

Pale eoliche e rumore: esperienza di ARPACAL nella caratterizzazione degli aerogeneratori più diffusi

Capone P.P., Procopio S., Ferro S.

ARPACal, Via Lungomare snc – Loc. Mosca 88100 Catanzaro, p.capone@arpacal.it

PREMESSA

La repentina proliferazione nel posizionamento e soprattutto nel funzionamento degli impianti eolici, caratterizzati da taglie di produzione di energia elettrica a volte imponente, che si è avuto su tutto il territorio regionale calabrese, ha determinato una pressione ambientale articolata in cui l'agente fisico inquinante rumore generato dagli aerogeneratori percepito dai possibili ricettori assume una dimensione importante.

Gli impianti installati si differenziano per potenza e tipologia di generatore impiegato, passando dai 100-800 kW (mini eolico) a taglie di 2,5 fino a 2,8 MW.

Il presente studio vuole mettere a confronto, dal punto di vista dell'impatto acustico, queste diverse tipologie di aerogeneratori che, per numero di installazioni sul territorio regionale, risultano essere dell'ordine delle diverse centinaia.

Le numerosissime campagne di misura svolte da ARPACAL, in tutta la Regione Calabria, hanno dato delle indicazioni particolari dal punto di vista acustico, a volte anche sorprendenti, in quanto il rumore percepito e misurato sperimentalmente, presso i ricettori ritenuti più sensibili, è risultato essere inferiore per i generatori eolici di taglia più grande rispetto a quelli più piccoli.

Sperimentalmente è stata posta in essere una nuova e specifica metodologia per il calcolo del "Rumore Residuo" effettuando una discretizzazione tra rumore residuo a macchina ferma e rumore residuo a macchina spenta.

Infatti, per come verrà dettagliato nei successivi paragrafi, la differenza tra macchina ferma e spenta è racchiusa essenzialmente nella necessità di effettuare le misure del rumore residuo senza alcun contributo acustico indotto dalle pale eoliche che, per loro stessa natura, possono immettere rumore nell'ambiente per la presenza di apparati tecnologici (come ad es. l'impianto di raffreddamento), anche quando sono ferme, con contributi di rumore assolutamente non trascurabili.

Questa differenziazione per il calcolo rumore residuo pertanto, risulta essere essenziale ai fini della corretta applicazione della legge 447/95, in quanto vengono rilasciate particolari indicazioni sul rumore percepito in funzione della taglia del generatore eolico.

Inoltre, in un'ottica di razionalizzazione delle risorse suolo e paesaggio, le valutazioni sul rumore prodotto per differenza di taglia, alla luce anche delle particolari implicazioni derivanti da un minor posizionamento di aerogeneratori ma di taglia via-via più grande, potrebbe essere un valido discriminante per ciò che riguarda l'iter autorizzativo delle nuove "wind farm", detreminando anche per il revamping tecnologico, il posizionamento di un numero minore di torri eoliche, con aerogeneratori più potenti.

Si evince dai risultati acquisiti che il livello acustico percepito e misurato sperimentalmente è minore per gli impianti di potenza più grande, ciò equivale ad ipotizzare che gli aerogeneratori di piccola potenza hanno un impatto acustico più importante.

Lo studio, oltre ad illustrare le esperienze di ARPACal di caratterizzazione delle diverse tipologie di torri eoliche più diffuse, propone una nuova e specifica metodologia per il calcolo del "Rumore Residuo" attraverso una differente definizione del rumore residuo *a macchina ferma* e da quello *a macchina spenta*. La nuova definizione di *Rumore Residuo* è essenziale ai fini di una più corretta applicazione della legge n.447/95, fornendo particolari sul rumore percepito in funzione della taglia del generatore eolico. Da ciò si possono cogliere validi elementi di adeguamento normativo, determinato dalle osservazioni sperimentali, considerando che attualmente la norma vigente è inadeguata a valutare correttamente questa tipologia di sorgenti.

LA DIFFUSIONE DEGLI AEROGENERATORI IN CALABRIA

La particolare conformazione orografica della Regione Calabria, ha determinato, nel corso

dell'ultimo decennio, un rapida diffusione di impianti eolici che hanno trovato collocazione essenzialmente in tre zone di territorio ben distinte ossia: l'area del Marchesato in provincia di Crotone, l'intero territorio dell'istmo dei Due Mari in provincia di Catanzaro e l'area dello Stretto in provincia di Reggio Calabria.

La presenza di venti costanti, durante tutto l'anno, hanno però di fatto condizionato l'installazione di grandi generatori eolici, quasi esclusivamente nell'area dei Due Mari e del Marchesato, mentre nell'area dello Stretto, il posizionamento ha riguardato macchine di taglia più piccola.

Queste aree geografiche sono accomunate da una particolare conformazione in cui, ampi altopiani si alternano a vallate o dirupi estremamente scoscesi.

Ciò ha determinato una minore densità abitativa di queste aree nelle quali è stato possibile allocare gli impianti eolici, in quanto insistono esclusivamente insediamenti di tipo rurale.

Ma, per come accennato, pur trattandosi di aree scarsamente abitate, la presenza delle pale eoliche ha innescato numerosi contenziosi tra i ricettori ed i gestori degli impianti, in riferimento al presunto rumore molesto percepito e proveniente dagli impianti eolici.

Nelle successive figure 1 e 2 sono riportati due esempi di grandi parchi eolici posti rispettivamente nel comune di Maida (CZ) e nel Comune di Isola Capo Rizzuto (KR) nei quali sono operanti aerogeneratori da 2,8 MW.

Figura 1 – l'area dei Due Mari



Parco eolico in agro del Comune di Maida (CZ)

Figura 2 - l'area del Marchesato



Parco eolico in agro di Isola Capo Rizzuto (KR)

L'ATTIVITA' DI MONITORAGGIO E CARATTERIZZAZIONE DEL RUMORE EOLICO

L'attività di monitoraggio svolta dalla Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Calabria (ARPACAL) per il controllo dell'inquinamento acustico generato dalle torri eoliche è inquadrabile sia con le normali attività di verifica post-autorizzativa che su richiesta dell'autorità giudiziaria.

Al fine quindi di determinare i livelli di immissione ed emissione oltre a quelli differenziali generate dalle sorgenti rumorose, a partire nel periodo 2010 - 2016 sono state realizzate diverse campagne di misura finalizzate alla messa a punto di una procedura di misura e ad una metodica di calcolo estremamente versatile, capace di rappresentare nel modo più fedele possibile l'impatto acustico delle torri eoliche.

Partendo dall'analisi dei riferimenti normativi che regolano l'inquinamento acustico, appare subito evidente come questi, rispetto alla problematica del rumore generato dalle pale eoliche, risultano essere alquanto deficitarie, poiché incomplete. Dall'esperienza accumulata su decine di monitoraggi, anche a lungo termine, sulle diverse tipologie di aerogeneratori, si è notato come, l'impatto acustico prodotto da ogni singola macchina (e più in generale quello generato da un intero parco eolico) non può essere valutato parimenti ad una qualsiasi attività economica o commerciale, per le quali la definizione del rumore ambientale o residuo è ben codificata.

Un aerogeneratore, indipendentemente dalla sua potenza nominale, trasforma l'energia

meccanica generata dalla spinta del vento in energia elettrica. Tale trasformazione avviene grazie alla rotazione delle pale che, collegate in modo solidale con un generatore elettrico riescono a produrre energia elettrica.

L'azione del vento quindi rappresenta la componente fondamentale per la generazione dell'energia elettrica in quanto a seconda della sua intensità e direzione si ha una correlazione strettamente proporzionale con la produzione di energia elettrica. Pertanto quanto maggiore è l'intensità del vento tanto maggiore sarà la rotazione delle pale e quindi la produzione di energia elettrica.

La rotazione delle pale per motivi di sicurezza è posta in un range variabile di velocità angolare, strettamente legata alla velocità del vento; quando la intensità del vento supera una soglia le pale si pongono in "rotazione libera" senza collegamento con il rotore del generatore elettrico. La rotazione minima per la generazione di energia elettrica è legata al momento inerziale delle pale che pur mettendosi in moto con velocità del vento molto modeste, non riescono a trasmettere lavoro utile al generatore per produrre energia elettrica.

Da questa breve disamina del funzionamento della pala eolica si può dedurre che:

- la velocità di rotazione della pala dipende dalla velocità e direzione del vento; la pala si mette in moto anche con valori molto bassi della velocità del vento, autoposizionandosi rispetto alla direzione migliore;
- la produzione di energia elettrica dipende dall'intensità del vento. La produzione di energia elettrica è limitata ad un range di velocità ben definito tra una minima che rappresenta il punto in cui il generatore entra in produzione e una massima che rappresenta la velocità sopportabile dall'aerogeneratore prima che venga posto in stallo;
- le possibili fonti di rumore provenienti dalla pala eolica sono diverse.

L'ultimo punto in particolare merita qualche considerazione in quanto la rotazione della pala ed il funzionamento della stessa generano sostanzialmente due tipologie di rumore ben definite:

- a) un rumore di tipo *diretto*;
- b) un rumore di tipo *indiretto* rispetto all'intensità e direzione del vento.

Con l'espressione di rumore diretto si indicano i contributi rumorosi riconducibili alla rotazione della pala eolica e quindi direttamente legate all'azione del vento, mentre con l'espressione di rumore indiretto si indicano quei contributi non strettamente dipendenti dall'azione del vento ma legati al funzionamento della pala eolica stessa.

Alla prima categoria si possono accorpare:

il rumore generato dal movimento delle pale nel fendere il vento; il rumore degli organi meccanici posti in rotazione; il rumore generato dall'effetto vela sulla torre di sostegno e sulla navicella.

Alla seconda categoria appartengono:

il rumore generato dal sistema di raffreddamento del generatore elettrico; il rumore legato agli organi di posizionamento della navicella e delle pale; il rumore generato dagli apparati elettrici ed elettronici posti per il corretto funzionamento della pala; il rumore generato dai dispositivi elettrici quali trasformatore, inverter, ecc. necessari per la corretta utilizzazione dell'energia elettrica prodotta per una efficace immissione nella rete elettrica.

In particolare l'azione del vento, che caratterizza il rumore della prima categoria, determina una proporzionalità diretta tra la spinta sulle pale e rumore poiché più le pale girano ed in linea di principio più il rumore ambientale aumenta; per la seconda categoria il rumore che si genera è indipendente dal vento ed il contributo delle componenti sopra indicate al rumore ambientale è di tipo continuo. Essendo quindi, il rumore ambientale generato dalle pale eoliche di tipo misto ossia discontinuo in un caso e continuo nell'altro, vedremo nel proseguo di questa trattazione come le due componenti si integrino e come si possa valutare il rumore residuo per l'applicabilità del criterio differenziale anche in considerazione che il funzionamento delle pale, salvo malfunzionamenti appare continuativo in un periodo di 24 ore.

Le tipologie di impianti monitorati sono caratterizzati nella seguente tabella 1.

Tabella 1 – tipologie di aerogeneratori esaminati

N°	Tipologia	Altezza centro rotore[m]	Raggio della Pala [m]	Punto più alto [m]	Tipologia rotazione	Potenza nominale [MW]
1	Tripala	100	60	160	Antiorario	2,8
2	Tripala	85	45	130	Antiorario	2,5
3	Tripala	60	40	100	Antiorario	1,2
4	Tripala	60	35	95	Antiorario	0,8

Per ognuna delle pale esaminate si è cercato di normalizzare le metodologie di misura non soltanto dal punto di vista della tecnica di misura ma anche per le condizioni meteorologiche, attraverso le misurazioni in periodi comparabili con le medesime condizioni di vento, di temperatura, precipitazioni atmosferiche. A tal fine durante tutte le campagne di misura si è utilizzata un'apposita centralina meteo in grado di effettuare misurazioni e registrazioni di tutti i parametri su un lungo periodo, correlando questi dati con quelli misurati e registrati dagli apparati di bordo degli aerogeneratori.

Il parametro di riferimento stabilito dalle norme ed acquisito durante le misurazioni è il Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato «A» [Leq (A)].

Al fine di definire la variabilità temporale nella diffusione del rumore, la durata dei rilievi è stata inizialmente posta a 15 minuti e successivamente a periodi di 10 e 5 minuti, ritenuti comunque sufficienti in funzione del contesto ambientale di misura, per la registrazione del fenomeno rumoroso e per limitare possibili disturbi accidentali.

Per una corretta effettuazione dei rilievi fonometrici si è provveduto a misurare sia LA (rumore Ambientale) che LR (Rumore residuo) in funzione della sorgente disturbante. In particolare per il calcolo del rumore residuo, per isolare completamente la pala eolica dal contesto ambientale è stato necessario non soltanto fermare la pala eolica (calcolo del Rumore Residuo a pala ferma) ma spegnere tutti i dispositivi elettrici ed elettronici, compreso l'impianto di raffreddamento, presenti nella pala eolica (calcolo del Rumore Residuo a pala spenta).

Il calcolo del LA è stato eseguito considerando la pala in movimento e con tutti i dispositivi tecnici ad essa collegati, in funzione. Per questa valutazione quindi, si è considerato l'intero contributo della pala eolica nel contesto territoriale ed all'interno delle abitazioni dei ricettori.

Si è cercato inoltre, di capire quale correlazione si instauri tra il rumore generato dalla pala eolica e la velocità del vento. Al fine quindi, per valutare meglio questo aspetto per le misure fonometriche, si è utilizzata la cuffia antivento. Questo dispositivo, posizionato a protezione del microfono del fonometro, serve a limitare proprio il contributo dovuto alla pressione esercitata dal vento quando colpisce direttamente il microfono stesso, per evitare la registrazione dell' "effetto soffio" che va ad innalzare impropriamente il livello di rumore misurato.

RISULTATI E CONCLUSIONI

Soffermandoci sulla tipologia di rumore misurato sia di tipo ambientale (LA) che residuo (LR), si è notato che per distanze sempre più crescenti a partire dall'aerogeneratore, a prescindere dalla taglia di produzione di energia elettrica, il rumore segue il decadimento tipico delle sorgenti approssimate sferiche. Bisogna considerare il posizionamento del rotore rispetto al ricettore, poiché un posizionamento ortogonale genera delle variazioni nelle percezioni rispetto ad un orientamento parallelo. Il risultato per un certo verso più sorprendente è stato quello di aver notato come le dimensioni maggiori di un generatore eolico, a parità di tipologia di forma aerodinamica della pala, determinano complessivamente una diffusione di rumore nell'ambiente minore rispetto a pale di taglia inferiore.

Altra considerazione degna di nota è che quanto più una pala ha un profilo alare performante, tanto migliore sarà l'azione nel fendere il vento. Nel calcolo del rumore ambientale il così detto "Whoosh" ciclico, legato al Wind Shear ossia, alle azioni che il vento produce sul rumore prodotto

dalle pale poste in rotazione, per pale molto grandi associate a generatori fino a 3 MW appare del tutto trascurabile se paragonato a quanto avviene su pale di dimensioni notevolmente ridotte. Lo stesso ragionamento vale per il calcolo del rumore residuo a pala spenta in quanto le maggiori dimensioni della navicella e una maggiore distanza dai possibili ricettori, di fatto diminuiscono la percezione del rumore dovuto al contributo delle componenti elettromeccaniche che costituiscono la navicella eolica.

Così come abbondantemente trattato in bibliografia è certamente vero che più spira il vento e più le pale tendono ad aumentare la velocità di rotazione fendendo di conseguenza l'aria con un periodicità maggiore, aumentando in linea di principio il rumore complessivo generato, è pur vero che l'aumentare del vento fa innalzare il livello del rumore di fondo in quanto si aumenta ad esempio il movimento delle fronde degli alberi o dell'erba variando il livello del rumore ambientale.

Paradossalmente i dati del vento in quota e del vento al suolo possono essere sensibilmente diversi e ciò, nei casi più particolari, può determinare la percezione che le pale eoliche girino anche in "assenza di vento", dando la sensazione di maggiore rumorosità in quanto manca il contributo al rumore ambientale del vento ad altezza suolo (come ad esempio l'azionamento delle pale per correnti termiche).

E proprio in queste situazioni limite che trascurare il contributo delle componenti attive delle pale eoliche, per come enunciato in precedenza, determina una sottostima del rumore ambientale con errori decisamente non trascurabili (dell'ordine di diversi dB).

Nella seguente tabella 2, a titolo esemplificativo, viene proposto un confronto tra due diverse pale eoliche, dettagliate in precedenza, nelle quali si evidenziano le differenze sostanziali nel calcolo del Rumore Residuo, proprio durante l'assenza di vento ad altezza suolo. Tali valori sono approssimati a 0,5 dB. La distanza indicata in tabella si riferisce alla distanza lineare dalla base della torre di sostegno, rispetto al punto di misura (fonometro posizionato ad 1,5 m dal suolo e con microfono rivolto verso la torre anemometrica).

Per tale confronto si è cercato di uniformare la metodologia di misura scegliendo siti comunque comparabili tra loro per tipologia di torri di sostegno (in entrambi i casi tubolari), territorio, vegetazione, posizionamento delle pale rispetto al ricettore, periodo e tempo di misura.

Tabella 2 – confronto nella metodologia di calcolo del rumore residuo per due pale eoliche di taglia diversa

Punto di misura	Taglia da 2,8 MW			Taglia da 1,2 MW		
	Rumore Residuo pala ferma RRPF	Rumore Residuo pala spenta RRPS	Differenza	Rumore Residuo pala ferma RRPF	Rumore Residuo pala spenta RRPS	Differenza
150 m	42,00	35,00	7 ± ε	45,00	36,00	9 ± ε
300 m	38,00	35,00	3 ± ε	40,00	36,00	4 ± ε
450m	35,00	35,00	-- ± ε	37,00	36,00	1 ± ε

Per i valori indicati in tabella, sia per la tipologia 1 che 2, è stato valutato l'errore relativo alla misura, ε. Questo si riferisce in particolare alle misure RRPS, dove il valore indicato risulta essere, rispetto al valore di RRPF, maggiormente influenzato da altri fattori esterni come ad es. eventi occasionali o come la maggiore o minore distanza del fonometro da altre sorgenti rumorose (ad es. le restanti pale eoliche costituenti il parco eolico). Sperimentalmente si è trovato che ε, abbia un peso direttamente proporzionale alla distanza in cui vengono effettuate le misure, ma che comunque tale valore non è da considerare nel calcolo del LR in quanto va ricondotto esclusivamente nel calcolo del Rumore LA, o eventualmente al calcolo del limite di emissione, se riferito alla singola pala eolica o ai limiti di immissione se riferiti all'intero parco eolico.

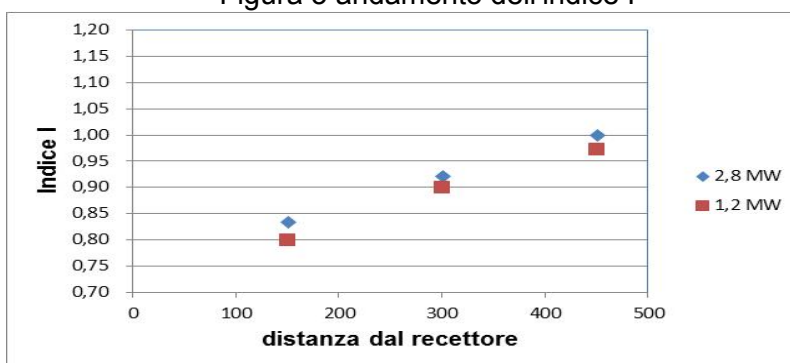
Se si definisce un indice I come rapporto tra il rumore residuo a pala spenta (RRPS) e a pala ferma (RRPF) come nella relazione esplicitata nella seguente relazione:

$$I = \frac{RRPS}{RRPF}$$

si può intuire come questo possa dare importanti informazioni sul diverso approccio nella modalità di calcolo del LR.

La successiva figura 5, infatti, dimostra come sia immediata la differenza tra il rumore residuo a pala spenta e quello a pala ferma. Soltanto a 450 m dal recettore e per un impianto con aerogeneratori di potenza pari a 2,8MW, l'indice $I=1$ quindi la definizione tra rumori residuo si equivale. In tutti gli altri casi l'indice I è inferiore ad 1, a testimonianza che il rumore residuo a pala spenta è inferiore a quello a pala ferma.

Figura 3 andamento dell'indice I



Confronto dell'indice I in due aerogeneratori di diversa taglia

In questa trattazione si è omesso il calcolo del valore del LA, soffermandoci esclusivamente sul livello del LR. Ciò in quanto sia LA che LR dipendono comunque dall'intensità e dalla direzione del vento. Dai risultati della tabella 2 è evidente che l'eventuale definizione dei limiti differenziali sia in orario diurno che soprattutto in orario notturno, a prescindere dalla correlazione vento/rumore della pala, non ci si può esimere nel considerare in modo preciso il calcolo del LR per non commettere errori di sottostima.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.P.C.M. 01.03.1991, *Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*.
- [2] Legge 26.10.1995, n. 447, *Legge Quadro sull'inquinamento acustico*.
- [3] D.P.C.M. 14.11.1997 Decreto Attuativo Legge Quadro, *Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*.
- [4] D.M. 16.03.1998, *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*.
- [5] Legge Regionale 19 ottobre 2009, n. 34 - Regione Calabria, *Norme in materia di inquinamento acustico per la tutela dell'ambiente nella Regione Calabria* (BUR n. 19 del 16 ottobre 2009, suppl. straordinario n. 4 del 26 ottobre 2009).
- [6] ISPRA, *Linee Guida per la valutazione e il monitoraggio dell'impatto acustico degli impianti eolici*, Delibera del Consiglio federale – seduta del 20 ottobre 2012
- [7] ABB, *Quaderni di applicazione tecnica- n°13 impianti eolici ed. 2011*
- [8] Deliberazione della Giunta Regionale della Calabria del 30 gennaio 2006 n°55- allegato A – *Indirizzi per l'inserimento degli impianti eolici sul territorio regionale*