

REGIONE SICILIA
PROVINCIA DI AGRIGENTO
COMUNI DI ARAGONA
E JOPPOLO GIANCAXIO

Oggetto:

PROGETTO DEFINITIVO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN IMPIANTO EOLICO NEI
COMUNI DI ARAGONA E JOPPOLO GIANCAXIO COSTITUITO DA 6 AEROGENERATORI DI
POTENZA TOTALE PARI A 43.2 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE

Sezione:

SEZIONE VB - VIBRAZIONI

Elaborato:

STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO E DI
CANTIERE

Nome file stampa:

EO.ARG01.PD.VB.01

Codifica regionale:

RS06REL0022A0

Scala:

Formato di stampa:

Nome elaborato:

EO.ARG01.PD.VB.01.pdf

Tipologia:

R

A4

Proponente:

E-WAY GAMMA S.r.l.

Piazza di San Lorenzo in Lucina, 4
00186 ROMA (RM)
P.IVA. 17171361003



E-WAY GAMMA S.R.L.
Piazza San Lorenzo in Lucina, 4
00186 - Roma
C.F./P. Iva 17171361003

Progettista:

E-WAY GAMMA S.r.l.

Piazza di San Lorenzo in Lucina, 4
00186 ROMA (RM)
P.IVA. 17171361003



CODICE	REV. n.	DATA REV.	REDAZIONE	VERIFICA	VALIDAZIONE
EO.ARG01.PD.A.10	00	10/2023	F. Vegetale	A. Bottone	A. Bottone

E-WAY GAMMA S.r.l.

Sede legale
Piazza di San Lorenzo in Lucina, 4
00186 ROMA (RM)
PEC: e-waygamma@legalmail.it tel. +39 0694414500

INDICE

PREMESSA	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE ED UBICAZIONE DELL'IMPIANTO.....	6
2.1 Inquadramento territoriale e catastale	6
2.2 Criteri di progettazione.....	7
2.3 Layout d'impianto	9
2.3.1 Aerogeneratori.....	9
2.4 Scelta dei ricettori	9
3 ANALISI DEI FENOMENI VIBRAZIONALI.....	11
3.1 Definizioni e principi generali (fonte ISPRA)	11
3.2 Applicazioni Normative	13
3.3 Trasmissione e propagazione delle vibrazioni: parametri di riferimento e loro applicazione	15
3.3.1 Modalità operative e tipologie di sorgenti impiegate nelle fasi di cantiere	16
3.3.2 Geologia	16
3.3.3 Ricettori: caratteristiche e fattori strutturali di edifici e fabbricati.....	17
3.4 Scelta e applicazione del modello previsionale	17
3.5 Strutture ed edifici – Rischio del danno	19
3.6 Esposizione umana: rischi e disturbo.....	20
3.7 Vibrazioni relative alle aree di cantiere	21
3.8 Impianti eolici: vibrazioni in fase di esercizio	22
4 STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI	24
4.1 Fase di esercizio	24
4.2 Fase di cantiere	27

CODICE	EO.ARG01.PD.VB.01
REVISIONE n.	00
DATA REVISIONE	10/2023
PAGINA	2 di 30

CONCLUSIONI..... 30

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 – Inquadramento generale degli aerogeneratori di progetto e cavidotto su IGM 1:25.000.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 – Differenti tipologie di onde di volume e superficie.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 – Schematizzazione semplificata della propagazione delle vibrazioni nel sistema terreno-edificio.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 – Esempi di attenuazione/amplificazione dei fenomeni vibratorii/oscillatori nei differenti elementi.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 5 – Decadimento delle vibrazioni in fase preliminare.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 – Caratteristiche vibrazionali misurate per il mezzo di cantiere utilizzato nel modello di simulazione.</i>	<i>28</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 – Caratteristiche e le coordinate degli aerogeneratori di progetto.</i>	<i>6</i>
<i>Tabella 2 – Riferimenti catastali degli aerogeneratori.</i>	<i>7</i>
<i>Tabella 4 – Valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali per differenti litologie [Ungar & Bender (1975)].</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 5 – Sintesi dei valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza in relazione alla destinazione d’uso degli immobili – Rif. UNI 9614 – valutazione del disturbo.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 6 – Dati in input per il calcolo delle vibrazioni indotte da un aerogeneratore in esercizio.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabella 7 – Distanze per il rispetto dei limiti UNI 9614.</i>	<i>25</i>
<i>Tabella 8 – Valori di input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte dal mezzo di cantiere considerato – Escavatore cingolato KOMATSU PC290NCL.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 9 – Risultati in termini di distanza di rispetto dei limiti UNI 9614.</i>	<i>29</i>

PREMESSA

Il presente elaborato è riferito al progetto per la costruzione e l'esercizio di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, ed opere di connessione annesse, denominato "Aragona-Joppolo Giancaxio", sito tra i Comuni di Aragona (AG) e Joppolo Giancaxio (AG).

In particolare, il progetto è relativo ad un impianto eolico di potenza totale pari a 43.2 MW e costituito da:

- n. 6 aerogeneratori di potenza nominale 7.2 MW, di diametro di rotore 162 m e di altezza al mozzo 119 m, assimilabili al tipo Vestas V162;
- n. 1 cabina di raccolta a misura in media tensione a 30 kV;
- linee elettriche in media tensione a 30 kV in cavo interrato necessarie per l'interconnessione degli aerogeneratori alla cabina di raccolta e misura;
- una stazione elettrica di trasformazione 150/30 kV utente;
- linee elettriche in media tensione a 30 kV in cavo interrato necessarie per l'interconnessione della cabina di raccolta e misura e la stazione elettrica di utente;
- una sezione di impianto elettrico comune con altri impianti produttori, necessaria per la condivisione dello stallo in alta tensione a 150 kV, assegnato dal gestore della rete di trasmissione nazionale (RTN) all'interno della stazione elettrica della RTN denominata "FAVARA 220/150 kV";
- tutte le apparecchiature elettromeccaniche in alta tensione di competenza utente da installare all'interno della stazione elettrica della RTN "FAVARA 220/150 kV", in corrispondenza dello stallo assegnato;
- una linea elettrica in alta tensione a 150 kV in cavo interrato per l'interconnessione della sezione di impianto comune e la stazione elettrica della RTN "FAVARA 220/150 kV".

Titolare dell'iniziativa proposta è la società E-WAY GAMMA S.r.l., avente sede legale in Piazza di San Lorenzo in Lucina 4, 00186 Roma, P.IVA 17171361003.

1 INTRODUZIONE

Scopo dell'elaborato in oggetto è analizzare il fenomeno delle vibrazioni fornendo, sulla base delle caratteristiche tecniche degli aerogeneratori di progetto, delle opere civili di fondazione e delle caratteristiche geotecniche dei terreni e di stabilità dei versanti, una stima previsionale dell'impatto su eventuali ricettori potenzialmente interessati dal fenomeno (rif. UNI 9916 – UNI9614).

La valutazione di tipo previsionale è stata effettuata anche in relazione alla fase di cantiere, fornendo oltre ai parametri di emissione dei singoli macchinari impiegati, anche la caratterizzazione della sorgente in termini di modalità, fasi di cantiere e attività.

Nello specifico è stato valutato il contributo in termini di vibrazioni dell'impianto eolico in oggetto sia in relazione alla fase di esercizio, sia in relazione alla fase di cantiere che permette la realizzazione del progetto in questione.

2 DESCRIZIONE ED UBICAZIONE DELL'IMPIANTO

2.1 Inquadramento territoriale e catastale

L'impianto eolico di progetto è situato nei Comuni di Aragona e Joppolo Giancaxio e si costituisce di n. 6 aerogeneratori, denominati rispettivamente da WTG01 a WTG06. Gli aerogeneratori hanno potenza nominale 7.2 MW per una potenza complessiva di 43.2 MW, con altezza al mozzo 119 m e diametro di rotore di 162 m.

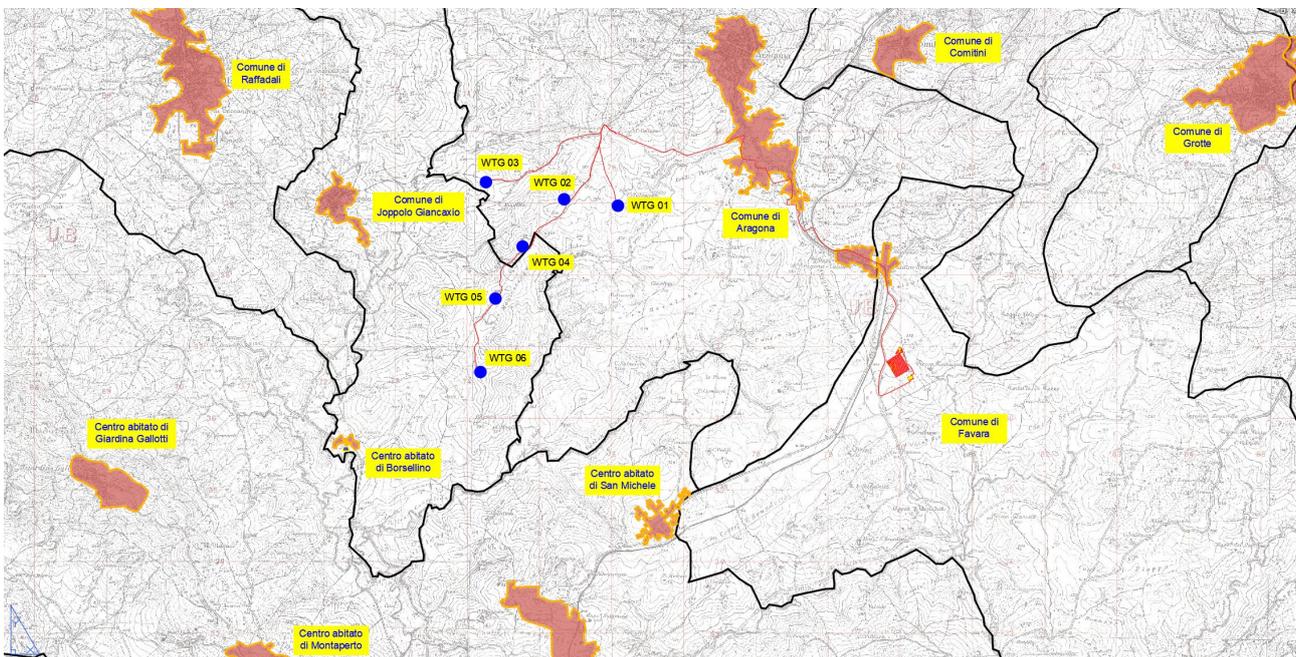


Figura 1 – Inquadramento generale degli aerogeneratori di progetto e cavidotto su IGM 1:25.000.

Si riportano di seguito Tabella 1 le coordinate degli aerogeneratori nei vari sistemi di riferimento.

Tabella 1 – Caratteristiche e le coordinate degli aerogeneratori di progetto.

ID WTG	LONGITUDINE	LATITUDINE	EST	NORD
WTG01	13.600729°	37.387004°	376129	4138724
WTG02	13.591324°	37.388047°	375298	4138852
WTG03	13.579046°	37.390054°	374214	4139091
WTG04	13.584942°	37.382031°	374723	4138193
WTG05	13.580808°	37.375438°	374346	4137467
WTG06	13.578633°	37.366173°	374138	4136442

Per quanto riguarda l'inquadramento su base catastale, le particelle interessate dagli aerogeneratori di progetto sono riportate in Tabella 2:

Tabella 2 – Riferimenti catastali degli aerogeneratori.

ID WTG	IDENTIFICAZIONE CATASTALE
WTG01	ARAGONA (AG) Foglio: 68 Particella: 34
WTG02	ARAGONA (AG) Foglio: 72 Particella: 163
WTG03	ARAGONA (AG) Foglio: 66 Particella: 49
WTG04	ARAGONA (AG) Foglio: 71 Particella: 124
WTG05	JOPPOLO GIANCAXIO (AG) Foglio: 11 Particella: 67
WTG06	JOPPOLO GIANCAXIO (AG) Foglio: 14 Particella: 7

L'elenco completo delle particelle interessate dalle opere e delle relative fasce di asservimento è riportato negli elaborati denominati "EO.ARG01.PD.L.05 PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO ED ASSERVIMENTO GRAFICO CON OPERE DI CONNESSIONE" e "EO.ARG01.PD.L.06 PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO ED ASSERVIMENTO DESCRITTIVO CON OPERE DI CONNESSIONE" allegati al progetto.

2.2 Criteri di progettazione

Il progetto è stato sviluppato studiando la disposizione degli aerogeneratori principalmente in relazione a fattori progettuali quali l'esposizione, i dati anemologici, l'accessibilità del sito e i vincoli vigenti. Sulla base delle elaborazioni effettuate, si sono individuate le posizioni più idonee all'installazione degli aerogeneratori e si è definito il miglior layout possibile al fine di ottenere per ogni aerogeneratore la massima producibilità e, contemporaneamente, ridurre al minimo le perdite di energia per effetto scia e le ripercussioni di carattere ambientale.

La progettazione è avvenuta tenendo conto che:

- le opere provvisorie siano compatibili con il deflusso delle acque, attraverso un opportuno sistema di regimentazione delle acque meteoriche realizzato in corrispondenza del layout e riportato nell'elaborato "EO.ARG01.PD.D.06 REGIMENTAZIONE ACQUE METEORICHE IN FASE DI ESERCIZIO";
- le operazioni di scavo e rinterro per la posa del cavidotto non modificano il libero deflusso delle acque, attraverso una modalità di posa interrata ad almeno 1,20 m di profondità dal piano campagna meglio descritta nell'elaborato "EO.ARG01.PD.H.10 RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE DEGLI IMPIANTI", con risoluzione delle interferenze idrauliche riportate nell'elaborato "EO.ARG01.PD.G.02 RISOLUZIONE TIPOLOGICA DELLE INTERFERENZE";
- il materiale di risulta proveniente dagli scavi, non utilizzato, sia portato nel più breve tempo possibile alle discariche autorizzate che saranno meglio definite in una fase esecutiva della progettazione.

Inoltre, in merito alla fattibilità ambientale del progetto è possibile riscontrare che:

- l'impianto prevede l'installazione di n. 6 aerogeneratori posizionati su seminativi/pascoli tali da non determinare significative alterazioni morfologiche;
- gli aerogeneratori saranno realizzati su terreni privi di copertura arborea da zona boscata, non censiti come colture di pregio, ma terreni di natura agricola che non prevedono disboscamenti;
- il cavidotto MT verrà realizzato in gran parte lungo strade esistenti o al margine di strade di cantiere, lungo le quali attraverserà principalmente seminativi;
- l'occupazione di suolo potrà ritenersi minima poiché le opere provvisorie saranno ripristinate in modo tale da consentire il normale svolgimento delle pratiche agricole;
- gli aerogeneratori di progetto non determineranno alcun impatto sulla salute umana essendo collocati ad una distanza dai ricettori tale da non generare effetti legati agli effetti di shadow-flickering (vedi elaborato EO.ARG01.PD.SF.SIA.01), di rumori (vedi elaborato "EO.ARG01.PD.IA.SIA.01 VALUTAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO ACUSTICO"), di elettromagnetismo (vedi elaborato "EO.ARG01.PD.H.11 RELAZIONE IMPATTO ELETTROMAGNETICO"), né possano arrecare problematiche legate alla rottura degli organi rotanti sulle strade (vedi elaborato "EO.ARG01.PD.A.10 RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA");
- l'impianto è allocato al di fuori di aree protette, siti Rete Natura 2000, aree IBA o di altri ambiti di tutela ambientale;
- l'impianto è totalmente reversibile, infatti, al termine della vita utile la dismissione dell'impianto potrà restituire il territorio allo stato ante-operam, annullando tutti i potenziali impatti;
- l'occupazione di suolo sarà minima e potranno essere adoperate le pratiche agricole fino alla base delle torri, agevolando i conduttori dei fondi con le piste d'impianto;
- l'impianto non andrà a modificare gli equilibri faunistici esistenti andando, eventualmente, ad allontanare la fauna solo durante la fase di cantiere.

I principali riferimenti normativi considerati sono:

- DM 10 settembre 2010 "Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati a fonti rinnovabili";
- D. Lgs. n. 387/2003 e ss.mm.ii. "Attuazione della Direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità".

La disposizione degli aerogeneratori ha tenuto conto, oltre agli aspetti progettuali di carattere generale fornite dalle normative di riferimento, anche delle indicazioni specifiche fornite nell'Allegato 4 del DM 10 settembre 2010 "Impianti eolici: elementi per il corretto inserimento nel paesaggio e sul territorio".

2.3 Layout d'impianto

L'impianto eolico di progetto prevede la realizzazione di:

- n. 6 aerogeneratori;
- n. 6 cabine all'interno della torre di ogni aerogeneratore;
- n. 6 opere di fondazione su plinto per gli aerogeneratori;
- n. 6 piazzole di montaggio, con adiacenti piazzole temporanee di stoccaggio;
- opere temporanee per il montaggio del braccio gru;
- viabilità di progetto interna all'impianto e che conduce agli aerogeneratori;
- un cavidotto interrato interno, in media tensione, per il collegamento tra gli aerogeneratori;
- un cavidotto interrato esterno, in media tensione, per il collegamento del campo eolico alla futura stazione elettrica RTN.

2.3.1 Aerogeneratori

Per gli aerogeneratori di progetto si considera diametro di rotore 162 m e altezza al mozzo 119 m. Tra i modelli di aerogeneratore con le seguenti caratteristiche, si assimilano quelli di progetto al modello Vestas V162, e quindi con diametro 162 m e altezza al mozzo 119 m. Non si esclude, nelle fasi successive della progettazione, la possibilità di variare la tipologia di aerogeneratore, ferme restando le caratteristiche dimensionali indicate nel presente elaborato. Gli aerogeneratori sono connessi tra loro per mezzo del cavidotto interno in MT e le cabine interne alle torri.

2.4 Scelta dei ricettori

Per poter effettuare le valutazioni previsionali degli impatti indotti dall'impianto eolico di progetto, sono stati individuati i ricettori (considerando un'analisi ricettori condotta a 1500 m dagli aerogeneratori di progetto) nei confronti dei quali sono state condotte le analisi specialistiche. Per quanto riguarda i criteri di classificazione, la discriminante principale per la scelta dell'individuazione dei ricettori è legata alla categoria catastale e allo stato d'utilizzo e conservazione delle strutture. A tal proposito a sensi del DPCM 14/11/97 e della legge quadro n. 447/1995, gli ambienti abitativi sono definiti come: *"ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o di comunità ed utilizzato per le diverse attività umane, fatta*

CODICE	EO.ARG01.PD.VB.01
REVISIONE n.	00
DATA REVISIONE	10/2023
PAGINA	10 di 30

eccezione per gli ambienti destinati ad attività produttive per i quali resta ferma la disciplina di cui al d.lgs. 15 agosto 1991, n. 277 (2), salvo per quanto concerne l'immissione di rumore da sorgenti sonore esterne ai locali in cui si svolgono le attività produttive".

3 ANALISI DEI FENOMENI VIBRAZIONALI

3.1 Definizioni e principi generali (fonte ISPRA)

Le vibrazioni sono rappresentate da oscillazioni di tipo meccanico generate da onde di pressione che si propagano attraverso i corpi. La vibrazione è quindi definita come quel fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido, liquido o gassoso. Una vibrazione rappresenta una celere fluttuazione intorno ad una posizione di equilibrio, il movimento netto dell'elemento posto in vibrazione è quindi nullo.

Oltre alla vibrazione è utile definire l'oscillazione, ossia il movimento che un punto mobile compie per ritornare alla posizione di partenza.

Il tempo che intercorre tra due passaggi nel punto di equilibrio (o punto di partenza) è detto periodo (o ciclo).

Il numero di periodi al secondo costituisce la frequenza di una vibrazione, espressa in Hertz (Hz).

In funzione degli effetti fisiopatologici sull'uomo le vibrazioni sono suddivise in tre principali bande di frequenza:

- 0-2 Hz: oscillazioni a bassa frequenza, generate dai mezzi di trasporto (terrestri aerei, marittimi);
- 2-20 Hz: oscillazioni a media frequenza, generate da macchine ed impianti industriali;
- 20-30 Hz: oscillazioni ad alta frequenza, generate da una gamma ampia di strumenti vibranti diffusi in ambito industriale.

Le vibrazioni sono caratterizzate inoltre da tre ulteriori parametri: l'ampiezza, la velocità e l'accelerazione dello spostamento.

Un'onda è una perturbazione di tipo elastico che si propaga da un punto ad un altro attraversando un materiale oppure sulla superficie dello stesso anche se non è implicito il suo spostamento definitivo. Le onde si distinguono pertanto in onde di volume ed onde di superficie.

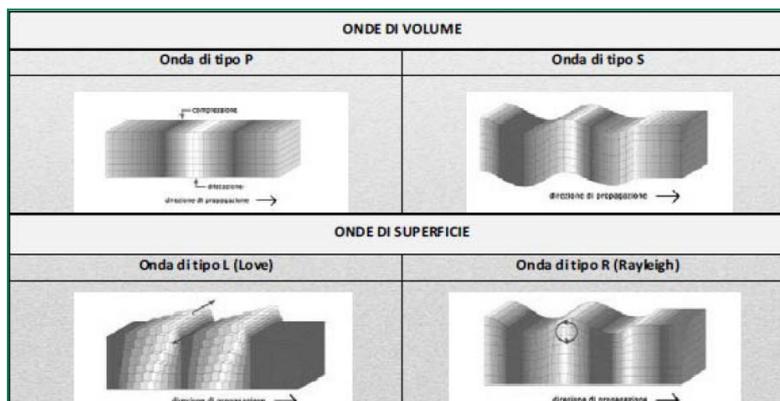


Figura 2 – Differenti tipologie di onde di volume e superficie.

Tra quelle esistenti, le più veloci sono le onde di compressione, mentre le onde di taglio e di superficie decadono più lentamente con la distanza.

La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione agli effetti delle vibrazioni deve consentire di individuare e stimare le modifiche e/o le interferenze introdotte dall'intervento proposto e valutarne la compatibilità con gli standard esistenti, in riferimento alla verifica sia del disturbo sull'uomo, sia del danno agli edifici per la salvaguardia del patrimonio architettonico/archeologico.

Quando viene imposto sul terreno un prefissato livello di vibrazione, questo si propaga nel mezzo, subendo un'attenuazione dipendente da natura del terreno, frequenza del segnale, distanza tra sorgente e recettore.

Il modello di propagazione valido per tutti i tipi di onde si basa sulla seguente relazione matematica:

$$a(d, f) = a(d_0, f) \left(\frac{d_0}{d} \right)^n e^{-\frac{2\pi f \eta}{c}(d-d_0)}$$

dove:

- η è il fattore di perdita del terreno,
- c la velocità di propagazione in m/s,
- f la frequenza in Hz,
- d la distanza in metri,
- d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

Il modello semplificato di propagazione si riferisce ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, ipotizzato omogeneo ed isotropo.

In presenza di edifici con struttura complessa, collegati al terreno attraverso fondazioni, i livelli di vibrazione riscontrabili all'interno delle strutture possono presentare attenuazioni e/o amplificazioni secondo lo schema riportato in Figura 3.

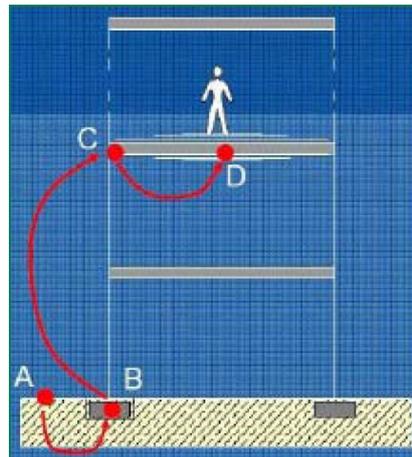


Figura 3 – Schematizzazione semplificata della propagazione delle vibrazioni nel sistema terreno-edificio.

Differenti tipologie di fondazioni forniscono diversi effetti di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio come evidenziato in Figura 4:

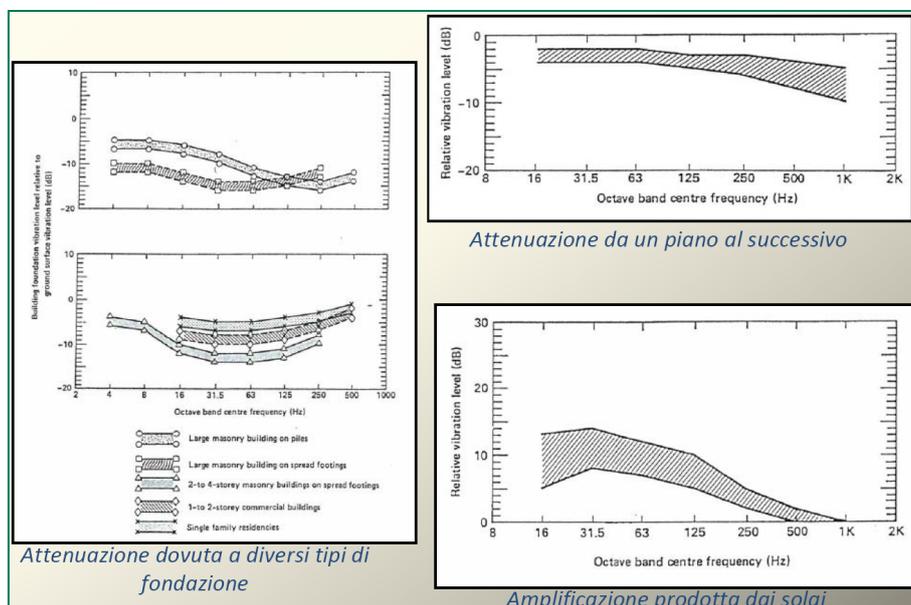


Figura 4 – Esempi di attenuazione/amplificazione dei fenomeni vibratorii/oscillatori nei differenti elementi.

3.2 Applicazioni Normative

Considerata l'assenza di specifica normativa in materia di eolico che stabilisca valori limite di esposizione alle vibrazioni prodotte dagli aerogeneratori, si fa riferimento ad altre normative in materia di sicurezza che possano essere di indirizzo per la stima dei livelli di accelerazione e di esposizione:

E-WAY GAMMA S.r.l. si riserva la proprietà di questo documento e ne vieta la riproduzione e la divulgazione a terzi se non espressamente autorizzati.

- relativamente all'esposizione umana:

“ISO 2631-2: Valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione del corpo intero – Vibrazione negli edifici”: si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y, e z di riferimento per persone in piedi, sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è 1-80 Hz ed il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione. Il corrispondente livello di vibrazione espresso in dB è definito dall'espressione:

$$L = 20 \log \left(\frac{a}{10^{-6}} \right)$$

“UNI 9614: Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”: la valutazione del disturbo (UNI 9614) è effettuata sulla base del valore di accelerazione efficace a_w - ponderato in frequenza - confrontato con una serie di valori limite dipendenti dalle destinazioni d'uso degli edifici e dal periodo di riferimento (giorno/notte). Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto;

“UNI 11048: Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo”.

- relativamente a danni agli edifici:

“ISO 9916: Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”: la norma definisce come parametro di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici il valore della velocità, in particolare il massimo valore (o di picco) delle componenti delle velocità di vibrazione lungo i tre assi di riferimento. La normativa è orientata alla verifica (a tutte le frequenze) che il limite di disturbo per le persone è decisamente più restrittivo del limite di danno strutturale.

Generalmente le applicazioni in ambito eolico e le tematiche ad esse correlate (aree di cantiere, viabilità ecc.), interessano zone e suoli quasi esclusivamente di tipo rurale dislocate in aree in cui la presenza di strutture ed edifici di vario tipo è solitamente molto scarsa, poco concentrata e/o costituita per lo più da ruderi, fabbricati diruti o, nella migliore delle ipotesi, da strutture adibite al ricovero di animali o mezzi agricoli. Solo in alcuni sporadici casi le strutture prossime agli impianti risultano essere a carattere abitativo; in quei casi comunque i fabbricati in questione risultano essere di altezza piuttosto contenuta (max 2-3 piani) e le distanze dalle turbine risultano essere quasi sempre superiori i 300 m in linea d'aria in virtù della necessità di contenere l'impatto ambientale nel rispetto dei limiti imposti dalle differenti normative di settore afferenti temi quali l'acustica, lo shadow-flickering, la gittata ecc.

In questo, risulta chiaramente evidente come la tematica legata ai potenziali danni agli edifici sia intrinsecamente esclusa, e quanto poco probabile e/o rilevante possano essere invece le ripercussioni in termini di esposizione umana essendo le aree di cantiere, di tipo temporaneo, dislocate in ambiente aperto ove la propagazione di rumore e vibrazioni è di tipo sferico (quindi proiettata lungo tutte le direzioni e non in modo esclusivo e diretto nei confronti di una o più zone edificate) e dove non sono valutati e considerati tutti gli elementi di tipo naturale e/o artificiale, la cui presenza esercita un effetto barriera alla propagazione delle onde.

3.3 Trasmissione e propagazione delle vibrazioni: parametri di riferimento e loro applicazione

La modalità di valutazione del fenomeno afferente alle vibrazioni può essere valutata relativamente a parametri quali:

- lo spostamento, ossia la variazione della posizione di un corpo o di una particella generalmente misurata a partire dalla posizione di quieto o dalla media delle posizioni assunte dal corpo (o dalla particella in questione);
- la velocità, ossia la variazione in un determinato intervallo di tempo dello spostamento del corpo rispetto al punto di riferimento.

A tal fine si identifica il PPV (Peak Particle Velocity - valore di picco) ossia il picco massimo istantaneo positivo o negativo del segnale di vibrazione.

Il PPV, sebbene valido per la valutazione dei potenziali danni agli edifici, risulta poco idoneo per una valutazione inerente alla risposta umana per la quale invece è indicata la valutazione del valore efficace della velocità (RMS), definita come la radice quadrata della media della velocità istantanea al quadrato.

Infine, al pari delle grandezze in acustica, viene utilizzato il livello associato al valore efficace della velocità L_V , misurato in dB e definito attraverso l'equazione:

$$L_V = 20 \log \left(\frac{v}{v_0} \right)$$

dove:

- v è indicato il valore efficace della velocità istantanea;
- v_0 è indicato il valore di riferimento ($v_0 = 9-10$ m/s).

Al contempo, le grandezze impiegate per l'accelerazione risultano le corrispondenti a quelle espresse per la velocità.

In particolare, il livello dell'accelerazione L_A (espresso in dB) è definito come:

$$L_A = 20 \log \left(\frac{a}{a_0} \right)$$

dove:

- a è indicato il valore efficace dell'accelerazione istantanea;
- a_0 è indicato il valore di riferimento ($a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$).

I fattori che incidono ed influiscono sulla propagazione delle vibrazioni attraverso il suolo sono legati a parametri di tipo fisico e definiscono tre diverse categorie. Nello specifico sono:

- 1) fattori specifici della tipologia di sorgente e classificazione delle modalità operative (Fase di Cantiere);
- 2) geologia;
- 3) fattori di tipo strutturale in relazione alle caratteristiche dei ricettori (Edifici-Strutture e Fabbricati).

3.3.1 Modalità operative e tipologie di sorgenti impiegate nelle fasi di cantiere

Nella fase di cantiere rientrano tutte quelle attività afferenti alla preparazione dei suoli e della viabilità necessaria al trasposto ed installazione degli aerogeneratori. Attività di scavo, sbancamento, trasporto e stoccaggio del materiale necessitano naturalmente di mezzi adeguati che generano vibrazioni di livello diverso in virtù dei mezzi e dei macchinari utilizzati nelle differenti fasi. Quelle considerate a rischio, perché capaci di generare livelli di vibrazioni "pericolose", sono le fasi che prevedono l'utilizzo di esplosivi ed attrezzature d'impatto (es. battipalo) che sostanzialmente non rientrano nelle attività afferenti alle installazioni di impianti eolici ma piuttosto sono più correlate ed attinenti ad attività di tipo estrattivo e di cava.

3.3.2 Geologia

I livelli di vibrazione e propagazione dei fenomeni vibratorii, sono fortemente influenzati dalle caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali ovvero dalla natura dei terreni affioranti ed in particolare dalla profondità e morfologia del substrato roccioso. In tal senso assumono particolare rilievo le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni (densità, modulo di Young, modulo di taglio, modulo di compressibilità, coefficiente di Poisson, peso di volume) e la loro relativa rigidità e rapporto di smorzamento. Una conseguenza di ciò è la registrazione di fenomeni di rifrazione e riflessione causati dalla diversa modalità di

propagazione delle vibrazioni in strati con caratteristiche fisico-meccaniche differenti oppure fenomeni di rallentamento (nel caso di onde P) o mancata propagazione delle stesse (nel caso di onde S) a causa della presenza di falde acquifere.

3.3.3 Ricettori: caratteristiche e fattori strutturali di edifici e fabbricati

La propagazione delle vibrazioni via terra possono provocare sensazioni di fastidio quasi esclusivamente, quando si avvertono all'interno degli edifici. La tipologia e la caratteristica delle strutture ricettive costituiscono quindi una componente fondamentale nella valutazione delle vibrazioni. È possibile che vibrazioni generate dai mezzi di escavazione possano essere avvertite all'esterno dei fabbricati, ma raramente è capitato che possano essere causa di problematiche o lamenti. I livelli di vibrazione che si propagano all'interno di un edificio dipendono dall'energia vibratoria che raggiunge le fondazioni, dall'accoppiamento tra le fondazioni ed il terreno e dalla propagazione della vibrazione attraverso la struttura dell'edificio stesso. Generalmente si può affermare che quanto maggiore è la massa della struttura coinvolta, tanto minore è la sua risposta all'energia vibratoria incidente sul terreno. Le sorgenti di vibrazione provocano effetti che si propagano attraverso il terreno e tendono a diminuire di intensità con l'aumentare della distanza.

Gli effetti indotti nei confronti degli edifici interessati da fenomeni vibratorii, possono essere classificati in differenti livelli di vibrazione come a seguire:

- livelli bassi: corrispondenti a suoni di medie e alte frequenze non percepibili;
- livelli medi: corrispondenti a suoni a bassa frequenza e vibrazioni percepibili;
- livelli alti: corrispondenti a suoni a bassissima frequenza capaci di procurare danni alle strutture.

3.4 Scelta e applicazione del modello previsionale

Per un esame previsionale volto all'individuazione di potenziali situazioni che possano provocare rischi o danni alle strutture, si può utilizzare un modello matematico empirico semplificato basato sulla classica procedura di valutazione della propagazione per la stima delle vibrazioni indotte.

La procedura adottata dal modello segue gli step riportati:

- si considerano i livelli di accelerazione lungo i tre assi: per la fase di esercizio misurati alla distanza di 1 m dagli aerogeneratori, per la fase di cantiere misurati al sedile del mezzo;
- si applica il modello di Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee per la stima del livello di accelerazione per assegnata distanza, che presenta la seguente formulazione matematica:

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-\alpha(r_2-r_1)}$$

dove:

- w_1 è l'ampiezza delle vibrazioni alla distanza r_1 dalla sorgente;
- w_2 è l'ampiezza delle vibrazioni alla distanza r_2 ;
- n è il coefficiente di smorzamento geometrico;
- α è il coefficiente di smorzamento del materiale che rappresenta l'aliquota di attenuazione causata dalla propagazione nel mezzo.

Il coefficiente di smorzamento α è definito a partire dal tipo di onda, dal tipo di sorgente e dal luogo di emissione della vibrazione e generalmente varia tra 0,5 e 2,0. Tale parametro considera la riduzione di energia di vibrazione causata dall'attrito e dalla coesione tra le particelle di terreno. L'attenuazione dovuta allo smorzamento del materiale è influenzata dalla litologia, dal tipo di terreno e dalla frequenza di vibrazione.

Il coefficiente di smorzamento α è si può rappresentare come segue:

$$\alpha = \frac{\pi \eta f}{c}$$

dove:

- η è il fattore di perdita del terreno;
- c è la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo considerato espressa in m/s;
- f è la frequenza di propagazione dell'onda espressa in Hz.

Per terreni molto rigidi, da litoidi a semi-litoidi, l'attenuazione del mezzo di propagazione avrà valori minori rispetto a quelli riferiti a terreni a grana grossa mediamente addensati o a grana fine mediamente consistenti. Di contro, i terreni a grana grossa scarsamente addensati o grana fine scarsamente consistenti tendono ad esercitare un elevato fattore di attenuazione nella propagazione delle vibrazioni rispetto ai suoli a maggior rigidità. Anche il livello di frequenza delle vibrazioni incide sensibilmente sulla loro propagazione nel mezzo, infatti la propagazione delle vibrazioni ad alte frequenze risultano più attenuate delle vibrazioni a basse frequenze. Ne consegue dunque che la maggiore propagazione possibile delle vibrazioni si ottiene per la condizione e combinazione di

vibrazioni a bassa frequenza che si propagano in terreni rigidi, mentre lo scenario con minor grado di propagazione delle vibrazioni si configura per vibrazioni ad alta frequenza in suoli più “teneri”.

Ungar & Bender (1975)¹ definiscono come modo unico di propagazione delle vibrazioni quello per onde longitudinali, fornendo differenti valori per la scelta della velocità di propagazione e del fattore di perdita come riportato in tabella a seguire:

Tabella 3 – Valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali per differenti litologie [Ungar & Bender (1975)].

Substrato litologico	Velocità propagazione onde longitudinali (c) [m/s]	Massa volumica [g/cm ²]	Fattore perdita del terreno [η]
ROCCIOSO	3500	0,129	0,01
SABBIOSO	600	0,083	0,1
ARGILLOSO	1500	0,09	0,5

- si formalizza l’applicazione del suddetto modello, calcolando a partire dai livelli di accelerazione noti, la distanza dalla quale le vibrazioni indotte dalla sorgente raggiungono i livelli di accelerazione accettabili ai sensi della UNI 9614:

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{-\alpha(r_2-r_1)} \rightarrow L(d) = L(0) \left(\frac{1}{d}\right)^n e^{-\alpha(d-1)} \rightarrow d$$

dove:

- L(0) è il livello di accelerazione misurato alla distanza di 1 m dalla sorgente di emissione;
- L(d) è indicato il livello di accelerazione corrispondente al limite di accettabilità (UNI 9614).

3.5 Strutture ed edifici – Rischio del danno

Le attività che si valutano in ambito di “rischio per le strutture derivanti da fenomeni vibratorii” sono quelle che prevedono l’utilizzo di macchine battipalo, esplosivi, perforazioni, demolizioni e/o scavi in prossimità di edifici e zone residenziali. In tali circostanze è buona norma valutare i differenti livelli di vibrazione ed impulsi derivanti da tali attività ed i cui effetti possono generare potenziali effetti di disturbo e/o danno alle strutture sollecitate.

¹ Vibrations produced in buildings by passage of subway trains; parameter estimation for preliminary design, Ungar & Bender, 1975.

La definizione di un limite di sicurezza per la velocità di vibrazione non è univoca: una rassegna completa dei valori di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni, proprio in termini di velocità di picco puntuale (PPV) è riportata nella normativa di riferimento UNI 9916.

Nella specifica circostanza viene adottato il criterio che fissa come limiti i valori a seguire:

- 5 mm/s per edifici a carattere residenziale (vibrazioni durature);
- 2,5 mm/s per strutture particolari quali gli edifici storici ed estremamente fragili (vibrazioni durature).

I valori citati rappresentano limiti certamente tra i più cautelativi utilizzati in via generale e risultano maggiori dei limiti considerati a riferimento per il “non disturbo alle persone”. Solo in presenza di un fattore di cresta molto elevato, maggiore di 18 dB, potrebbe infatti verificarsi il caso di superamento del limite di danno strutturale senza che si verifichi il superamento del limite di disturbo alle persone.

Il fattore di cresta è quindi definito dalla differenza fra il valore massimo di picco di una forma d’onda e il suo valore efficace.

Il fattore di cresta per una tipica forma d’onda sinusoidale è pari a 3 dB mentre per un segnale con diverse componenti e con forma d’onda molto irregolare, il fattore di cresta può superare i 10 dB. In alcuni casi può anche superare i 20 dB se sono presenti eventi impulsivi di rilievo (martellate, esplosioni, ecc.).

Tale circostanza risulta però estremamente improbabile al punto che è possibile affermare che il rispetto dei limiti di non-disturbo alle persone, fornisce comunque sufficienti garanzie tali da evitare effetti dannosi nei confronti delle strutture sollecitate.

3.6 Esposizione umana: rischi e disturbo

Internamente a tutti i corpi di fabbrica, edifici o strutture ricettive, la percezione del fenomeno vibratorio può avvenire sia in termini di disturbo di tipo meccanico (vibrazione delle strutture edilizie – “*groundborn vibration*”) sia in termini di disturbo acustico (rumore trasmesso ed irradiato orizzontalmente dalle pareti, dagli infissi, da pensili o suppellettili presenti all’interno degli edifici – “*groundborn noise*”). In ambedue i casi, tali disturbi o la loro percezione, sono rapidamente attenuati e tendono a diminuire fino a sparire completamente in funzione della distanza dalla sorgente. Naturalmente, come accennato vi sono dei fattori che inducono la riduzione percettiva, sia con l’attenuazione delle vibrazioni (mezzo di propagazione) sia con l’amplificazione del fenomeno (tipologia di fondazione delle strutture).

La soglia di percezione delle vibrazioni è definita nella normativa UNI 9614 che individua come valori di riferimento (“aree critiche”) per i tre assi x, y e z i seguenti valori:

- asse x ed asse y - $a_{soglia}(x/y) = 3,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ pari a 71 dB (per $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$);
- asse z - $a_{soglia}(z) = 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ pari a 74 dB (per $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$).

È inoltre da considerare la sensibilità delle strutture recettive rispetto alle sorgenti assegnando loro una classificazione. Tale classificazione di sensibilità è definita in relazione alla destinazione d’uso dell’immobile, indipendentemente dal suo stato conservativo o dalla tipologia costruttiva in conformità alla UNI 9614.

In particolare, le aree archeologiche, le zone di importanza storico-monumentale, le aree con presenza di infrastrutture ospedaliere o sanitarie, le aree con edifici scolastici e le aree con attività industriali a carattere specialistico con impiego di meccanica di precisione sono classificate come “aree critiche”.

Per le aree industriali caratterizzate invece da presenza di fabbriche e similari vigono i valori limite per l’esposizione dei lavoratori a vibrazioni meccaniche sanciti nel D.lgs. 81/2008.

In relazione alla destinazione d’uso, ubicazione e tipologia di strutture nella tabella a seguire sono riportati in sintesi i valori limite di riferimento (in accelerazione [m/s^2] ed in decibel [dB] per gli assi x, y, e z) utili affinché il fenomeno vibrazionale possa essere considerato disturbante.

Tabella 4 – Sintesi dei valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza in relazione alla destinazione d’uso degli immobili – Rif. UNI 9614 – valutazione del disturbo.

CLASSIFICAZIONE DI SENSIBILITÀ E DESTINAZIONE D'USO	LIVELLI DI ACCELERAZIONE			
	asse x,y		asse z	
	m/s^2	dB	m/s^2	dB
AREE CRITICHE (scuole, ospedali, aree archeologiche/storico/monumentali, ecc.)	$3,6 \times 10^{-3}$	71	$5,0 \times 10^{-3}$	74
ABITAZIONI (notturno)	$5,0 \times 10^{-3}$	74	$7,0 \times 10^{-3}$	77
ABITAZIONI (diurno)	$7,0 \times 10^{-3}$	77	$10,0 \times 10^{-3}$	80
UFFICI	$14,4 \times 10^{-3}$	83	$20,0 \times 10^{-3}$	86
FABBRICHE	$28,8 \times 10^{-3}$	89	$40,0 \times 10^{-3}$	92

3.7 Vibrazioni relative alle aree di cantiere

Gli impianti eolici sono localizzati generalmente in aree collinari e rurali, sostanzialmente a prevalente carattere agricolo e/o pastorale. Tali aree, percorse da mezzi per la lavorazione agricola e per il trasporto dei

materiali, sono per lo più caratterizzati da una viabilità esistente di tipo sterrato o nel caso di transito sostenuto di mezzi pesanti, da una viabilità con un fondo stradale in pietrisco (solitamente imbrecciato) per permettere l'assorbimento delle acque meteoriche e minimizzare gli effetti di avvallamenti legati al transito sui suoli bagnati. Il passaggio di tali mezzi (oltre al rumore legato alle lavorazioni agricole) genera normalmente un livello di rumore e vibrazioni già insite nei siti oggetto di installazione eolica, tuttavia in fase di cantiere per la realizzazione di un nuovo impianto, potrebbero essere utilizzati alcuni accorgimenti e forme di mitigazione onde minimizzare gli apporti acustici e vibrazionali e la conseguente potenziale sensazione di fastidio o disturbo legato alla temporanea presenza del cantiere necessario alla realizzazione progettuale.

Gli accorgimenti solitamente più semplici da adottare prevedono ad esempio l'utilizzo di mezzi gommati in luogo di mezzi cingolati che minimizzano l'impatto acustico e la conseguente generazione di fenomeni vibratorii legati all'attraversamento del percorso stradale; l'utilizzo di macchine operatrici di nuova generazione (i mezzi di nuova costruzione sono tutti a norma con valori emissivi dichiarati e certificati); in ultima analisi, a titolo meramente cautelativo, si può prevedere un piano di monitoraggio ad opera di tecnici abilitati con l'impiego di strumenti tarati e certificati.

In fase di realizzazione dell'impianto, è infatti possibile ipotizzare delle campagne fonometriche in virtù delle diverse fasi di cantiere che impiegano mezzi e strumenti differenti in considerazione dello spostamento lungo linee orizzontali dei macchinari impiegati durante le differenti fasi lavorative.

Le campagne fonometriche di tale tipo potrebbero essere previste (ad esempio) in virtù di una variazione dei mezzi in uso per la stessa fase di lavorazione oppure in relazione ad un significativo spostamento del fronte di cantiere o in concomitanza dell'arrivo e/o dell'installazione delle turbine in realizzazione e naturalmente la campagna di monitoraggio potrebbe essere orientata ed indirizzata a quelle strutture eventualmente già individuate in fase preliminare come edifici potenzialmente più suscettibili (RICETTORI) presso i quali elaborare la stima previsionale ante-operam solitamente richiesta per questo tipo di iniziative progettuali.

3.8 Impianti eolici: vibrazioni in fase di esercizio

Il rumore e le vibrazioni generate e trasmesse dagli aerogeneratori sono sostanzialmente legati a fenomeni di natura meccanica, aerodinamica e cinetica. I fenomeni di natura meccanica sono legati agli attriti delle componenti del rotore con il sistema di trasmissione del generatore, quelli di natura aerodinamica sono legati alle interazioni tra il vento e le pale (responsabile anche del cosiddetto "effetto swish") mentre quelli di natura cinetica sono legati alle oscillazioni ed al passaggio dallo stato stazionario allo stato combinato. Oltre all'interazione aerodinamica e meccanica delle pale con la torre, il movimento oscillatorio è dovuto alla

pressione del vento sul piano del rotore che genera un momento forzante bilanciato dalle strutture di fondazione della turbina.

Il BWEA (British Wind Energy Association) ha dimostrato, attraverso studi e pubblicazioni consultabili anche sul web, che poche decine di metri di distanza sono sufficienti affinché il rumore risultante dalle vibrazioni prodotte dalle turbine eoliche (comunque di modesta entità) risulti quasi indistinguibile rispetto al rumore residuo presente al contorno.

È infatti possibile analizzare come le vibrazioni si trasmettono e si propagano nel suolo nell'intorno delle fondazioni degli aerogeneratori ed è dimostrabile come l'ampiezza delle onde (e l'energia ad esse associata) tenda rapidamente a diminuire con l'aumentare della distanza dalla turbina. Il fenomeno vibratorio viene trasmesso attraverso la struttura metallica della torre, le fondazioni, ed il terreno alle caratteristiche strutturali delle strutture ricettive.

4 STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI

4.1 Fase di esercizio

In riferimento all'impianto eolico di progetto, non disponendo ancora di valori misurati per le turbine in esame poiché fisicamente ancora non installate, nell'ottica di poter effettuare una stima previsionale delle vibrazioni indotte dallo stesso nei confronti di strutture ricettive più prossime, saranno utilizzati come dati in input i valori noti di impianti eolici di similari e paragonabili caratteristiche, applicando ed elaborando le stesse alla condizione al contorno dello specifico sito di installazione.

L'applicazione del modello previsionale descritto permette di poter effettuare la stima previsionale ed una valutazione quantitativa delle vibrazioni generate dall'impianto al fine di poter valutare la distanza minima alla quale il potenziale disturbo legato all'effetto vibratorio sia smorzato e dissipato, onde garantire e preservare le strutture abitative o gli edifici in genere presenti nell'area in esame e le attività in esse presenti.

In termini quantitativi, nell'ottica di porsi nello scenario peggiore possibile (ossia lo scenario più cautelativo nei confronti delle strutture presenti), per l'applicazione del modello previsionale sono state adottate le seguenti assunzioni legate ai parametri di input.

In particolare:

- relativamente ai valori legati alla componente litologica è stato assunto:
 - $\eta = 0,5$ (minore fattore di perdita del terreno);
 - c (velocità di propagazione dell'onda longitudinale) = 1500 m/s (valore in linea con i dati geotecnici dell'area di installazione);
- il coefficiente di smorzamento geometrico è scelto pari a 0,5 poiché riferito a onde superficiali (Rayleigh o Love) generate da sorgenti di emissione puntuale nell'ottica di generalizzare il modello alle condizioni più cautelative possibili frequenza di propagazione dell'onda è stata posta pari a 20 Hz costituente il valore minimo udibile dall'orecchio umano;
- relativamente ai valori di accelerazione per l'impianto in esercizio: sono stati considerati dati desunti presso impianti con aerogeneratori similari e/o comparabili considerati nelle condizioni di esercizio più gravose.

Nello specifico nel modello di calcolo sono stati imputati i valori di accelerazione (non ponderati in frequenza) misurati in corrispondenza della base torre per i tre assi di riferimento x, y, z.

$$w_1(x) = 0,0224 \frac{m}{s^2}$$

$$w_1(y) = 0,0133 \frac{m}{s^2}$$

$$w_1(z) = 0,0272 \frac{m}{s^2}$$

- relativamente ai valori di attenuazione e/o amplificazione legati alle fondazioni delle strutture e dei fabbricati ricettivi nessun parametro di attenuazione è stato applicato.

Le tabelle a seguire evidenziano rispettivamente la sintesi di tutti i dati ed i parametri considerati in input al modello previsionale di calcolo e la sintesi dei risultati attesi con evidenza della rispondenza ai limiti soglia sanciti nella UNI 9614 di riferimento.

La Tabella 6 riporta come, termine di valutazione, il riferimento ai limiti più restrittivi individuati nella UNI 9614 relative alle destinazioni d'uso individuate come "aree critiche" ed aree con strutture a carattere abitativo rispettivamente per il periodo di riferimento notturno e diurno, posto che la verifica del rispetto per le aree con tali destinazioni d'uso, implica necessariamente la validità ed il rispetto dei limiti anche per le strutture poste in aree i cui valori soglia risultano meno restrittivi.

Tabella 5 – Dati in input per il calcolo delle vibrazioni indotte da un aerogeneratore in esercizio.

DATI IN INPUT	VALORE
distanza di misura dalla sorgente (m)	1
coefficiente di attenuazione geometrica	0,5
frequenza di vibrazione (Hz)	20
coefficiente di assorbimento del terreno	0,5
velocità di propagazione nel mezzo (m/s)	1500

Tabella 6 – Distanze per il rispetto dei limiti UNI 9614.

DISTANZA MINIMA RISPETTO ALLA SORGENTE DALLA QUALE RISULTANO RISPETTATI I VALORI SOGLIA SANCITI NELLA UNI 9614	x (m)	y (m)	z (m)
abitazioni (giorno)	6,37	3,00	5,21
abitazioni (notte)	9,66	5,04	8,14
aree critiche	13,72	7,91	11,87

Gli impianti eolici di nuova generazione prevedono lo sviluppo del layout progettuale con disposizione delle turbine che generalmente, in virtù delle dimensioni del diametro di rotore degli aerogeneratori, sono posizionati a distanze non inferiori i 300-400 m tra loro e localizzati in aree a prevalente carattere agricolo/rurale tali che le sporadiche strutture presenti, siano poste a distanze non inferiori i 200 m in linea d'aria in conformità alle linee guida nazionali per la progettazione di impianti eolici (*"minima distanza di ciascun aerogeneratore da unità abitative munite di abitabilità, regolarmente censite e stabilmente abitate,*

non inferiore ai 200 m” – D.M. 10/09/2010 – “Linee guida per l’autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale il 18 settembre 2010, n. 219”).

In ragione di ciò, i risultati ottenuti evidenziano che per distanze di tali entità qualsiasi fenomeno vibratorio indotto dagli aerogeneratori, anche nell’ipotesi di effetto cumulato di più aerogeneratori, risulta completamente smorzato e reso nullo (o assolutamente trascurabile) rispetto alla posizione delle strutture.

La Figura 5 mostra la curva di smorzamento del fenomeno vibratorio lungo gli assi x e y in riferimento alla distanza dalla sorgente.

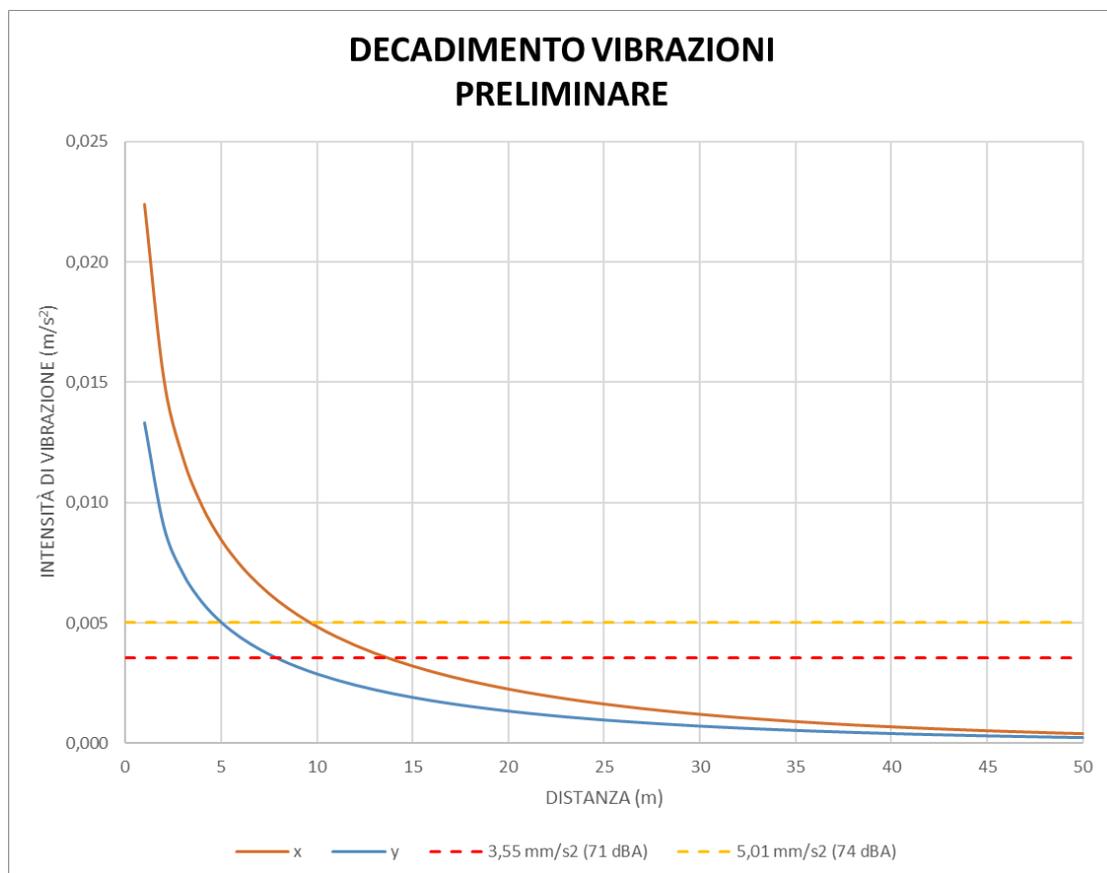


Figura 5 – Decadimento delle vibrazioni in fase preliminare.

Da quanto mostrato in Tabella 6 e Figura 5 risulta evidente che nelle componenti x, y di propagazione delle onde, i valori soglia risultano rispettati per le “abitazioni (notte)” già ad una distanza inferiore ad 9,66 m e ad una distanza inferiore i 13,72 m (per aree critiche), quindi gli stessi valori risulterebbero rispettati anche per le “aree critiche”.

4.2 Fase di cantiere

Come precedentemente accennato, nella fase di cantiere per la realizzazione di un impianto eolico rientrano tutte quelle attività afferenti alla preparazione dei suoli e della viabilità necessaria al trasposto ed all'installazione degli aerogeneratori. Trattasi fondamentalmente di attività di scavo, sbancamento, trasporto e stoccaggio del materiale, quindi seppur in maniera contenuta, i mezzi impiegati generano vibrazioni di livello diverso in virtù della diversa tipologia dei macchinari, utilizzati nelle differenti fasi. Per la realizzazione di un impianto eolico sono pertanto escluse tutte quelle attività considerate a rischio perché realmente capaci di generare livelli di vibrazioni "pericolose", ossia tutte quelle fasi che prevedono l'utilizzo di esplosivi ed attrezzature d'impatto (ad esempio battipalo). La possibilità che possano quindi manifestarsi pericoli o evidenze di danni di qualsiasi tipo alle strutture prossime al cantiere, è da ritenersi nulla o quantomeno altamente improbabile anche in ragione delle distanze minime (non inferiori i 200 m in conformità al D.M. 10/09/2010 citato) alle quali le turbine sono poste rispetto alle strutture più prossime.

Anche in tale circostanza viene tuttavia applicato il modello di calcolo onde poter effettuare una stima previsionale del potenziale disturbo delle vibrazioni indotte alle strutture ricettive.

In termini quantitativi, per l'applicazione del modello previsionale sono state adottati in input i seguenti criteri di scelta e parametri di inserimento.

In particolare:

- relativamente ai valori emissivi dei mezzi impiegati: nell'ottica più cautelativa nei confronti delle strutture recettive si è ipotizzato di valutare la propagazione delle vibrazioni in considerazione dell'utilizzo del mezzo di cantiere con emissioni più elevate tra quelli presenti nelle diverse fasi di lavorazione. Nello specifico sarà considerato un escavatore KOMATSU Mod PC290NC della potenza di 140 W per il quale sono disponibili i livelli di vibrazione realmente misurati in campo e riferite direttamente al sedile del conducente del mezzo. In questo caso quindi, rispetto alla condizione misurata al suolo alla distanza di un metro dalla sorgente, è stata considerata la condizione in assoluto più penalizzante e quindi più cautelativa ai fini della stima previsionale.

KOMATSU PC290NCL-8 Escavatore a cingoli Motore a scoppio diesel



Scheda Macchinario

Marca: KOMATSU

Modello: PC290NCL-8

Tipologia: Escavatore a cingoli

Costruito nel: 2007

Peso: 29230 kg

Potenza: 140 kW

Alimentazione: Motore a scoppio diesel

Cilindrata: 6690 cc



[Manuale di istruzioni ed uso acquisito in sede di misura/censimento](#)

PDF / La redazione non risponde di eventuali modifiche e/o aggiornamenti apportati dal costruttore.



Valori dichiarati ai sensi della norma **UNI EN 7096:2009**

CONDIZIONE	MATERIALE	$k^{(1)}$
NON APPLICABILE		0.5 m/s ²

(1) Incertezza estesa

Misure sul Campo

LAVORO: ESCAVAZIONE

COMPARTO: Costruzioni edili

ACCESSORIO: Benna

Condizioni terreno / strada: Suolo: poco sassoso

Velocità di avanzamento: nulla

Referente: ASUR Marche PSAL

Nome: Giacomo Rucci (giacomo.rucci@sanita.marche.it)

Federica Marini e Eleonora Durante ASUR Marche PSAL

Luogo: CAMERANO

in data 2018-08-24

MATERIALE: Terreno limoso-argilloso

Tipo terreno / strada: Suolo: terreno lavorato, campo

Condizioni terreno / strada: Suolo: poco sassoso

Velocità di avanzamento: nulla

NOTE: Effettuato anche campionamento nel pianale su cui è installato il sedile mediante sensore B&K ENDEVCO 2560 collegato al quarto canale dello SVAN 948

SEDILE

Tipo sedile: di serie

Marca sedile: NON DISPONIBILE

Modello sedile: NON DISPONIBILE

Tipo sospensioni sedile: NON INDICATA

Regolazioni possibili del sedile: altezza

Braccioli: Presenti

Condizioni di misura Condizioni di misura Montaggio accelerometro

Valori relativi alla posizione peggiore: sedile

A_{wx} (Media aritmetica): 0.3 m/s ²	A_{wy} (Media aritmetica): 0.4 m/s ²	A_{wz} (Media aritmetica): 0.3 m/s ²	
dev. std. x 1,645: 0.19 m/s ²	dev. std. x 1,645: 0.1 m/s ²	dev. std. x 1,645: 0.08 m/s ²	
Media aritmetica + (dev. std. x 1,645): 0.5 m/s ²	Media aritmetica + (dev. std. x 1,645): 0.5 m/s ²	Media aritmetica + (dev. std. x 1,645): 0.4 m/s ²	A_{wvmax} 0.8 m/s ²

Figura 6 – Caratteristiche vibrazionali misurate per il mezzo di cantiere utilizzato nel modello di simulazione

- relativamente ai valori soglia per il limite di disturbo – livelli di riferimento: poiché tutte le attività di cantiere (e quindi anche quelle di escavazione per il quale è stato ipotizzato il mezzo KOMATSU) sono quasi esclusivamente concentrate nelle ore diurne, in assenza quindi di attività nel periodo di riferimento notturno, è stato assegnato come valore soglia di riferimento quello relativo alle destinazioni d'uso delle strutture a carattere abitativo per il periodo diurno che è fissato in 77 dB in ottemperanza alla UNI 9614. Tali attività, inoltre, essendo a carattere temporaneo, risultano non compatibili con potenziali problematiche legate ad azioni vibratorie prolungate nel tempo cui potrebbero essere soggette le "aree critiche";
- relativamente ai valori di attenuazione e/o amplificazione legati alle fondazioni delle strutture e dei fabbricati ricettivi nessun parametro di attenuazione è stato applicato.

In Tabella 7 e Tabella 8 sono riportate rispettivamente la sintesi dei dati di input (accelerazioni del mezzo di cantiere considerato poste invariate le altre componenti), e la sintesi dei risultati/valori attesi con evidenza della rispondenza ai limiti soglia individuati nella UNI 9614 di riferimento.

Svolgendosi le attività di cantiere prevalentemente nelle ore diurne, la verifica dei risultati è stata effettuata in riferimento al limite di 77 dB individuato nella UNI 9614 relativo al periodo di riferimento diurno.

Tabella 7 – Valori di input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte dal mezzo di cantiere considerato – Escavatore cingolato KOMATSU PC290NCL.

LIVELLI DI ACCELERAZIONE SORGENTE	dB(A)	m/s ²
x	109,54	0,3
y	112,04	0,4
z	109,54	0,3

Tabella 8 – Risultati in termini di distanza di rispetto dei limiti UNI 9614.

DISTANZA MINIMA RISPETTO ALLA SORGENTE DALLA QUALE RISULTANO RISPETTATI I VALORI SOGLIA SANCITI NELLA UNI 9614	x (m)	y (m)	z (m)
abitazioni (giorno)	45,00	50,50	38,59

Come si evince dalla Tabella 7 e Tabella 8, anche le attività di cantiere per la realizzazione di un impianto eolico forniscono apporti vibrazionali presso le strutture più sollecitate che possono certamente ritenersi trascurabili e poco (o nulla) impattanti anche in virtù del potenziale effetto cumulato con altre sorgenti emissive in utilizzo, rientrando i valori entro i limiti raccomandati dalla normativa ad una distanza massima di circa 50,50 m.

CONCLUSIONI

Per l'impianto eolico di progetto sono state condotte delle simulazioni attraverso l'utilizzo del modello Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee con il quale, a partire dai valori di accelerazione per le tre componenti x, y e z alla base della torre degli aerogeneratori in fase di esercizio, è possibile calcolare la propagazione delle vibrazioni indotte stimandone la distanza di smorzamento.

La valutazione quantitativa legata alla componente vibrazionale è stata trattata e verificata sia per quanto concerne il "criterio del disturbo" sia per quanto relativo al potenziale "danno strutturale" nei confronti degli edifici posti nell'intorno delle aree di progetto e considerati come ricettori.

I risultati delle simulazioni di tipo previsionale hanno dimostrato che sulla base delle assunzioni esplicitate, già a distanze di circa 9,66 m le vibrazioni indotte dagli aerogeneratori in fase di esercizio risultano inferiori ai limiti di rispetto per le abitazioni nel periodo notturno sanciti nella normativa di riferimento UNI 9614.

Anche le valutazioni eseguite relativamente la fase di cantiere hanno dimostrato che, per le modalità operative necessarie all'installazione di impianti eolici, non essendo previste attività considerate a rischio perché capaci di generare livelli di vibrazioni "pericolose" (ossia quelle che prevedono l'utilizzo di esplosivi ed attrezzature d'impatto come "battipalo"), il solo impiego di mezzi ordinari quali i mezzi di escavazione, trasporto e movimentazione dei materiali (o quant'altro necessario), non sarà tale da produrre effetti significativi.

Si può pertanto concludere che in tutte le circostanze, il contributo legato alle vibrazioni indotte dall'installazione dell'impianto eolico nei confronti degli edifici risulta inferiore al valore soglia di percezione e pertanto il loro contributo può essere considerato nullo o quantomeno trascurabile.