-Torre (<i>BIT o Blade-Tower Interaction</i>) | Di tipo impulsivo con spettro a basse frequenze e infrasuoni | Dipolo | Le pale attraversano il flusso perturbato in ingresso alla torre. |
| Rumore dall'estremità della pala (<i>Tip-noise</i>) | Banda larga a frequenze medio-basse | Cardioide | Vortici d'aria che interagiscono con l'estremità della pala. |
| Rumore tonale dal profilo della pala (<i>Airfoil tonal noise</i>) | Tonale a bassa frequenza | Cardioide | Risonanze nell'interazione tra il flusso d'aria e il profilo della pala. |



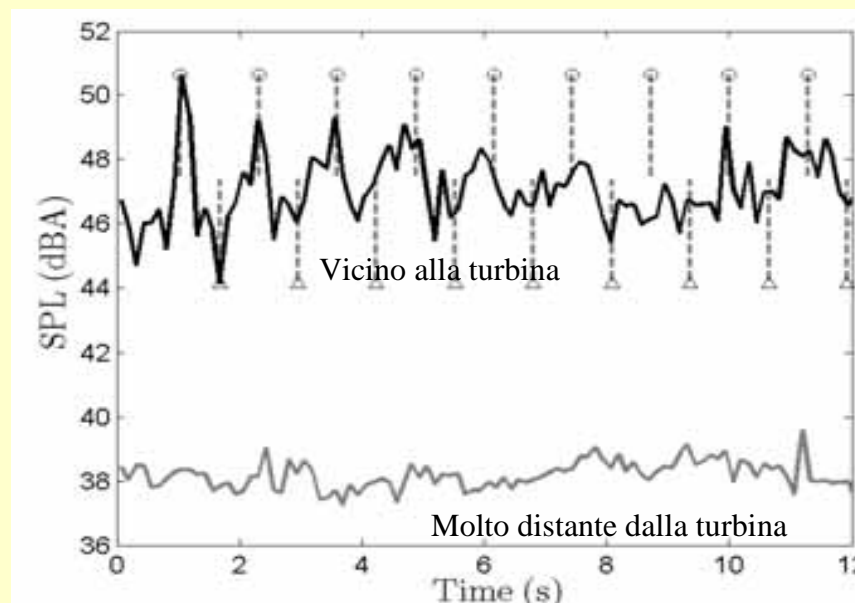
ARPAT

Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

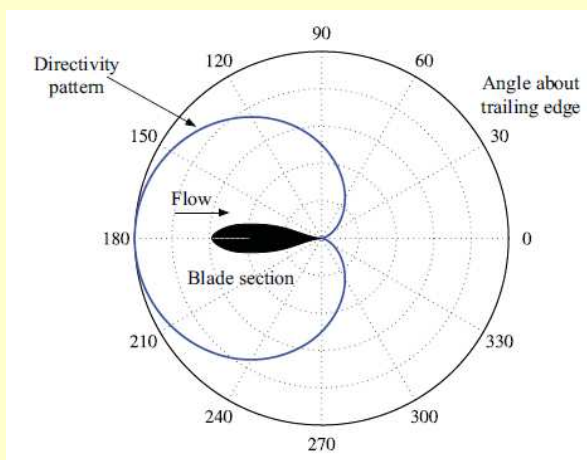
Generazione del rumore eolico



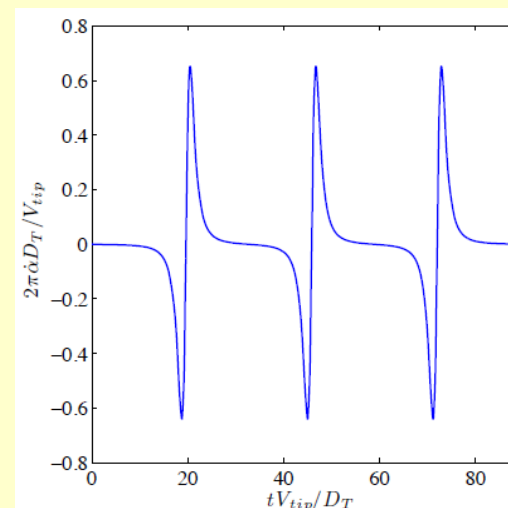
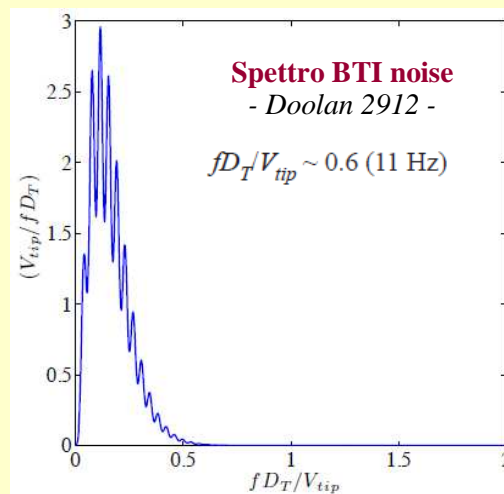
Schepers et Al., 2007 - Progetto europeo "SIROCCO"



Swish-noise [Doolan 2012] – Acquisizione con base 125 ms



Direttività del Trailing edge noise
-Doolan 2912-

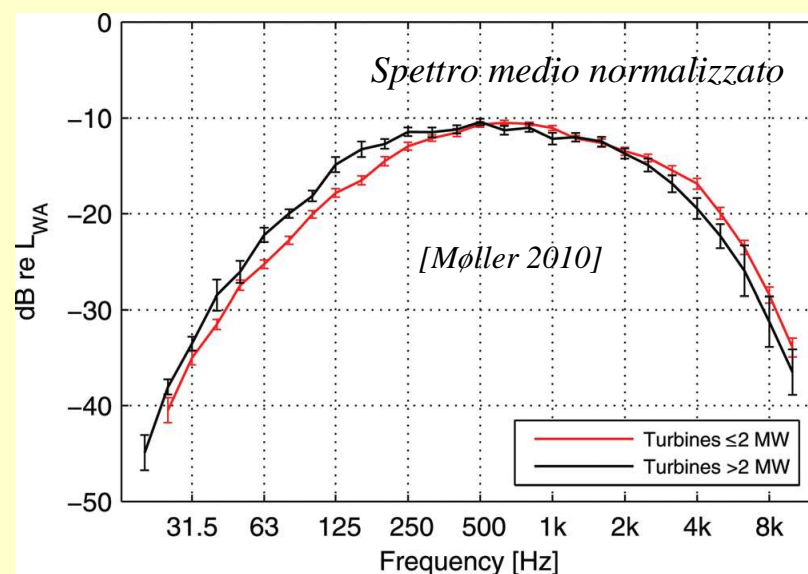


Variazione del
BTI noise su
una rivoluzione
-Doolan 2912-

Caratterizzazione dell'emissione acustica degli aerogeneratori a cura del produttore ai sensi della CEI-EN 61400-11... ➔

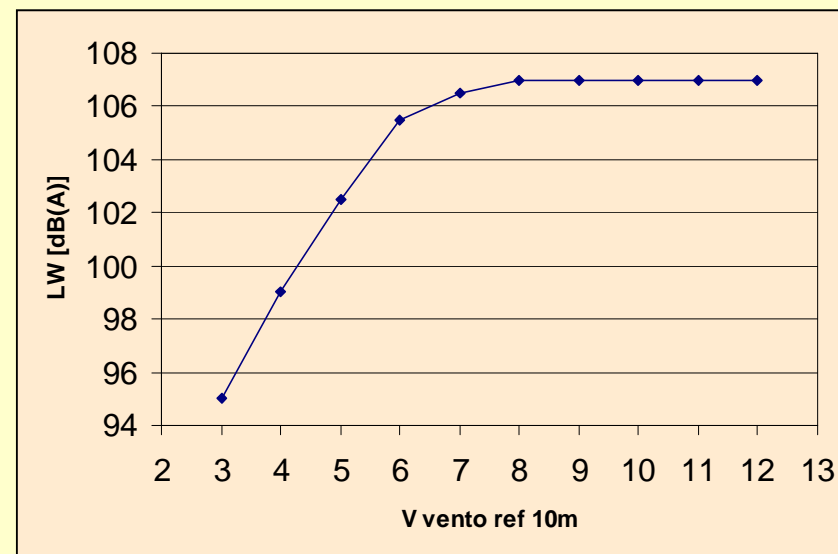
Dati minimi da riportare:

- Potenza acustica al variare della velocità del vento a 10 m;
- Spettro in bande d'ottava almeno tra 63 Hz e 4 kHz;
- Direttività;
- Presenza di componenti tonali;
- Incertezza.



| Standardised wind speed (at 10 m height) | Apparent sound power level | Tonal audibility |
|--|----------------------------|-------------------|
| V_s [m/s] | L_{WA} [dB(A)] | ΔL_a [dB] |
| 3 | 95.0 | ≤ 4 |
| 4 | 99.0 | ≤ 4 |
| 5 | 102.5 | ≤ 4 |
| 6 | 105.5 | ≤ 4 |
| 7 | 106.5 | ≤ 4 |
| 8 | 107.0 | ≤ 4 |
| 9 | 107.0 | ≤ 4 |
| 10 | 107.0 | ≤ 4 |
| 11 | 107.0 | ≤ 4 |
| 12 | 107.0 | ≤ 4 |

Turbina Nordex N90 da 2,5 MW – Altezza Hub 80 m



Generazione del rumore eolico - Basse frequenze e infrasuoni -

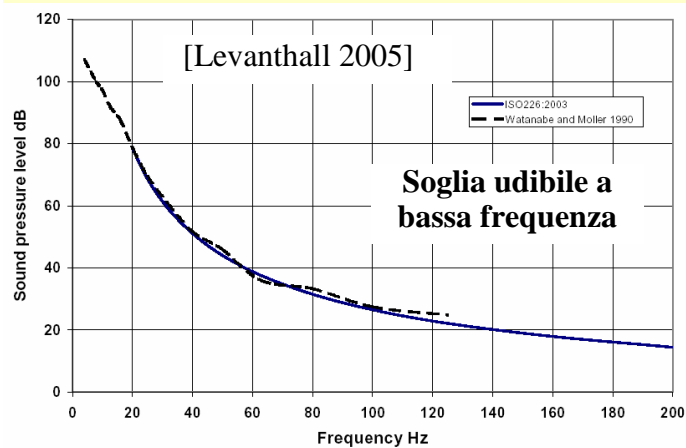
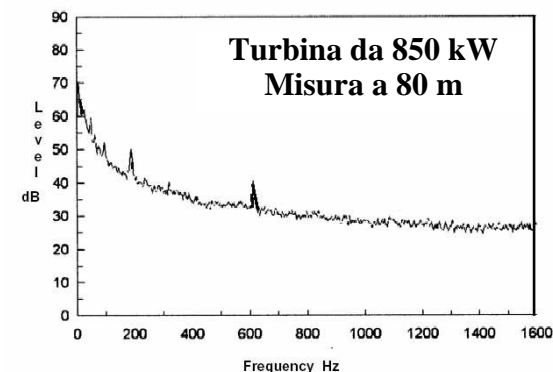
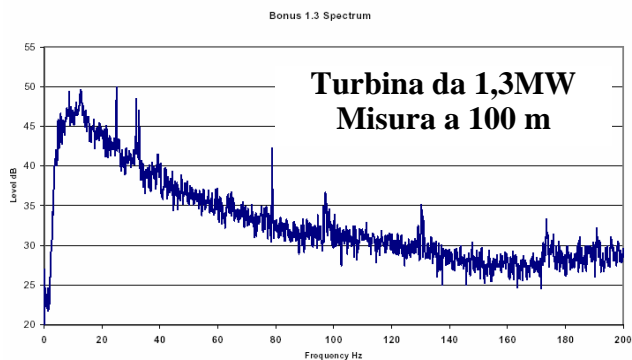
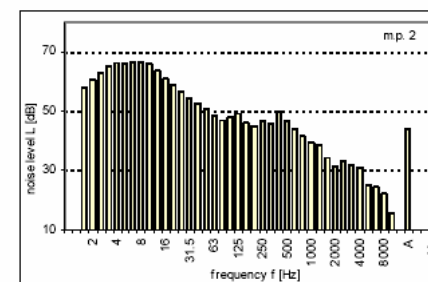
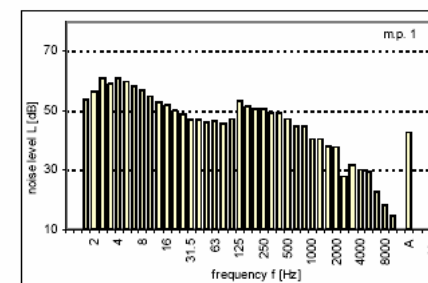
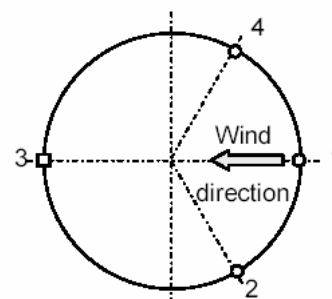
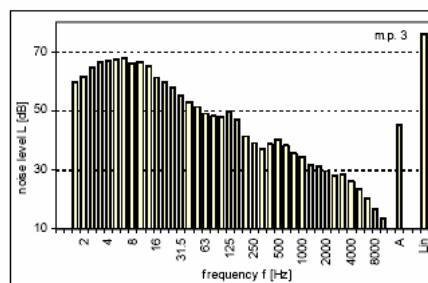


Fig 2. Low frequency threshold

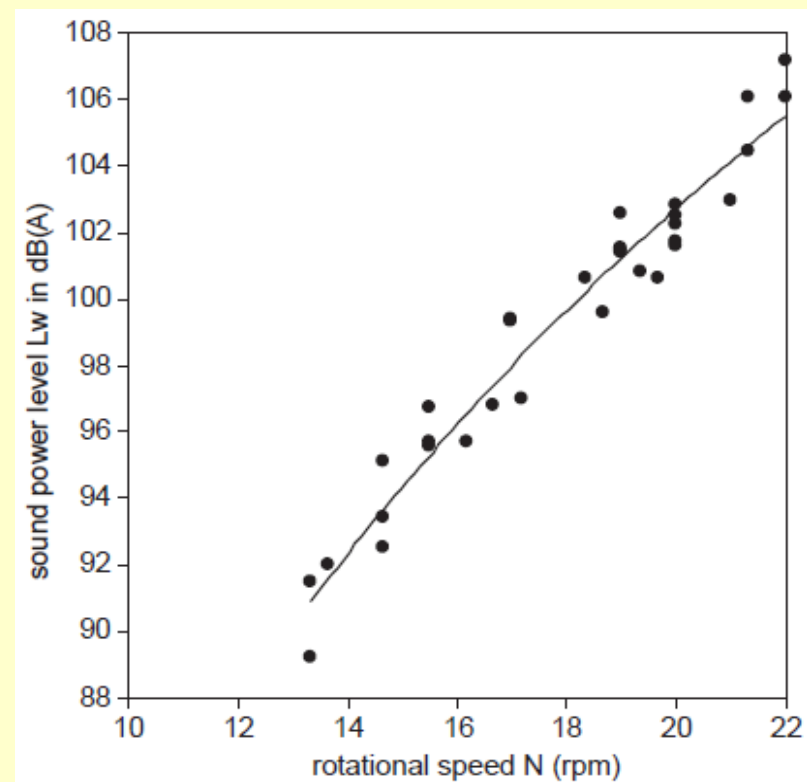
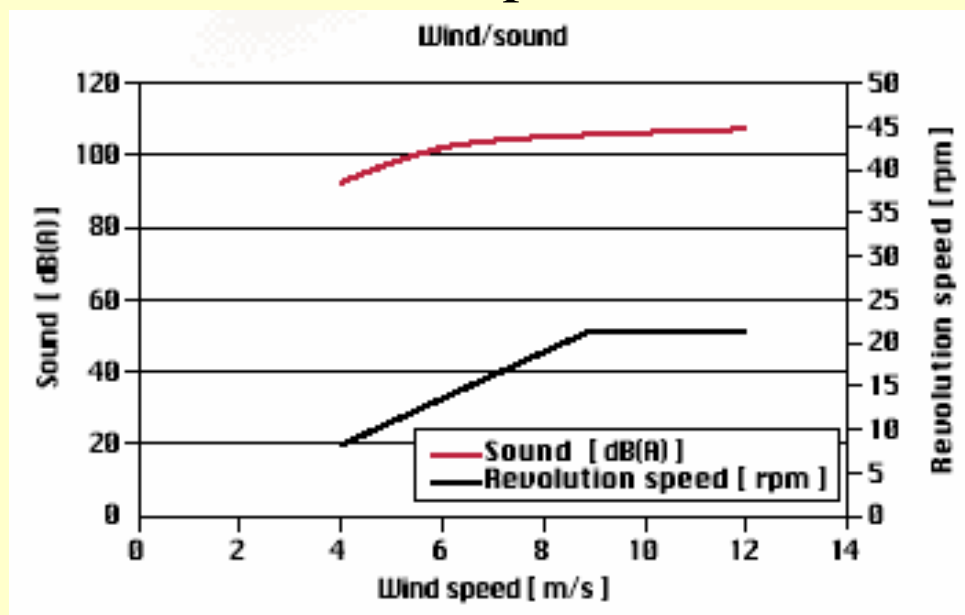


**Turbina da 2MW
Misure a 180 m**



[Golec et al., 2005] Averaged 1/3 octave noise spectra of the VESTAS V80 Turbine

In relazione alla velocità di rotazione delle pale...



Van den Berg 2003

Relazioni empiriche:

$$L_{WA} = 50 \log_{10} N + 60 \log_{10} D - 19 \quad [Hagg 1992]$$

$$L_{WA} = 67,1 \log_{10} N + 15,4 \quad [Van den Berg 2003 - \text{impianto multi-turb.}]$$

In questo studio si assume $\rightarrow W \propto N^5$

Tutto si complica nel caso di impianti multi-turbina in terreni complessi.

IMPORTANZA DELLE CONDIZIONI METEO

Produzione e propagazione del rumore, soprattutto a grandi distanze e in terreni complessi, sono **notevolmente condizionati** da:

- Velocità e direzione del vento.
- Gradienti verticali di velocità del vento e di temperatura.
- Condizioni di stabilità atmosferica.
- Rugosità del terreno.

Queste condizioni **variano nel tempo più o meno lentamente** rendendo più complessa la determinazione dell'impatto acustico.

È **difficile ritrovare**, durante le misure, le **condizioni meteo rappresentative** del sito **oppure** quelle **maggiormente gravose** dal punto di vista acustico.

È più **complessa** anche la **determinazione delle componenti residua ed emissiva** necessarie per la verifica dei limiti differenziali e di emissione.

La **rugosità del terreno** (dovuta a rilievi, valli, rocce, vegetazione, edifici, ecc.) e **stabilità atmosferica rendono discontinui i gradienti verticali di vento e temperatura** ➔ maggiore difficoltà per stimare differenza tra le velocità a terra e in quota (*wind-shear*).

Analiticamente, il profilo verticale della velocità del vento è solitamente descritto da:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^m$$

Legge esponenziale – di tipo empirico.

m = esponente di *wind-shear*.

h_1 e h_2 = altezza di due punti dal suolo.

V_1 e V_2 = velocità del vento alle due altezze.

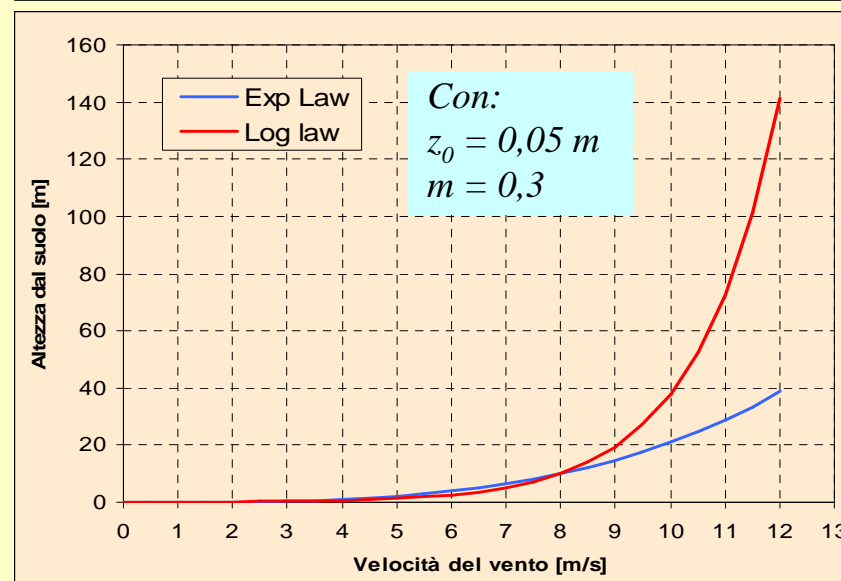
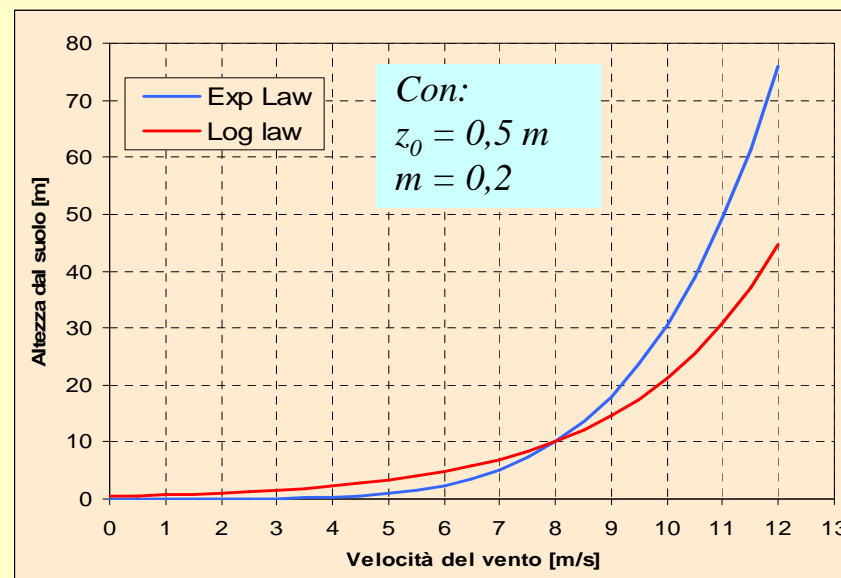
Non c'è dipendenza da rugosità terreno.

$$\frac{V_{h1}}{V_{h2}} = \frac{\log\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}{\log\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}$$

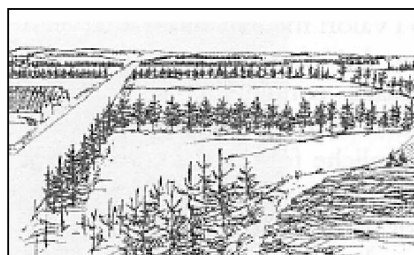
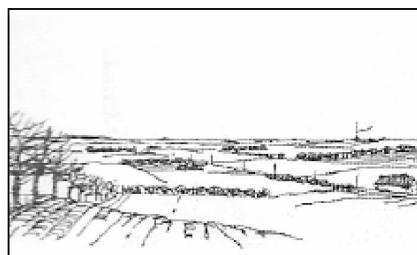
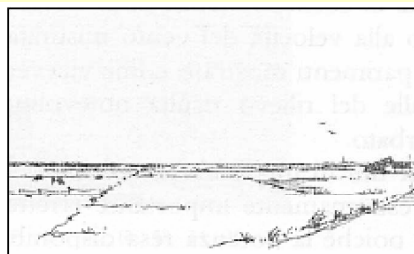
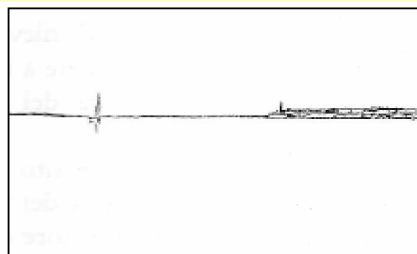
Legge logaritmica - basata su modello fisico di Garrat, 1992. Utilizzata anche da CEI 61400-11.

z_0 = *lunghezza di rugosità* del terreno.

Presuppone la condizione di atmosfera neutra.



Valori tipici della rugosità e dell'esponente di wind-shear:



| Terrain Description | Surface Roughness (z_0) |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Molto Bassa: ghiaccio o fango | 0.00001 |
| Mare aperto Calmo | 0.0002 |
| Mare mosso | 0.0005 |
| Superficie innevata | 0.003 |
| Prato, Erba | 0.008 |
| Prato irregolare | 0.01 |
| Campo incolto | 0.03 |
| Campo coltivato | 0.05 |
| Qualche Albero | 0.10 |
| Alberi o Edifici | 0.25 |
| Bosco/Foresta | 0.50 |
| Quartiere abitato | 1.50 |
| Centro città con alti edifici | 3.00 |

| Classe di stabilità | Occorrenza tipica | m aree urbane | m aree rurali | Gradiente verticale di temperatura [°C/100m] |
|---------------------|---|--------------------|--------------------|--|
| A | Instabile. Giorno soleggiato con vento leggero. | 0,15 | 0,07 | < -1,9 |
| B | Moderatamente instabile. | 0,15 | 0,07 | -1,8 |
| C | Debolmente instabile. | 0,2 | 0,1 | -1,6 |
| D | Neutro. Cielo coperto con qualunque condizione di vento. | 0,25 | 0,15 | 0 |
| E | Debolmente stabile. | 0,3 | 0,35 | 1,5 |
| F | Stabile. Notte, cielo sereno, vento leggero, inversione termica moderata. | 0,3 | 0,55 | 3 |
| G | Estremamente stabile. Aree rurali aride di notte con forti inversioni termiche. | >0,3 | >0,55 | >4 |

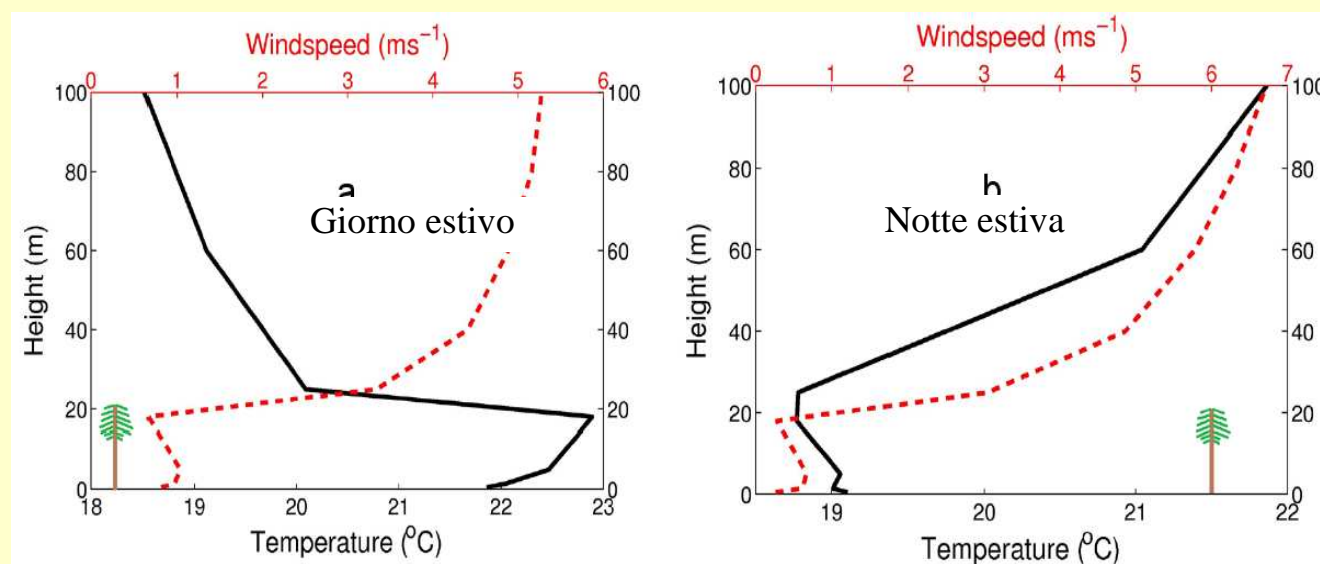
Importanza delle condizioni meteo: Complicazioni...

Alcuni studi riportano che il fenomeno del **wind-shear** è **più marcato di notte** rispetto al giorno → proprio nelle ore in cui il disturbo è maggiore.

Elevati esponenti di *wind-shear* comportano forti differenze tra le velocità del vento in quota e al suolo → elevata emissione dagli aerogeneratori e ridotti livelli di background ai ricettori (e quindi maggiore disturbo).

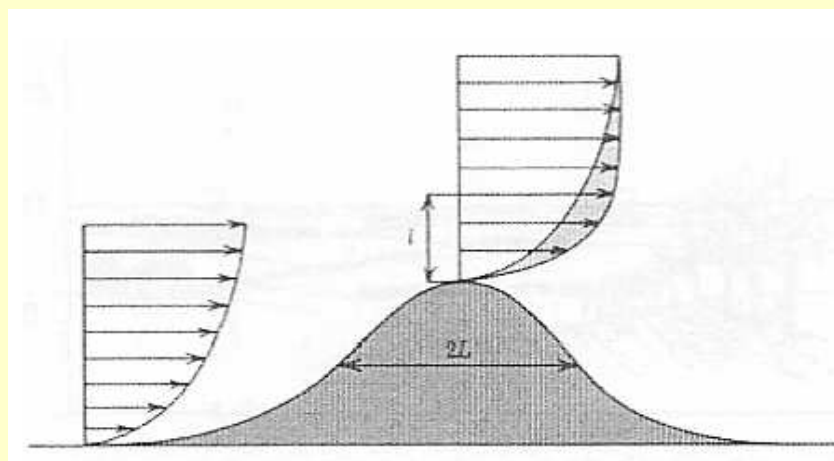
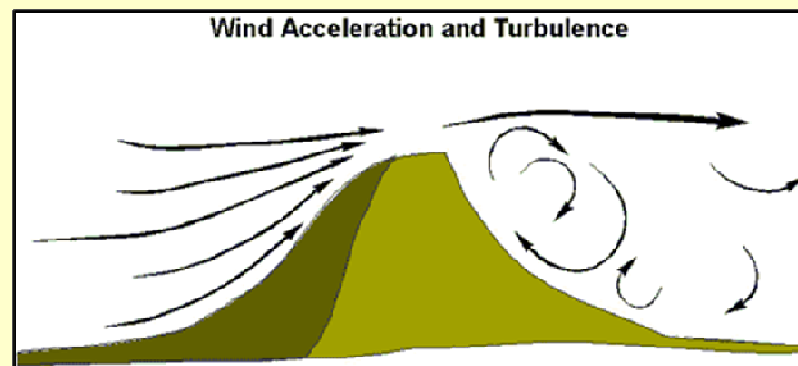
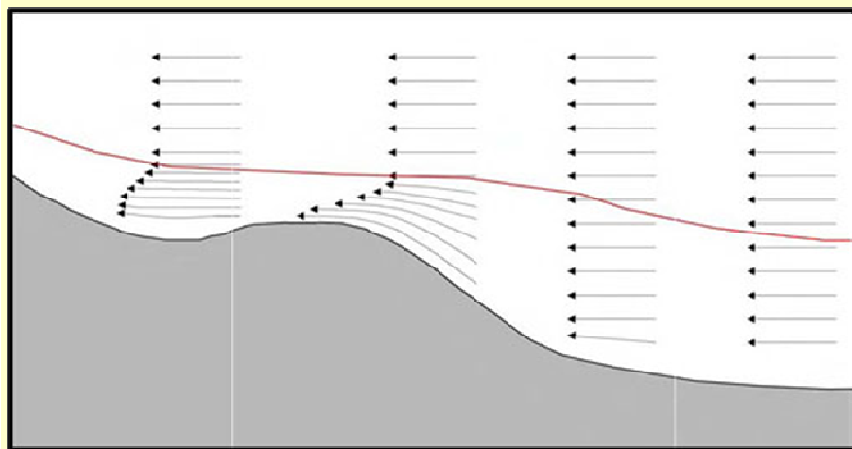
Anche l'effetto di **swish-noise** può essere **più pronunciato la notte** rispetto al giorno a causa dei cambiamenti di profilo di vento (le pale incontrano differenti velocità del vento durante la rotazione).

In **terreni complessi** o con **folta vegetazione ad alto fusto**, i gradienti verticali di vento e temperatura subiscono notevoli alterazioni fino ad altezza alberi.



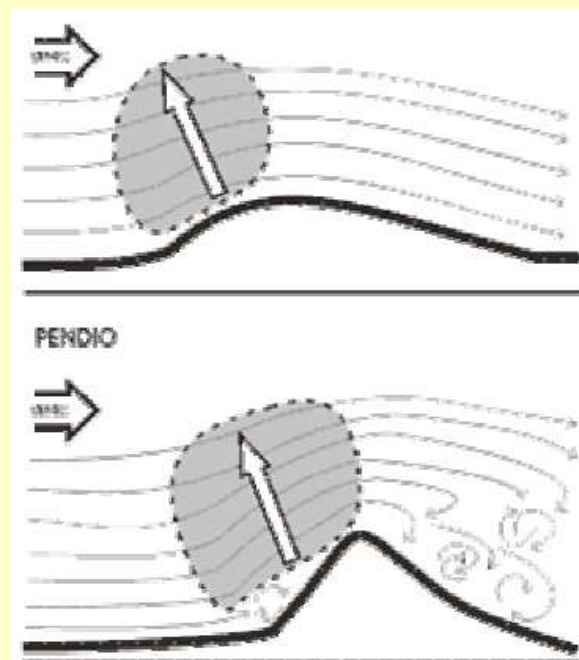
Importanza delle condizioni meteo: Complicazioni...

Effetto collina in presenza di terreni complessi.



Sulla sommità sono
possibili incrementi
locali della velocità
del vento a quote
basse

Possibili zone con
distacco di vena e
turbolenze



A supporto dello studio sono state condotte due campagne di misura in altrettanti siti ad orografia complessa.

| | Parco eolico “La Miniera” | Parco eolico “Poggi Altì” |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Comune</i> | Montecatini Val di Cecina (PI) | Scansano (GR) |
| <i>Gestore</i> | WPP UNO AG Spa | EON Italia Srl |
| <i>N° aerogeneratori</i> | 6 | 10 |
| <i>Potenza aerogeneratori</i> | 1,5 MW | 2 MW |
| <i>Altezza hub</i> | 61,5 m | 67 m |
| <i>Diametro rotore</i> | 77 m | 90 m |
| <i>Periodo misure</i> | 22/12/10 ÷ 12/01/11 | 04/07/11 ÷ 22/07/11 |
| <i>Durata misure</i> | 22 gg | 19 gg |

- Sono stati acquisiti in continua dati di rumore e dati meteo al ricettore.
- I dati operativi delle turbine e i dati meteo all'hub di ogni aerogeneratore sono stati forniti dai gestori degli impianti.



ARPAT

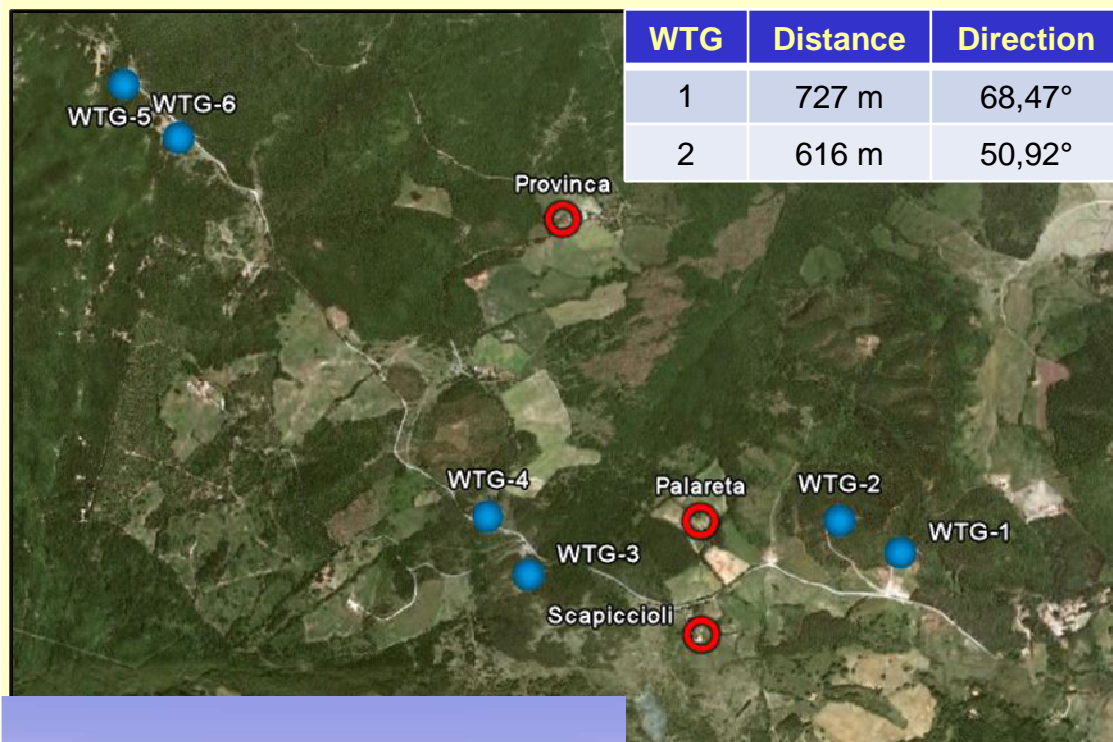
Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

Sito: “La Miniera” Montecatini Val di Cecina

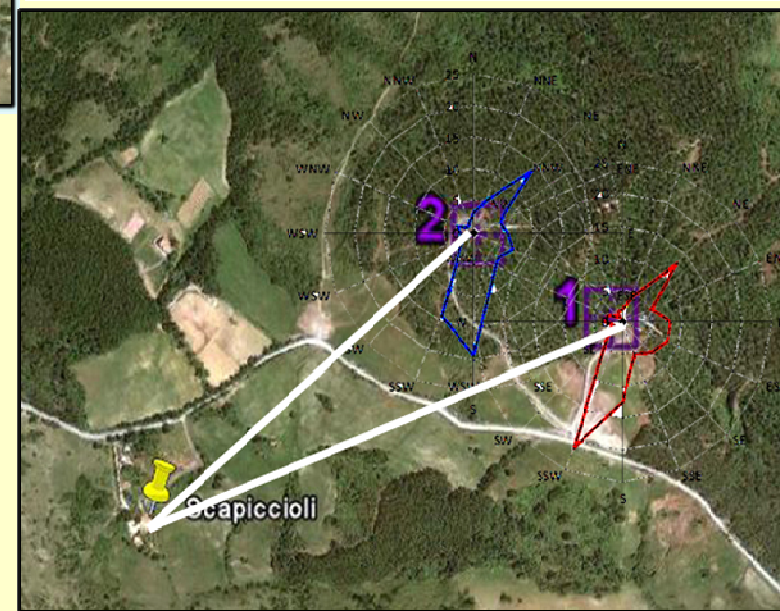
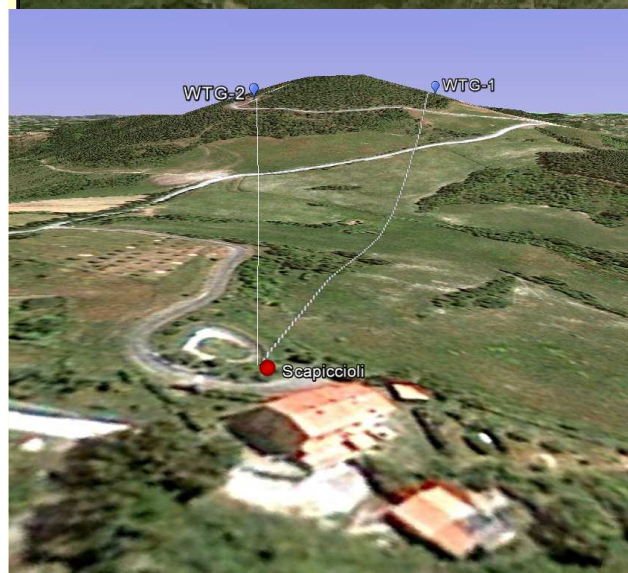
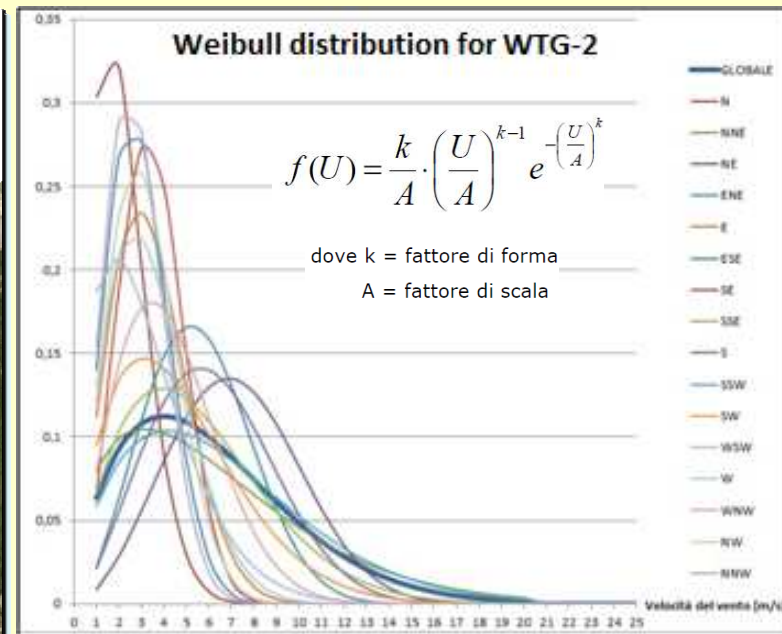


ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



| WTG | Distance | Direction |
|-----|----------|-----------|
| 1 | 727 m | 68,47° |
| 2 | 616 m | 50,92° |





ARPAT

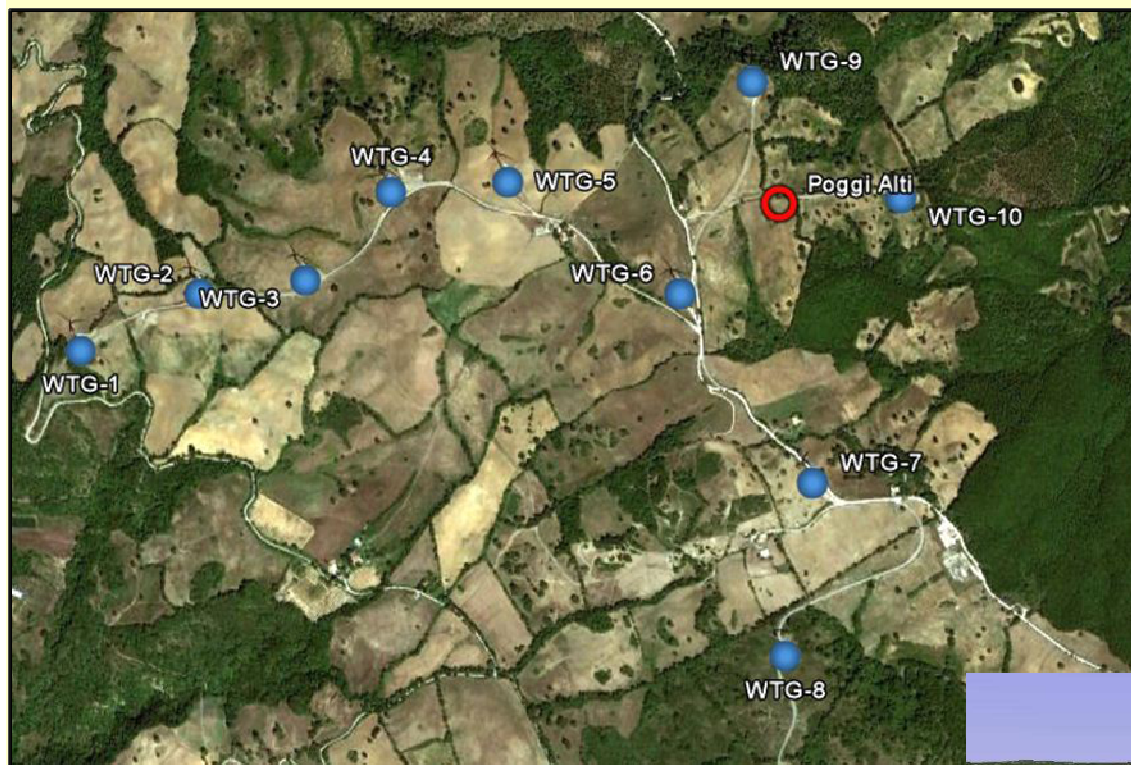
Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

Sito: “Poggi Alti” Scansano



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



| WTG | Distanza | Direzione |
|-----|----------|-----------|
| 5 | 610 m | 275,5° |
| 6 | 293 m | 227,7° |
| 7 | 619 m | 172,9° |
| 9 | 279 m | 348,2° |
| 10 | 183 m | 85,6° |



ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

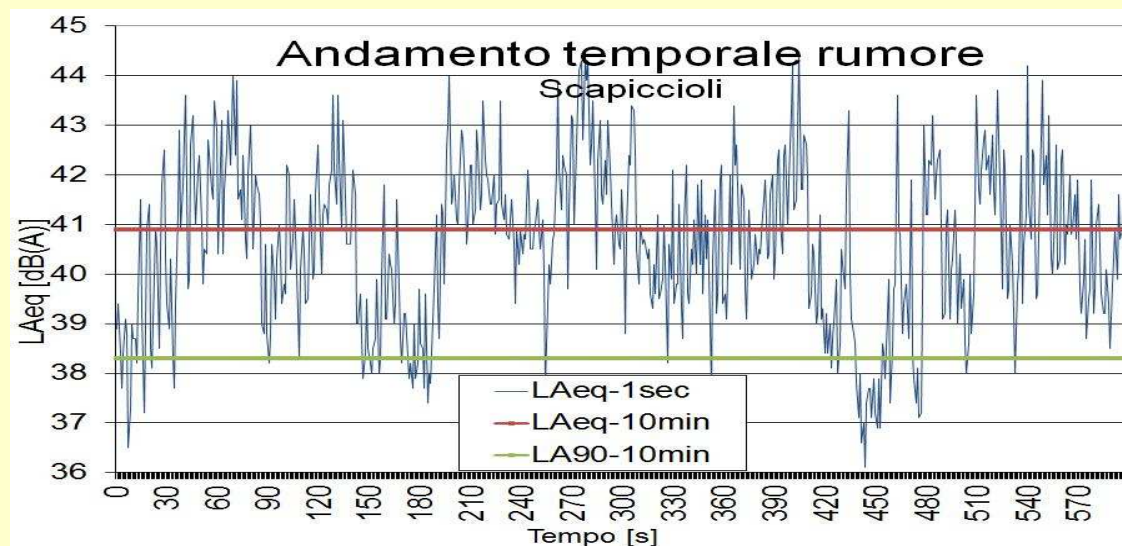
Quale parametro di rumore acquisire? L_{Aeq} oppure L_{A90} ?

L_{A90} → Utilizzato da molte normative tecniche nazionali e spesso in letteratura scientifica.

Vantaggi: – consente di escludere facilmente eventi rumorosi anomali;
– in prossimità della sorgente il suo andamento è correlabile direttamente a quello di emissione della turbina.

Svantaggi: – è difficile da trattare come parametro di valutazione del disturbo;
– è ingannevole in presenza di rumori estranei stazionari;
– non tiene conto di tutta l'energia sonora immessa dalla sorgente, soprattutto in impianti multisorgente.

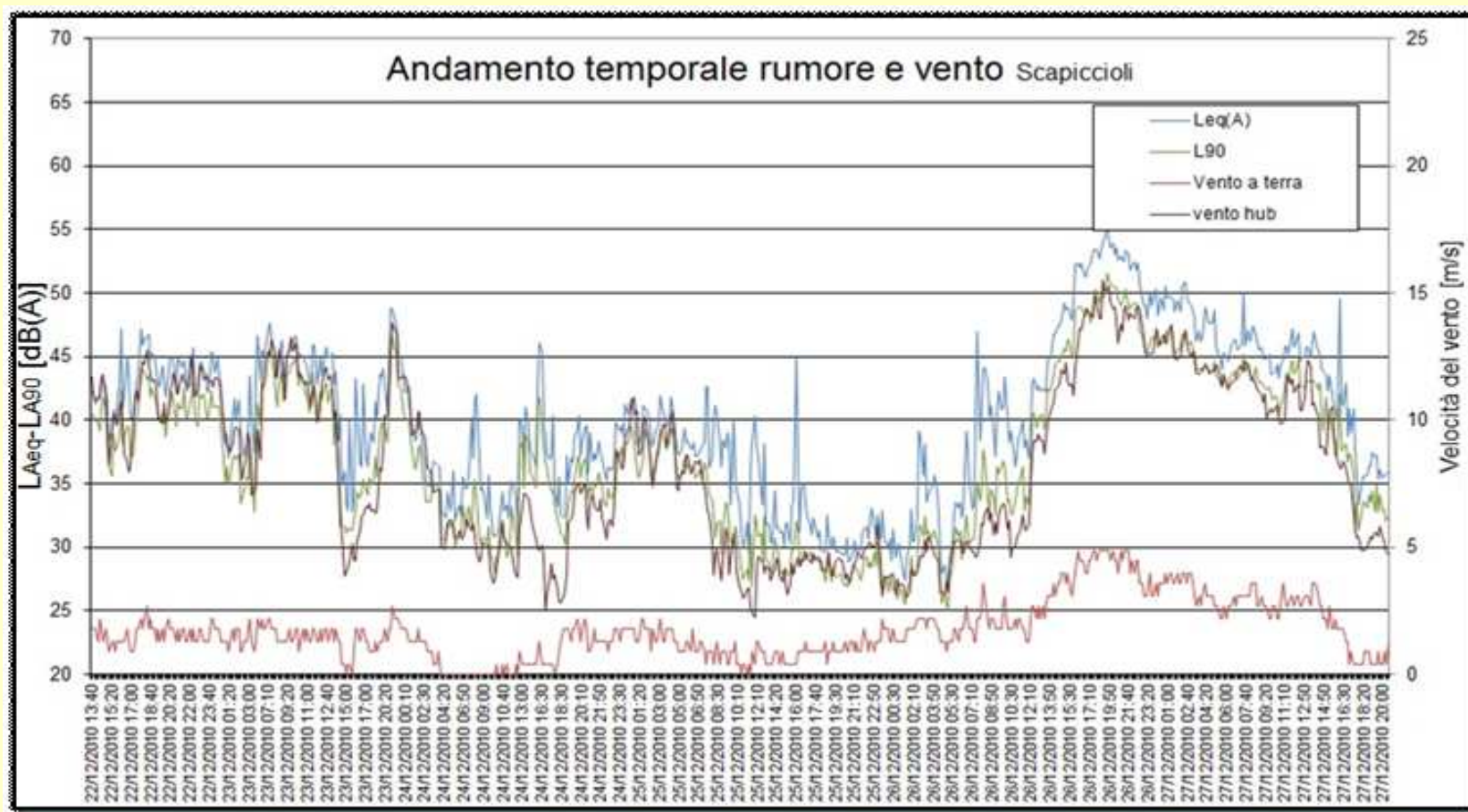
Per gli scopi del presente studio il parametro più opportuno risulta il L_{Aeq} .



ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Si acquisisce il L_{Aeq} su base temporale di 1s per consentire l'individuazione e l'eliminazione di eventi spuri;

Il parametro utilizzato nelle elaborazioni è il $L_{Aeq,10m}$ calcolato su intervalli consecutivi di 10 minuti.



ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Per gli scopi del presente studio, è necessario acquisire un minimo di 2000 dati per ogni ricettore; un dato è costituito da:

➤ **Dati acustici:**

- $L_{Aeq,10min}$ valutato su intervalli temporali successivi di 10';
- Spettro acustico medio del L_{Aeq} in bande di 1/3 di ottava;

➤ **Dati meteorologici** (tutti riferiti ad intervalli minimi di 10'):

- Media velocità del vento a terra (a 3 m da suolo);
- Moda direzione del vento a terra (a 3 m da suolo);
- Precipitazioni (pioggia, neve, grandine);
- Temperatura media;
- Media velocità del vento all'hub per ogni turbina (dal gestore);
- Moda direzione del vento all'hub per ogni turbina (dal gestore);
- Media velocità rotazione delle pale per ogni turbina (dal gestore);
- Temperatura al rotore per ogni turbina (dal gestore) (facoltativa).

ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Pulizia dei dati acquisiti

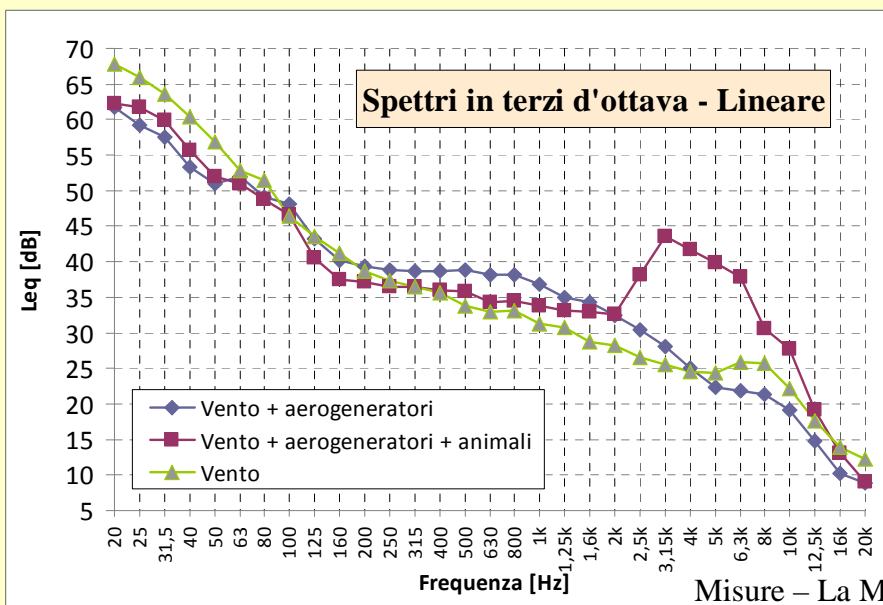
È la fase più delicata e laboriosa...(vista la quantità di dati)...

Ai sensi di legge → eliminare periodi con precipitazioni o con velocità del vento al suolo $> 5 \text{ m/s}$.

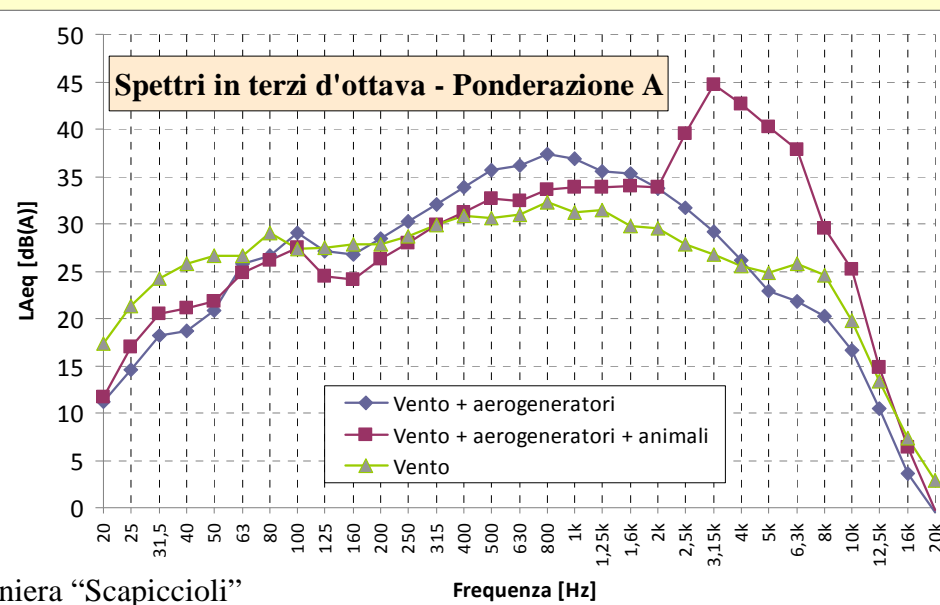
Dopo la ripulitura, scartare i dati $< 5'$ (50% intervallo di misura).

Per eliminazione di eventi anomali, possibile fissare criteri con livelli statistici.

Attenzione, in aree rurali, a rumorosità di uccelli ed insetti che, solitamente, ha carattere stazionario → si può ricorrere ad analisi spettrale:



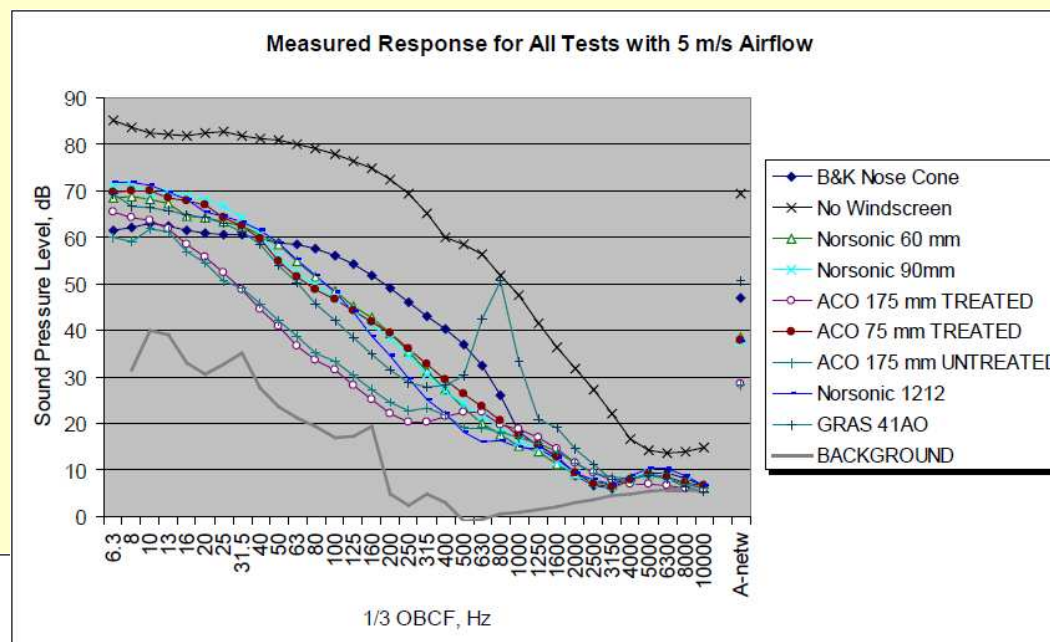
Misure – La Miniera “Scapiccioli”



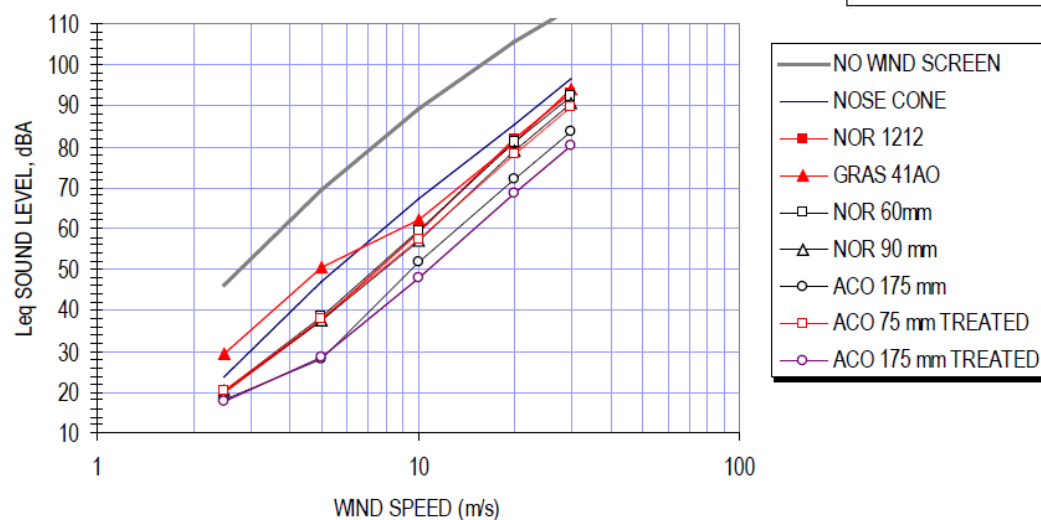
ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Pulizia dei dati acquisiti

Eliminazione dati con
 $V_{suolo} > 5 \text{ m/s}$,
è requisito di legge
confermato da studi
sull'argomento
[Hessler, 2009].



Self-Generated Sound Levels for All Tests
A-weighted Response



➔ fondamentale utilizzare
cuffie antivento di ottima qualità
e con diametro $\geq 90 \text{ mm}$.

Inoltre...

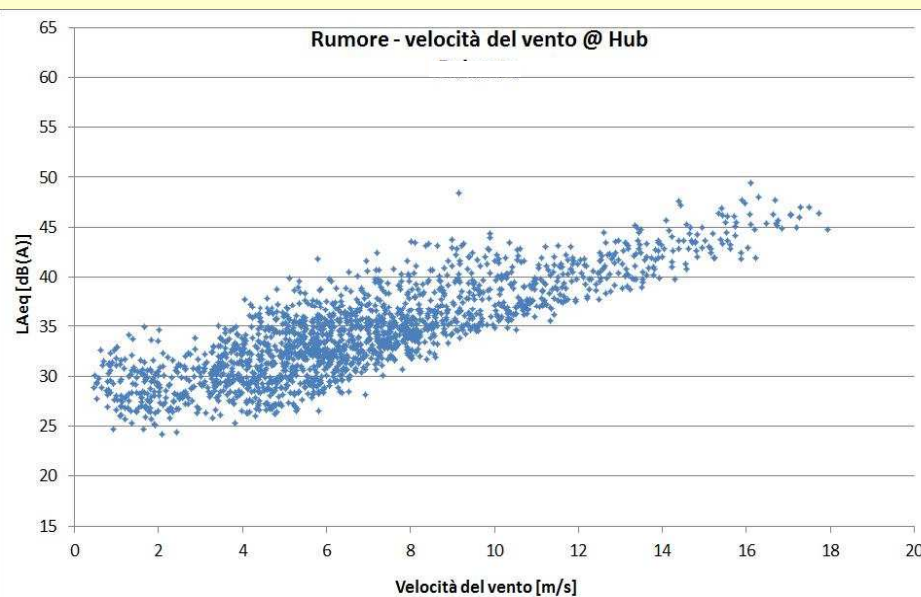
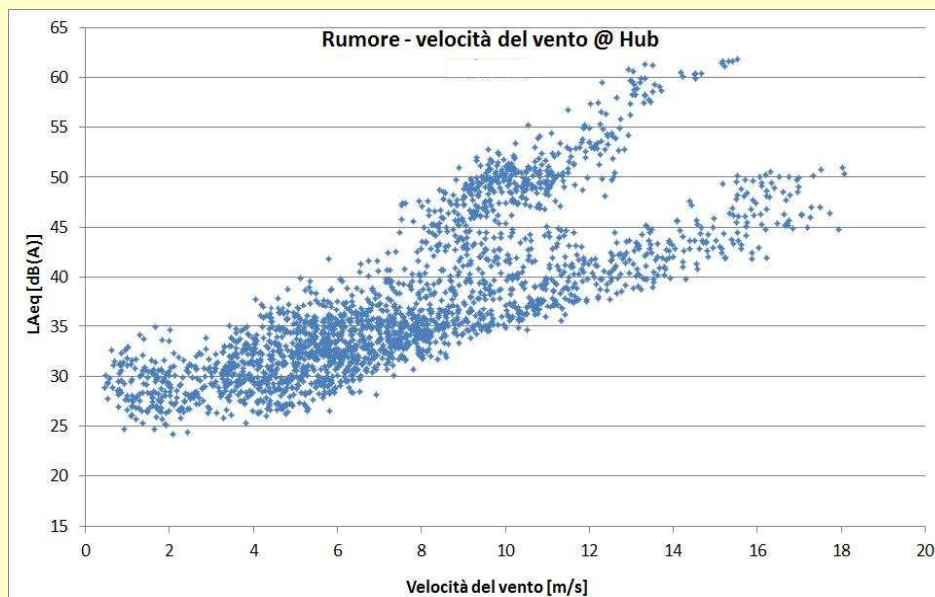
ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Pulizia dei dati acquisiti

...questo aspetto è evidenziato anche da un'analisi eseguita sui risultati della presente indagine.

Le dispersioni dei risultati delle misure con e senza i dati con velocità del vento al suolo $> 5 \text{ m/s}$, mostrano uno sdoppiamento alle alte velocità con livelli di rumore inverosimilmente elevati se ricondotti all'impianto eolico.

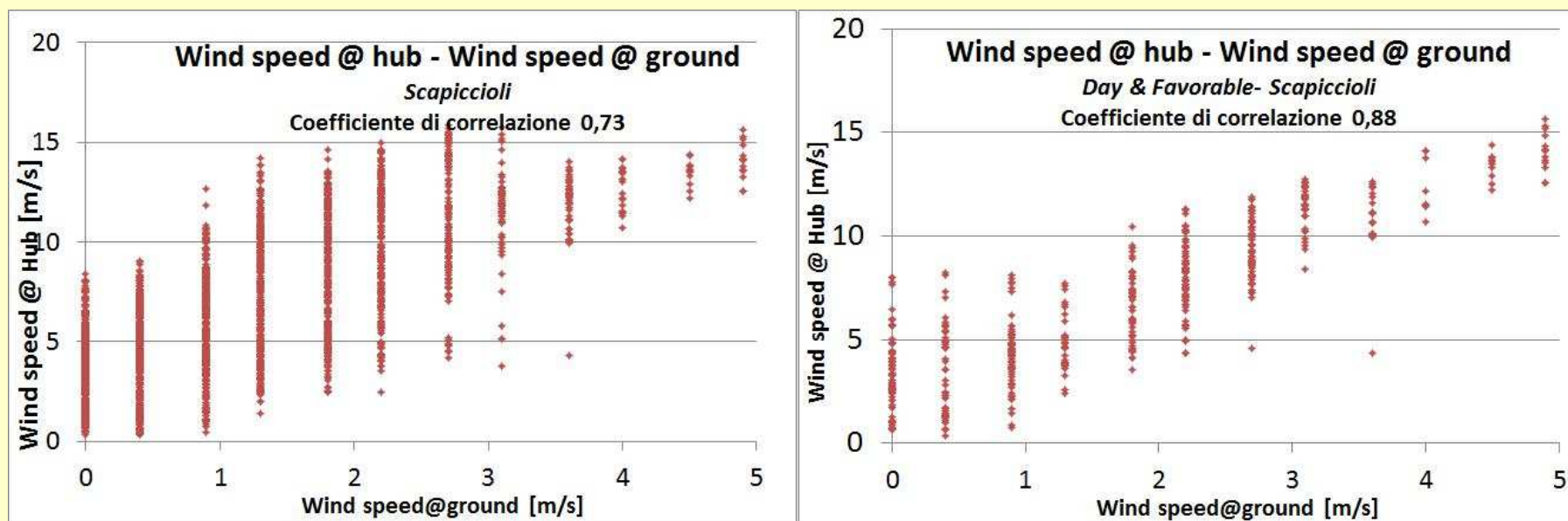
Il ramo più alto scompare selezionando soltanto i dati con una velocità del vento a terra $\leq 5 \text{ m/s}$.



ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Relazione fra velocità del vento al ricettore (3 m dal suolo) e velocità del vento ad altezza hub dell'aerogeneratore più vicino.

Dispersioni ottenute considerando in (a) tutti dati e in (b) solo dati del periodo diurno e relativi a condizioni con ricettore sottovento rispetto alla sorgente.



Evidente forte dispersione dei dati che dipende da fattori casuali e complessi

- ➔ si considerano tra loro indipendenti i dati di V_{suolo} e V_{hub}
- ➔ necessario mantenere entrambe le informazioni.

ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Descrizione della componente emissiva

Sono già state evidenziate alcune criticità legate all'utilizzo di V_{hub} per l'elaborazione dei dati di rumore.

V_{hub} può essere fonte di notevoli incertezze nei calcoli di impatto acustico di un parco eolico [Bigot, 2011].

Le cause sono: forte instabilità e difficoltà di misurazioni attendibili.

Infatti, solitamente è misurato con sonda meteo sull'hub di ogni aerogeneratore, dietro le pale, all'interno del campo di turbolenza creato dalla loro rotazione.

Questo aspetto è anche evidenziato dalla norma IEC 61400-11.

➔ Necessario parametro alternativo da associare all'emissione acustica per ridurre l'incertezza associata. Ciò deriva anche da:

- presenza di soglie di cut-in e cut-off,
- necessità dei gestori di fermare o rallentare periodicamente i singoli aerogeneratori per esigenze di servizio,
- variazione del campo di vento tra un aerogeneratore ed un altro nel caso di ricettori influenzati da più aerogeneratori in orografia complessa.

Descrizione della componente emissiva

Velocità di rotazione delle pale (N) risulta parametro più adatto per esprimere la dipendenza funzionale dell'emissione di rumore degli aerogeneratori

Infatti:

- rumore degli aerogeneratori è fondamentalmente legato ad N più che a V_{hub} (escludendo condizioni di “stallo”);
- incertezza legata alla misura di N (fornito dai gestori) è ridotta;
- per $N \sim 0 \text{ rpm}$ (pale ferme o “a bandiera”) non si ha emissione di rumore significativa anche per V_{hub} elevate;
- nel caso di più aerogeneratori impattanti, riferendo la rumorosità totale al ricettore a N si può tenere conto dei periodi in cui la singola pala è tenuta ferma indipendentemente dalle altre.

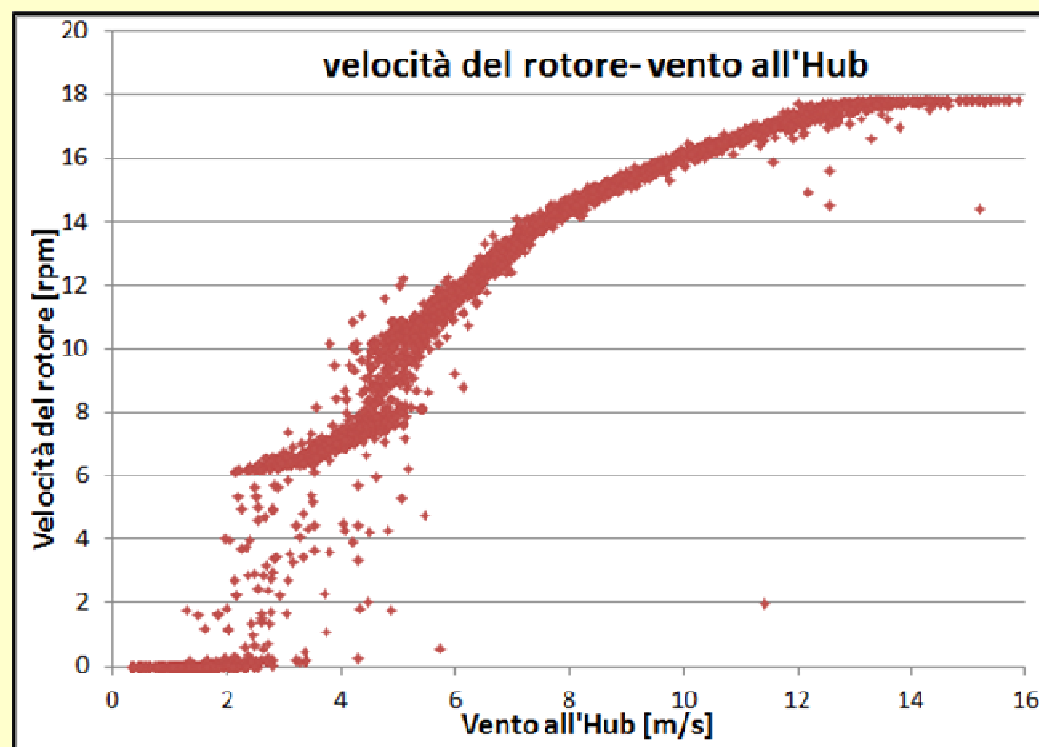
ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Descrizione della componente emissiva

Relazione tra N e V_{hub} :

Per velocità del vento
intorno alla velocità di cut-
in non esiste relazione
biunivoca;

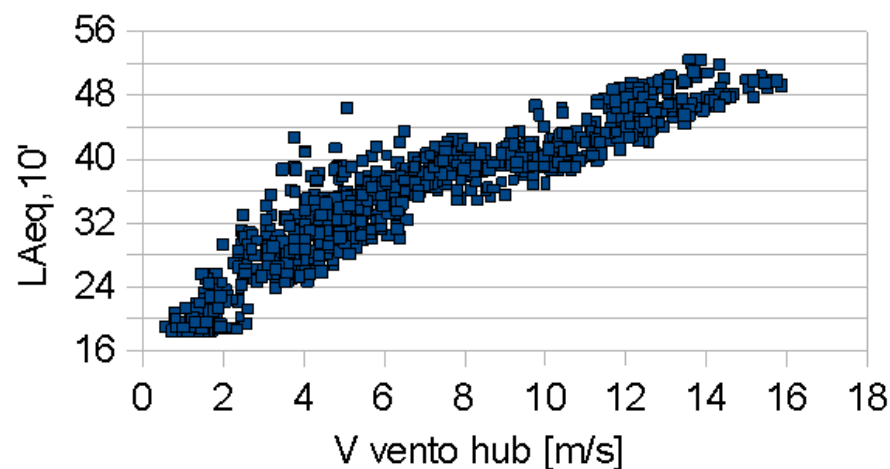
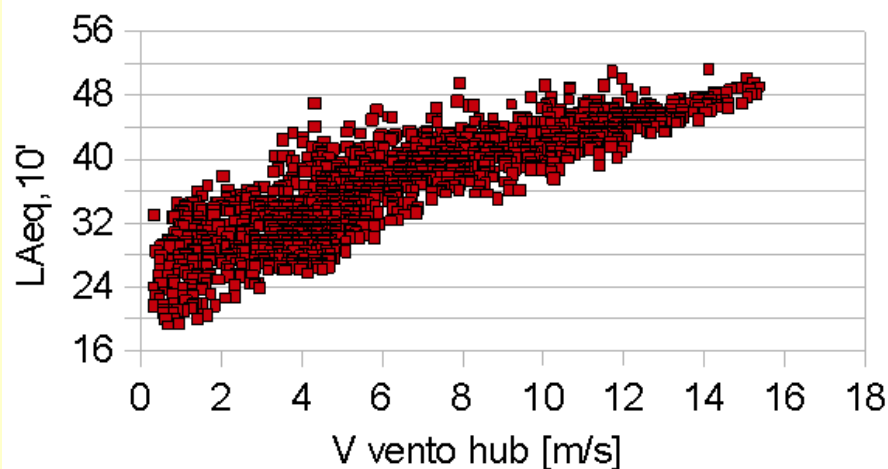
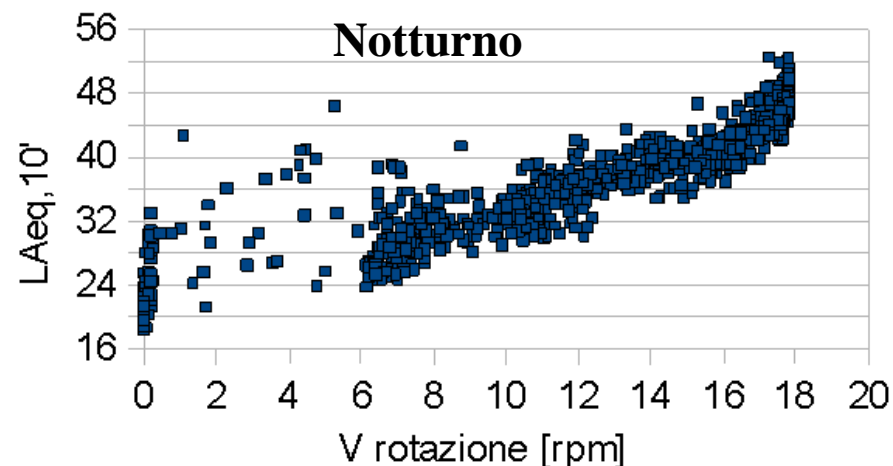
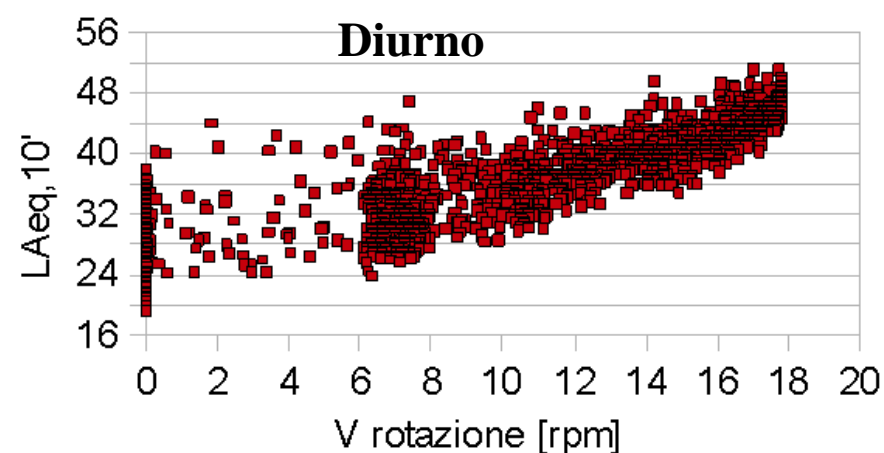
➔ l'associazione con i dati
di rumore potrebbe
risultare falsata.



$$rpm(v_{hub}) = \begin{cases} 0 & se \quad v_{hub} \leq 2,5 \\ 20,6 - 26,75 \cdot e^{-0,18 \cdot v_{hub}} & se \quad 2,5 < v_{hub} < 12 \\ 18 & se \quad v_{hub} \geq 12 \end{cases}$$

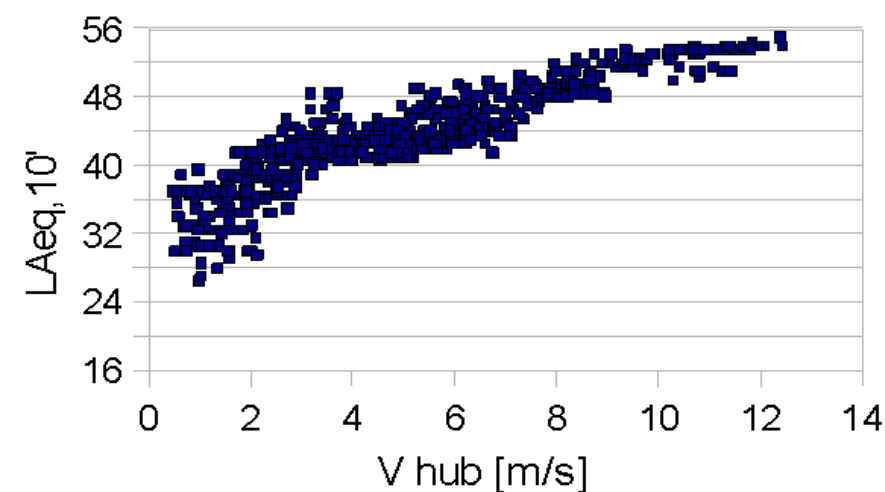
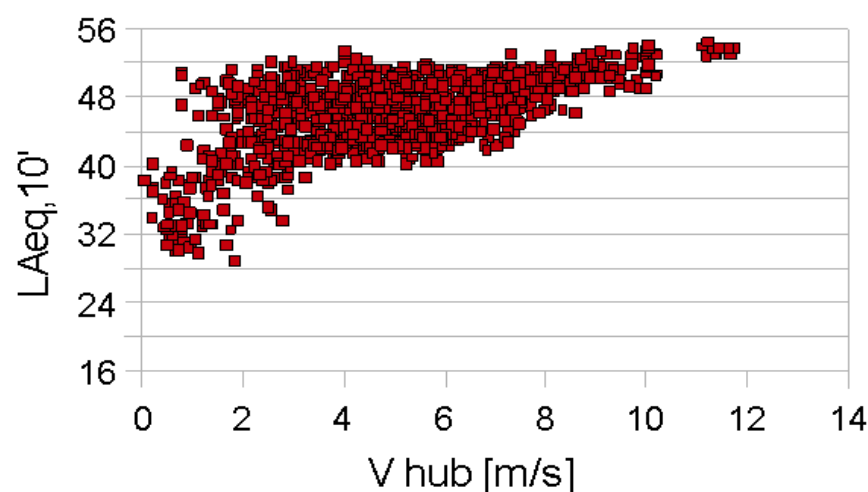
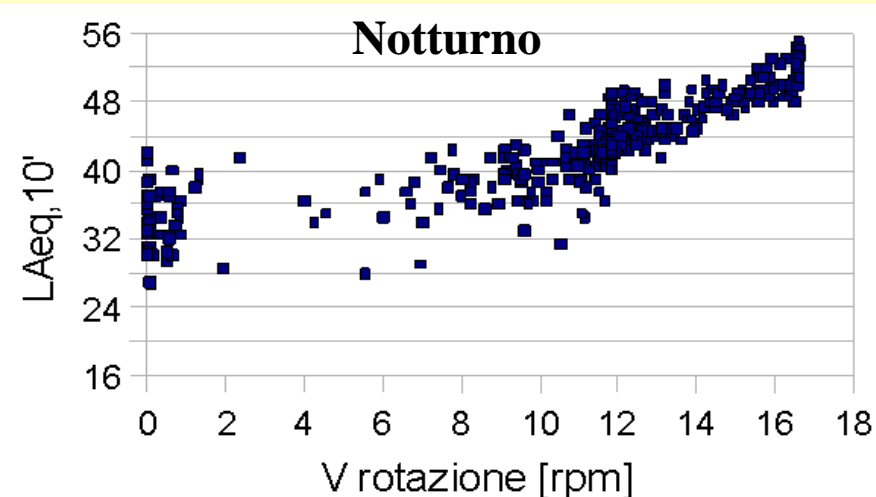
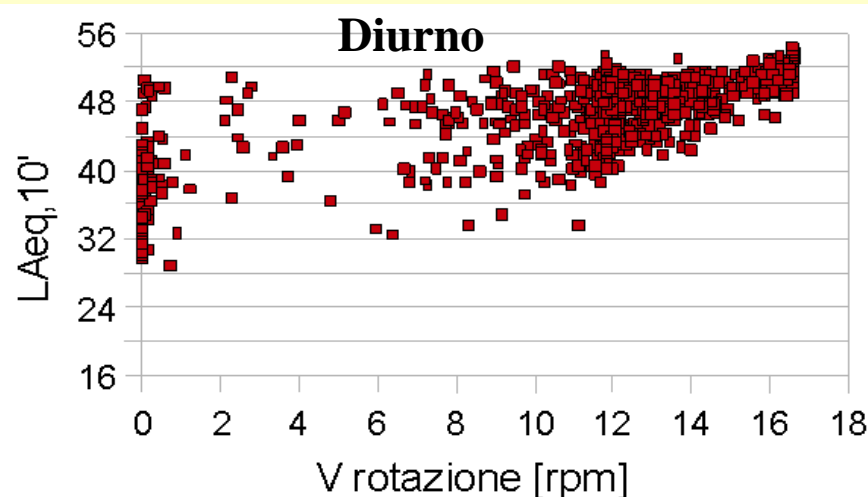
ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Dispersione dei livelli di rumore ambientali diurni e notturni misurati a “La Miniera” in funzione della velocità del vento all'hub e della velocità di rotazione delle pale dell'aerogeneratore più vicino.



ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI STRUMENTALI

Dispersione dei livelli di rumore ambientali diurni e notturni misurati a “*Poggi Altì*” in funzione della velocità del vento all'hub e della velocità di rotazione delle pale dell'aerogeneratore più vicino.



Per impianti multi-aerogeneratore sono molto probabili periodi con velocità di rotazione delle pale differenti per i vari aerogeneratori (N_i) (per intervento del gestore o per fluttuazioni di vento).

I dati corrispondenti a 0 rpm (pale ferme) sono quelli con maggiore dispersione e dove ad un valore di rumore alto corrisponde:

- un elevato valore di rumore residuo (elevato vento a terra), oppure
- un simultaneo valore alto di rotazione delle pale di un aerogeneratore vicino.

➔ Necessario mettere a punto un indicatore che tenga conto della velocità di rotazione di tutti gli aerogeneratori influenti sul sito di misura.

➔ La proposta è di associare ad ogni aerogeneratore una velocità di rotazione virtuale ($N_{eq,i}$) uguale alla velocità di rotazione che, a parità di rumore misurato al ricettore, avrebbe l'aerogeneratore i -esimo se si trovasse nella stessa posizione dell'aerogeneratore più vicino.

➔ In altre parole, è come riposizionare virtualmente tutti gli aerogeneratori nella posizione dell'aerogeneratore più vicino.

Per definire $N_{eq,i}$ è necessario considerare:

- ✓ la variazione dell'emissione sonora degli aerogeneratori in funzione della velocità di rotazione;
- ✓ l'influenza dei vari fattori di attenuazione che intervengono nella propagazione del rumore dalla sorgente al ricettore (attenuazione geometrica, assorbimento dell'aria, effetto suolo, direzione del vento, gradiente termico).

Ricordando che $W \propto N^5 \rightarrow$ si definiscono:

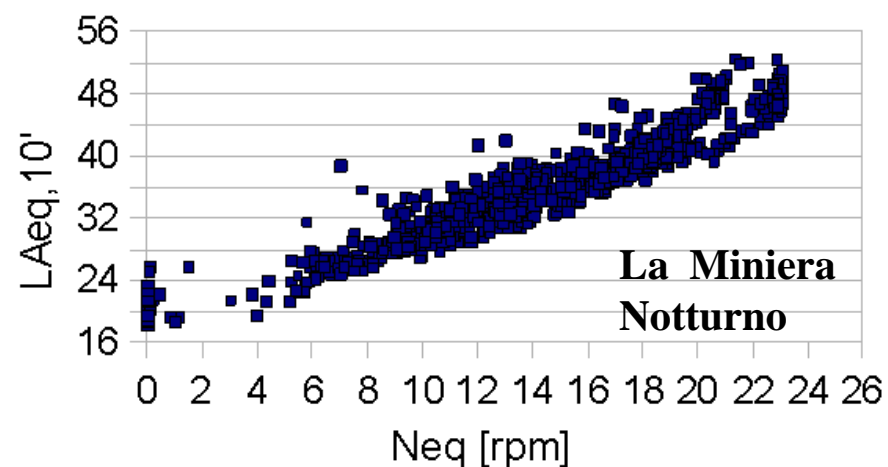
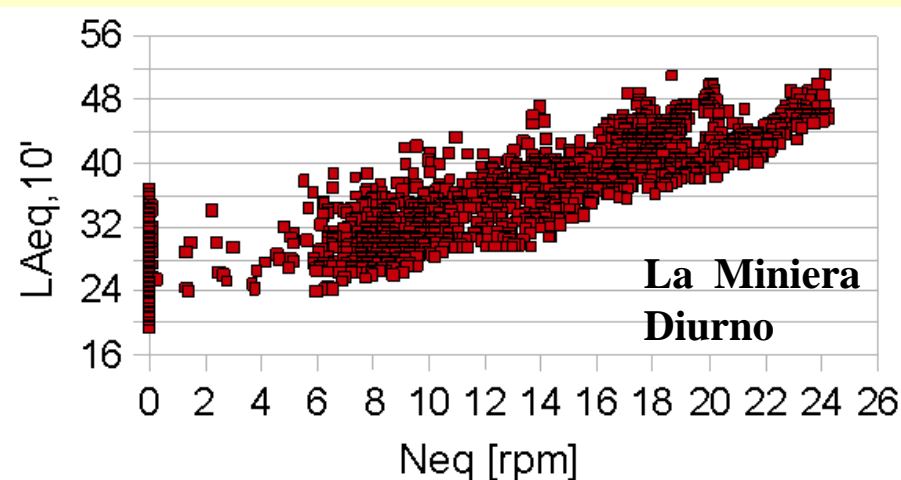
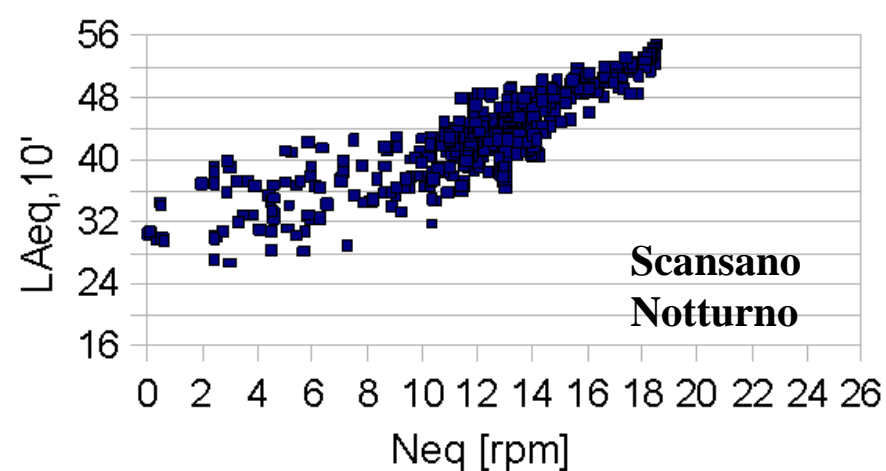
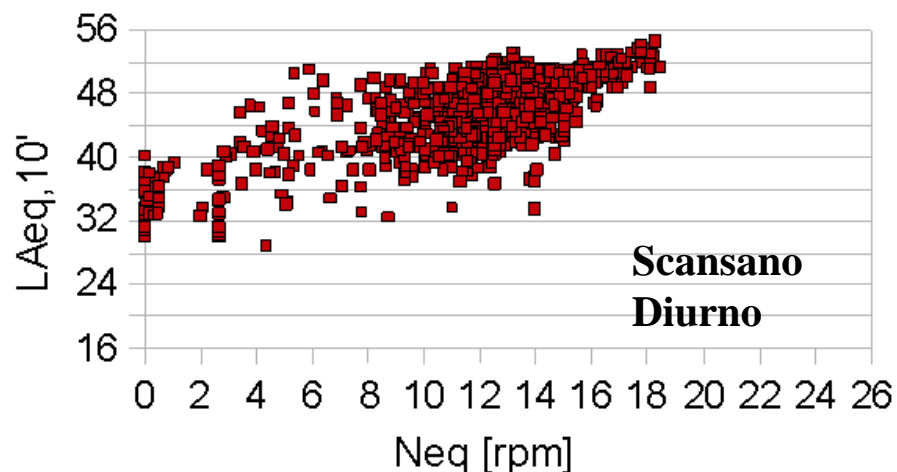
$$N_{eq,i} = N_i \left(\frac{d_1}{d_i} \right)^{\frac{2}{5}} K_i C_i$$

$$N_{eq,tot} = 5 \sqrt{\sum (N_{eq,i})^5}$$

Dove K_i e C_i sono coefficienti che tengono conto, con approssimazione scelta, dell'assorbimento atmosferico, dell'effetto suolo e degli effetti meteo (*wind-shear* e *gradiente di temperatura*);

d_1 è la distanza tra il ricettore e l'aerogeneratore più vicino mentre d_i (con $i \neq 1$) è la distanza tra il ricettore e l'aerogeneratore i -esimo.

Dispersione dei livelli di rumore misurati a Scansano e La Miniera in funzione di $N_{eq,TOT}$ suddivisi tra periodo diurno e notturno.



La dispersione dei livelli di rumore ambientale in funzione del $N_{eq,tot}$ conserva l'andamento monotono crescente e, soprattutto, una limitata dispersione dei dati anche alle basse velocità di rotazione.

Si nota una più uniforme distribuzione di dati nell'intervallo $N_{eq,tot} > 6$ rpm, cioè quando vi è effettiva emissione di rumore.

L'utilizzo del parametro $N_{eq,tot}$ si rivela utile anche per il calcolo dei livelli di rumore residuo in funzione della velocità del vento al suolo.

Con lunghe campagne di misura (almeno 2 settimane) è possibile individuare i periodi in cui i singoli aerogeneratori o tutti insieme hanno velocità di rotazione bassa o nulla da non comportare aumento di rumorosità al ricettore.

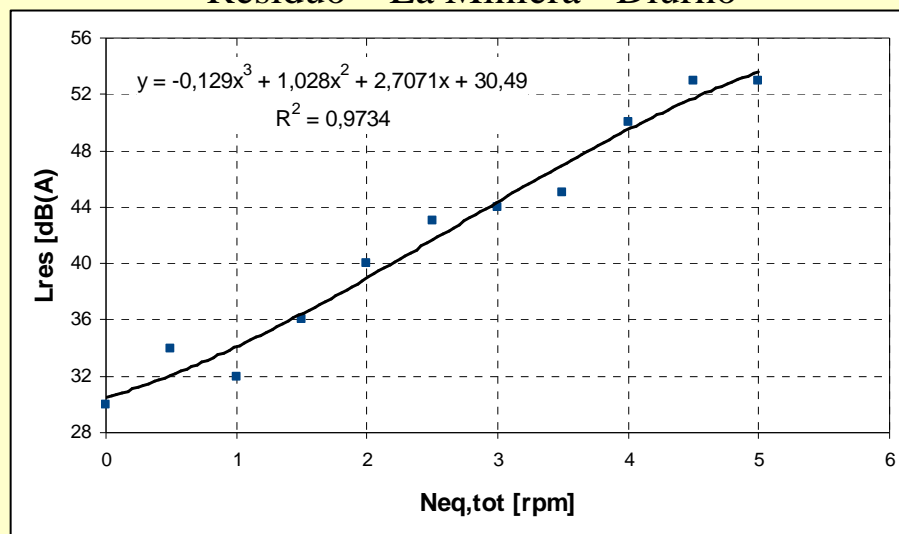
Questi periodi possono essere utilizzati per calcolare il livello di rumore residuo senza richiedere al gestore periodi di interruzione dell'impianto.

I periodi di fermo impianto sono scarsamente dipendenti dal vento a terra → è possibile ricavare una banca dati iniziale di residuo minimi del sito raggruppando i livelli di rumore misurati in corrispondenza di questi periodi.

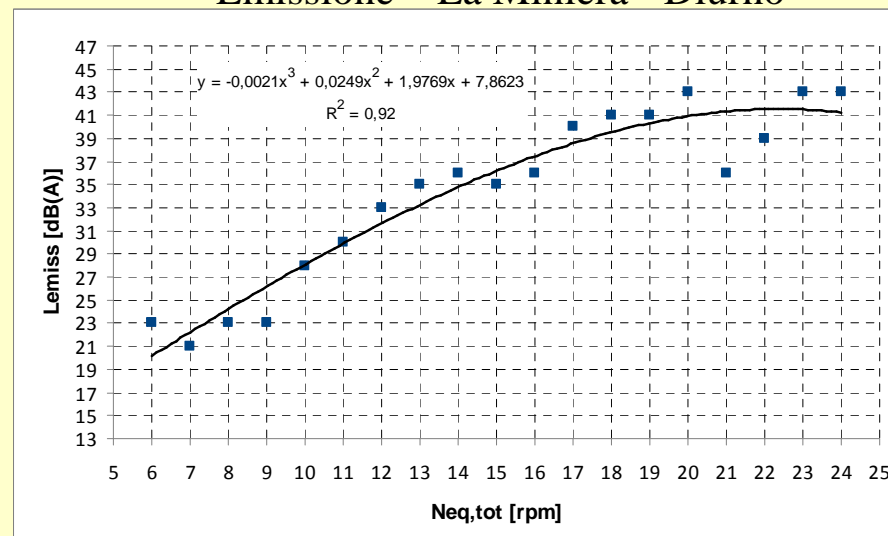
Considerando i dati relativi ai periodi con gli aerogeneratori attivi, è possibile individuare quelli con velocità del vento a terra corrispondenti ai livelli di rumore residuo prima valutati.

Mediante opportune procedure iterative di sottrazione energetica dei livelli di rumore tra dati appartenenti a gruppi con velocità del vento a terra e velocità di rotazione specifiche, è possibile ricostruire gli andamenti dei livelli di rumore residuo e di emissione in funzione, rispettivamente, della velocità del vento a terra e del $N_{eq,tot}$.

Residuo – La Miniera - Diurno



Emissione – La Miniera - Diurno



L'analisi dei dati di letteratura e dei risultati delle misure eseguite, hanno portato ad individuare i parametri idonei alla valutazione dell'impatto acustico ai sensi di legge di un impianto eolico in esercizio.

In particolare, si è visto che i livelli di rumore sono adeguatamente descritti dal parametro $L_{Aeq,10m}$ da acquisire su intervalli successivi con misurazioni a lungo termine di almeno 2 settimane.

Per la verifica dei limiti di legge, devono essere determinate le componenti residua ed emissiva dei livelli di rumore → si devono ricavare gli andamenti di in funzione della velocità del vento a terra (residuo) e di un parametro legato alla rotazione delle pale (emissione).

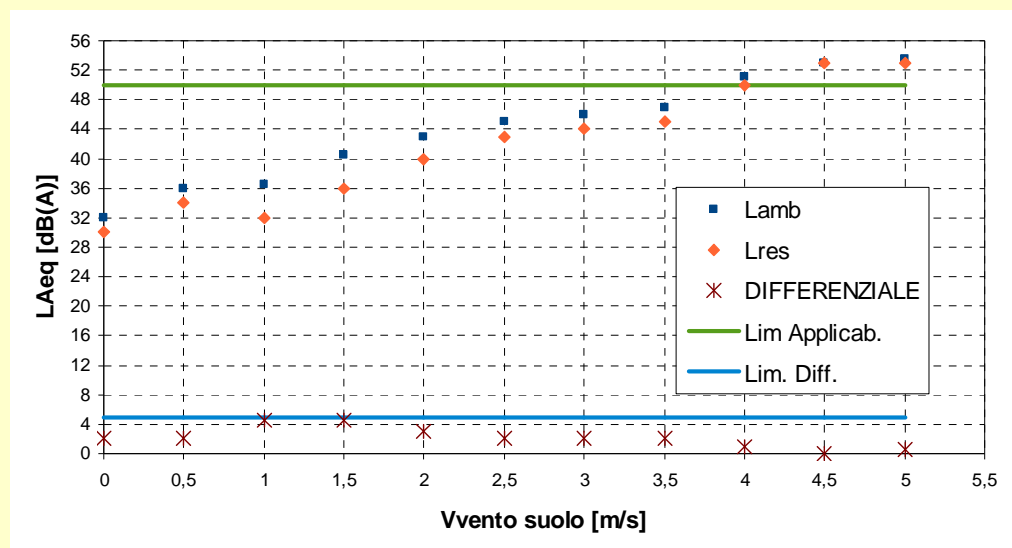
Il parametro proposto è il $N_{eq,tot}$, velocità di rotazione equivalente, che è risultato idoneo nel caso di più aerogeneratori e a risolvere la poca attendibilità della misura di velocità del vento in quota.

Per estrarre gli andamenti dalla banca dati che si ottiene con le misure è necessaria una procedura specifica per isolare i due contributi ricercati con grado di incertezza tale da consentire una verifica adeguata dei limiti di legge.

In parallelo all'implementazione della procedura è stata eseguita, con metodi analitici, una stima delle incertezze associate ai risultati finali.

Visto il numero di operazioni previste dalla procedura si ritiene opportuno eseguire l'analisi delle incertezze anche mediante procedure basate sul metodo Monte Carlo.

Lo scopo finale è anche quello di rendere possibile la verifica del rispetto dei limiti normativi attualmente in vigore (compreso il limite differenziale).



Ulteriori sviluppi sono necessari per la definizione di un quadro di limiti normativi specifici per tali impianti.