

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA DI FOGGIA
COMUNE DI APRICENA

LOCALITÀ INCORONATA - SAN SABINO

Oggetto:

PROGETTO DEFINITIVO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN IMPIANTO EOLICO AVENTE POTENZA PARI A 99,2 MW E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE - 16 AEROGENERATORI

Sezione:

SEZIONE VB - VIBRAZIONI

Elaborato:

STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO E DI CANTIERE

Nome file sorgente:

SEZIONE VB/EO.APR01.PD.VB.01.docx

Numero elaborato:

EO.APR01.PD.VB.01

Scala:

Formato di stampa:

A4

Nome file stampa:

EO.APR01.PD.VB.01.pdf

Tipologia:

R

Proponente:

E-WAY FINANCE S.p.A.

Via Po, 23

00198 ROMA (RM)

P.IVA. 15773121007



Progettista:

E-WAY FINANCE S.p.A.

Via Po, 23

00198 ROMA (RM)

P.IVA. 15773121007



CODICE	REV. n.	DATA REV.	REDAZIONE	VERIFICA	VALIDAZIONE
EO.APR01.PD.VB.01	00	12/2021	A. Zambrano	D. Franconiero	D. Franconiero

INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	INTRODUZIONE	5
2.1	Descrizione ed inquadramento area di impianto	5
2.2	Recettori: scelta e inquadramento	8
3	ANALISI DEI FENOMENI VIBRAZIONALI.....	12
3.1	Definizioni e principi generali (fonte ISPRA)	12
3.2	Applicazioni Normative	14
3.3	Trasmissione e propagazione delle vibrazioni: parametri di riferimento e loro applicazione	16
3.3.1	Modalità operative e tipologie di sorgenti impiegate nelle fasi di cantiere	17
3.3.2	Geologia	17
3.3.3	Recettori: caratteristiche e fattori strutturali di edifici e fabbricati	18
3.4	Scelta e applicazione del modello previsionale	18
3.5	Strutture e edifici – Rischio del danno	20
3.6	Esposizione umana: rischi e disturbo.....	21
3.7	Vibrazioni relative alle aree di cantiere	23
3.8	Impianti eolici: vibrazioni in fase di esercizio	23
4	STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI	25
4.1	Fase di esercizio	25
4.2	Fase di cantiere	28
5	CONCLUSIONI.....	31
6	BIBLIOGRAFIA	32

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1: Inquadramento geografico area di sviluppo progettuale su stralcio cartografico IGM 1:25000 parte 1.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2: Inquadramento geografico area di sviluppo progettuale su stralcio cartografico IGM 1:25000 parte 2.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3: Fotoinserimento e rappresentazione 3D dell'impianto di progetto nel contesto territoriale su ortofoto (fonte Google Earth) parte 1.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4: Fotoinserimento e rappresentazione 3D dell'impianto di progetto nel contesto territoriale su ortofoto (fonte Google Earth) parte 2.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5: Differenti tipologie di onde di volume e superficie</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6: Schematizzazione semplificata della propagazione delle vibrazioni nel sistema terreno-edificio.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7: Esempi di attenuazione/amplificazione dei fenomeni vibratorii/oscillatori nei differenti elementi.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8: Decadimento delle vibrazioni in fase preliminare.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 9: Caratteristiche vibrazionali misurate per il mezzo di cantiere utilizzato nel modello di simulazione.....</i>	<i>29</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1: Coordinate della wind farm di progetto.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabella 2: Inquadramento dei recettori parte 1.</i>	<i>9</i>
<i>Tabella 3: Inquadramento dei recettori parte 2.</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 4: Matrice delle interdistanze: recettori-turbine di progetto parte 1.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 5: Matrice delle interdistanze: recettori-turbine di progetto parte 2.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabella 6: Valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali per differenti litologie [Ungar & Bender (1975)].</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 7: 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>22</i>
<i>Tabella 8: Dati e parametri input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte da un aerogeneratore in esercizio.</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 9: risultati in termini di distanza di rispetto dei limiti UNI 9614.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 10: Valori di input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte dal mezzo di cantiere considerato – Escavatore cingolato KOMATSU PC290NCL.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabella 11: Risultati in termini di distanza di rispetto dei limiti UNI 9614.....</i>	<i>30</i>

1 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 "Incoronata - San Sabino", sito in agro di Apricena (FG).

In particolare, il progetto è relativo ad un impianto eolico avente potenza nominale pari a 99,2 MW e costituito da:

- N° 16 aerogeneratori aventi diametro 162 m e altezza al mozzo pari a 119 m (per un'altezza complessiva di 200 m), ciascuno avente potenza nominale pari a 6,2 MW (aerogeneratore tipo modello Vestas V162);
- Due Cabine di Raccolta e Misura in MT a 30 kV;
- Linee elettriche in MT a 30 kV in cavo interrato necessaria per l'interconnessione di 6 aerogeneratori alla prima Cabina di Raccolta e Misura;
- Linee elettriche in MT a 30 kV in cavo interrato necessaria per l'interconnessione di 10 aerogeneratori alla seconda Cabina di Raccolta e Misura;
- Una Stazione Elettrica (SE) di trasformazione 150/30 kV Utente;
- Linee elettriche in MT a 30 kV in cavo interrato necessari per l'interconnessione delle due Cabine di Raccolta e Misura alla SE Utente di cui sopra;
- Una sezione di impianto elettrico comune con due impianti fotovoltaico in sviluppo (altro operatore), necessaria per la condivisione dello Stallo AT a 150 kV, assegnato dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) all'interno della futura SE della RTN denominata "Torremaggiore". Tale sezione è localizzata in una zona adiacente alla SE Utente e contiene tutte le apparecchiature elettromeccaniche in AT necessarie per la condivisione della connessione.
- Tutte le apparecchiature elettromeccaniche in AT di competenza dell'Utente da installare all'interno della futura SE Terna "Torremaggiore", in corrispondenza dello stallo assegnato;
- Una linea elettrica in AT a 150 kV in cavo interrato di interconnessione tra la sezione di impianto comune e la futura SE RTN "Torremaggiore".

Titolare dell'iniziativa proposta è la società E-Way Finance S.p.A., avente sede legale in Via Po 23, 00198 Roma, P.IVA 15773121007.

2 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 sottende il progetto in questione.

2.1 Descrizione ed inquadramento area di impianto

L'area interessata dalla proposta di intervento progettuale è localizzata in agro del Comune di Apricena, individuabile in località "Incoronata" e "San Sabino", al confine con i territori comunali di Poggio Imperiale (FG) e San Severo (FG). L'area dista circa 1,5 km in direzione sud dal centro abitato di Apricena e circa 3 km in direzione sud-ovest dal centro abitato di Poggio Imperiale.

L'orografia della zona di sviluppo è tipicamente pianeggiante e non eccessivamente variabile dal punto di vista altimetrico (dai 33,4 ai 65 m s.l.t. con eccezione di due turbine rispettivamente a 110,8 e 125 m s.l.t.). I suoli risultano essere quasi esclusivamente adibiti ad uso agricolo sostanzialmente priva di alberature di medio o alto fusto.

L'impianto in oggetto è costituito da 16 aerogeneratori di potenza nominale pari a 6,2 MW per una potenza di impianto pari a 99,2 MW.

Le turbine di progetto si inseriscono in un contesto territoriale prevalentemente privo impianti eolici ad eccezione di sporadiche singole applicazioni di tipo minieolico (potenza nominale < 60 kW). Rispetto all'estensione della totalità dell'area di sviluppo progettuale, soltanto nella zona a nord ovest, individuabile in località "Incoronata", è attualmente presente una wind farm costituita da 15 aerogeneratori.

Tabella 1: Coordinate della wind farm di progetto.

ID WTG	UTM WGS 84 E [m]	UTM WGS 84 N [m]	ELEVATION [m s.l.m.]	WTG TYPE	POWER [kW]	HUB HEIGHT [m s.l.t.]
AP01	529208	4627453	123	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP02	529995	4626779	112	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP03	527347	4625052	64	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP04	528738	4624648	60	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP05	529602	4624962	56	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP06	531250	4624334	55	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP07	536745	4623972	50	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP08	537427	4623958	50	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP09	538636	4623589	50	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP10	535936	4622202	40	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP11	535413	4621439	40	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP12	536107	4620215	35	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP13	536984	4620039	36	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP14	537818	4619786	30	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP15	538459	4620085	30	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0
AP16	539063	4620485	30	VESTAS V162-6.2-6.200	6.200	119,0

Si riporta il layout di progetto rispettivamente su stralcio cartografico IGM 1:25000 in Figura 1 e Figura 2 e su ortofoto (fonte Google Earth) in Figura 3 e Figura 4:

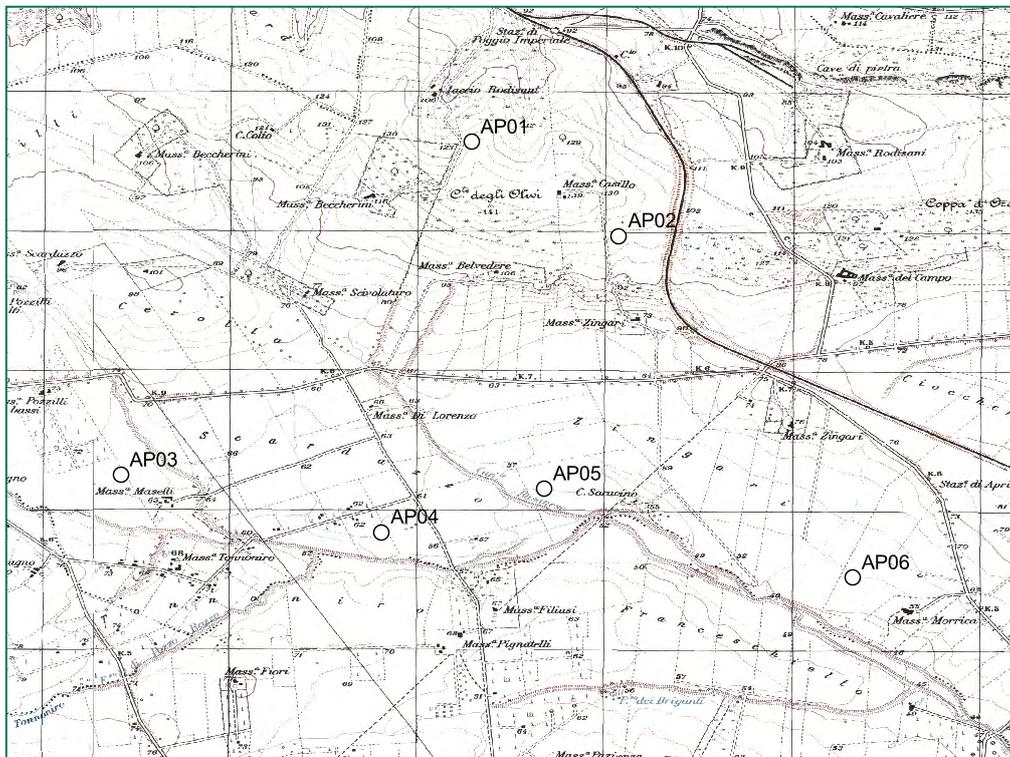


Figura 1: Inquadramento geografico area di sviluppo progettuale su stralcio cartografico IGM 1:25000 parte 1.

CODICE	EO.APR01.PD.VB.01
REVISIONE n.	00
DATA REVISIONE	24/09/2021
PAGINA	7 di 32

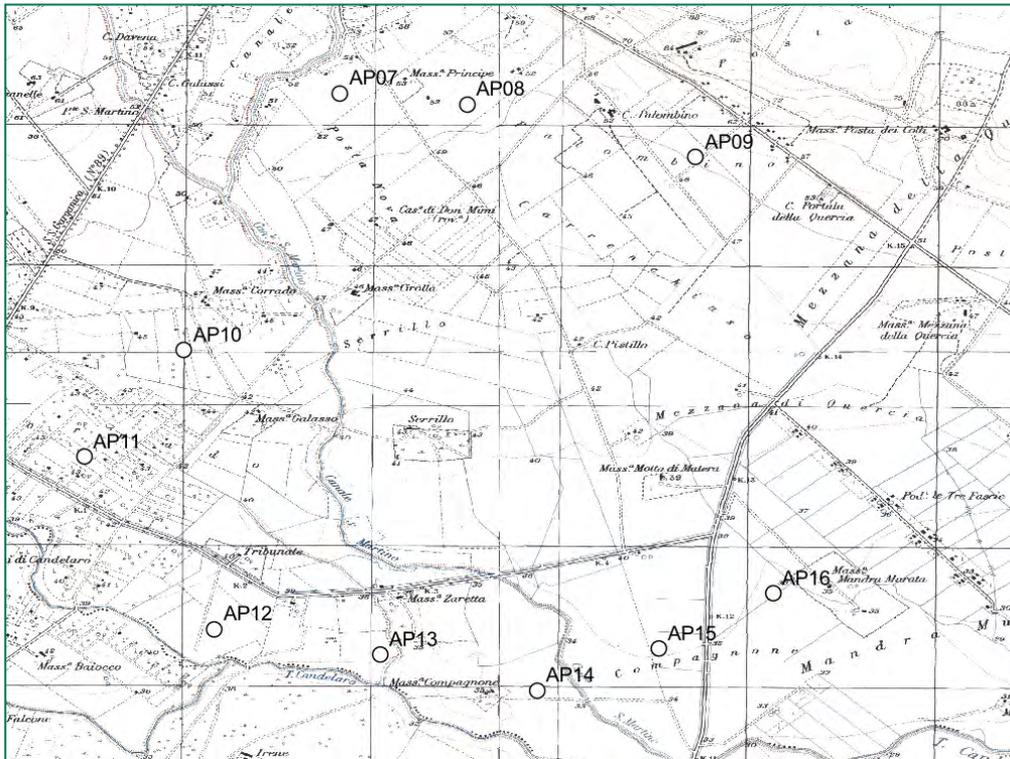


Figura 2: Inquadramento geografico area di sviluppo progettuale su stralcio cartografico IGM 1:25000 parte 2.



Figura 3: Fotoinserimento e rappresentazione 3D dell'impianto di progetto nel contesto territoriale su ortofoto (fonte Google Earth) parte 1.



Figura 4: Fotoinserimento e rappresentazione 3D dell'impianto di progetto nel contesto territoriale su ortofoto (fonte Google Earth) parte 2.

2.2 Recettori: scelta e inquadramento

Onde poter effettuare le valutazioni previsionali degli impatti indotti dall'impianto eolico di progetto, sono stati individuati i recettori sensibili nei confronti dei quali sono state condotte le analisi specialistiche. Per quanto concerne i criteri di individuazione, scelta e classificazione degli stessi, si rimanda agli specifici elaborati progettuali, ma una discriminante certamente centrale nella valutazione è legata alla loro classificazione catastale ed allo stato d'utilizzo e conservazione dei fabbricati nell'ottica di tutelare in modo particolare, e considerare quindi come sensibili, tutte le strutture a carattere abitativo (o potenzialmente tale). A tal proposito relativamente al **DPCM 14/11/97** e alla **legge quadro n. 447/95**, 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 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"*.

Nell'elaborato *"REC.SIA.01 – Individuazione su CTR e ortofoto dei recettori e dei non recettori"* è descritta in dettaglio la metodologia di individuazione ed il criterio di classificazione dei ricettori considerati sensibili all'interno di un predefinito buffer nell'intorno delle turbine di progetto.

In sintesi, le strutture nei confronti delle quali si sono concentrate le analisi, sono concentrate in numero di 34, rappresentate da fabbricati aventi caratteristiche di abitabilità e/o catastalmente identificate in categoria A.

Le stesse sono state considerate cruciali e rappresentative delle condizioni al contorno dell'area in esame in virtù della loro posizione più prossima all'impianto, motivo per il quale, la verifica della rispondenza alle differenti normative che regolano le diverse tipologie di impatto, implica necessariamente il rispetto delle stesse anche per tutte le strutture poste a distanze superiori dalle turbine di progetto. Tali strutture risultano essere dunque quelle potenzialmente più esposte alle emissioni acustiche e vibrazioni derivanti dal funzionamento dei macchinari e dei mezzi di movimentazione che operano anche durante la fase di cantiere.



Tabella 2: Inquadramento dei recettori parte 1.



Tabella 3: Inquadramento dei recettori parte 2.

È in ogni caso importate sottolineare che sono stati considerati diversi scenari in fase di simulazione ed in particolare quelli più gravosi e tali da fornire il maggior apporto acustico presso i recettori considerati.

Si evidenziano in Tabella 4 e Tabella 5 le distanze intercorrenti tra ciascuna turbina di progetto ed i recettori sensibili considerati.

Tabella 4: Matrice delle interdistanze: recettori-turbine di progetto parte 1.

WTG/REC	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17
AP01	3829	2454	652	2643	4125	4136	4140	9917	9988	9982	9882	10044	10168	10203	10249	10220	10307
AP02	3898	2875	388	1629	3112	3124	3129	8969	9040	9032	8930	9085	9207	9238	9287	9255	9345
AP03	795	964	3034	3579	4527	4520	4512	11312	11378	11365	11258	11372	11478	11490	11547	11502	11602
AP04	1835	2034	2530	2304	3089	3082	3074	9905	9970	9956	9848	9956	10060	10070	10128	10081	10182
AP05	2741	2597	2037	1385	2313	2310	2304	9056	9122	9109	9002	9118	9224	9238	9295	9251	9350
AP06	4327	4359	3095	1147	558	551	545	7390	7454	7439	7331	7433	7535	7543	7601	7554	7656
AP07	9830	9735	7690	6018	4952	4961	4971	1940	1996	1977	1869	1940	2034	2037	2097	2048	2150
AP08	10512	10406	8327	6685	5633	5643	5653	1287	1338	1316	1210	1263	1352	1355	1415	1366	1468
AP09	11740	11665	9588	7946	6866	6875	6884	800	770	744	736	526	452	368	420	352	429
AP10	9272	9506	7887	5976	4612	4612	4615	3478	3507	3480	3390	3344	3373	3328	3394	3325	3427
AP11	8985	9377	7989	6019	4574	4569	4569	4372	4398	4370	4284	4222	4240	4188	4253	4183	4282
AP12	10084	10604	9348	7364	5898	5890	5889	4882	4888	4859	4795	4671	4647	4575	4633	4563	4646
AP13	10958	11440	10092	8123	6675	6669	6669	4655	4647	4618	4572	4413	4365	4284	4334	4267	4336
AP14	11824	12285	10878	8922	7489	7484	7485	4676	4655	4628	4601	4412	4340	4252	4293	4232	4283
AP15	12310	12700	11178	9252	7851	7848	7850	4308	4278	4252	4240	4034	3946	3856	3889	3833	3871
AP16	12750	13063	11426	9538	8178	8177	8180	3927	3888	3864	3868	3648	3544	3453	3477	3430	3450

Tabella 5: Matrice delle interdistanze: recettori-turbine di progetto parte 2.

WTG/REC	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24	R25	R26	R27	R28	R29	R30	R31	R32	R33	R34
AP01	10318	10325	10417	10396	10553	10542	10672	10706	10647	9793	8733	8381	11897	12212	12500	12475	12560
AP02	9354	9361	9451	9428	9586	9571	9703	9736	9675	8816	7735	7349	10877	11190	11478	11452	11538
AP03	11605	11612	11691	11656	11809	11779	11911	11942	11871	11008	9821	9014	12632	12912	13181	13147	13234
AP04	10184	10191	10268	10232	10384	10352	10484	10515	10443	9582	8388	7565	11184	11464	11733	11700	11787
AP05	9353	9360	9440	9406	9559	9531	9663	9694	9624	8759	7580	6843	10465	10754	11029	10997	11084
AP06	7656	7664	7740	7703	7855	7822	7954	7985	7913	7052	5857	5080	8701	8991	9266	9234	9321
AP07	2150	2157	2233	2196	2349	2319	2452	2483	2413	1548	460	1600	3742	4074	4367	4351	4430
AP08	1468	1475	1552	1517	1670	1644	1776	1808	1741	874	479	1998	3276	3610	3898	3888	3962
AP09	403	406	411	353	465	413	539	567	491	397	1571	2826	2361	2677	2943	2944	3006
AP10	3410	3415	3443	3387	3494	3431	3539	3558	3477	2815	1831	357	3592	3864	4131	4098	4184
AP11	4262	4266	4286	4227	4322	4255	4353	4368	4289	3690	2755	1262	4017	4242	4479	4440	4524
AP12	4619	4621	4609	4548	4601	4525	4591	4596	4524	4160	3560	2339	3515	3646	3818	3773	3848
AP13	4306	4307	4277	4217	4241	4164	4207	4206	4142	3943	3605	2696	2781	2865	3007	2961	3030
AP14	4250	4250	4201	4146	4137	4061	4078	4070	4017	4004	3930	3306	2256	2253	2333	2287	2344
AP15	3838	3837	3775	3724	3693	3620	3618	3605	3562	3682	3821	3478	1606	1564	1628	1582	1637
AP16	3417	3415	3341	3297	3240	3173	3149	3131	3100	3370	3736	3689	953	851	906	859	918

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.

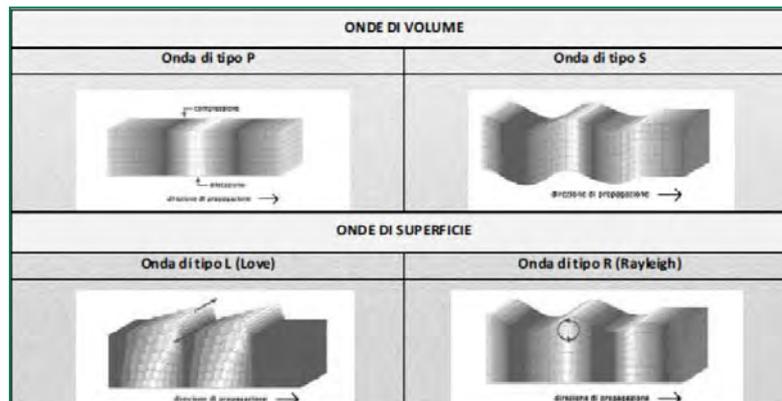


Figura 5: Differenti tipologie di onde di volume e superficie

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 una attenuazione dipendente da natura del terreno, frequenza del segnale, distanza tra sorgente e ricevitore.

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 6.

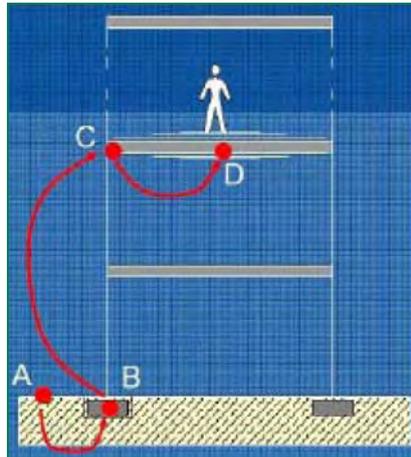


Figura 6: Schematizzazione semplificata della propagazione delle vibrazioni nel sistema terreno-edificio

Differenti tipologie di fondazioni forniscono diversi effetti di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio come evidenziato in Figura 7:

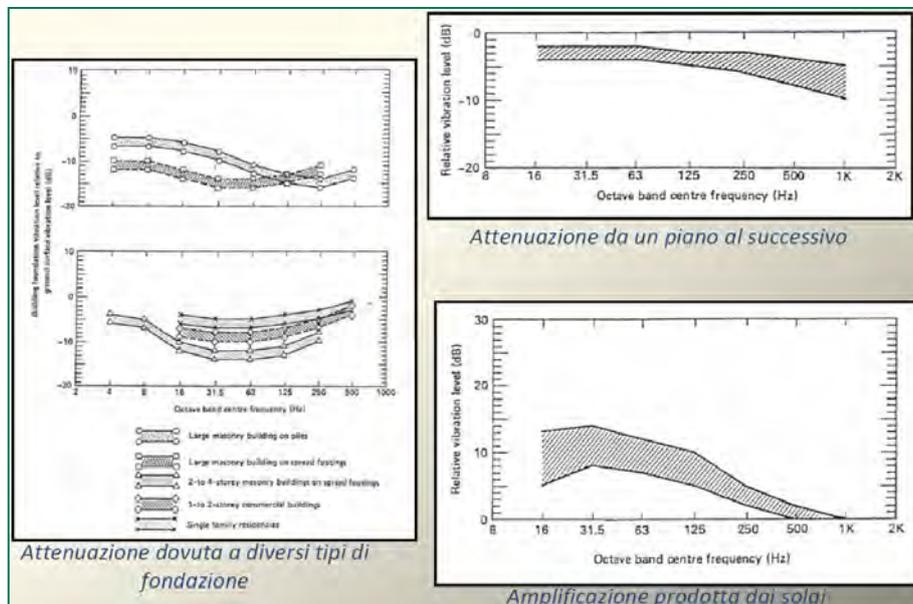


Figura 7: Esempi di attenuazione/amplificazione dei fenomeni vibratorii/oscillatori nei differenti elementi

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:

- 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, e con
- v_0 è indicato il valore di riferimento ($v_0 = 10^{-9}$ 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, e con
- 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 recettori (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 le installazioni di impianti eolici, ma 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 rallentamenti

(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 Recettori: 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 6: 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 e 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 particolarmente sensibili 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, implica necessariamente (o fornisce comunque sufficienti garanzie) perché non si verifichino 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 indicano sia con l’attenuazione delle vibrazioni (mezzo di propagazione) sia con l’amplificano del fenomeno e la seguente percezione della stessa (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 e la sensibilità delle strutture ricettive 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 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 7: 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); o 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 (recettori sensibili) 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 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 9 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 8: Dati e parametri input per il calcolo quantitativo 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 9: 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)	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 8 mostra la curva di smorzamento del fenomeno vibratorio lungo gli assi x e y in riferimento alla distanza dalla sorgente.

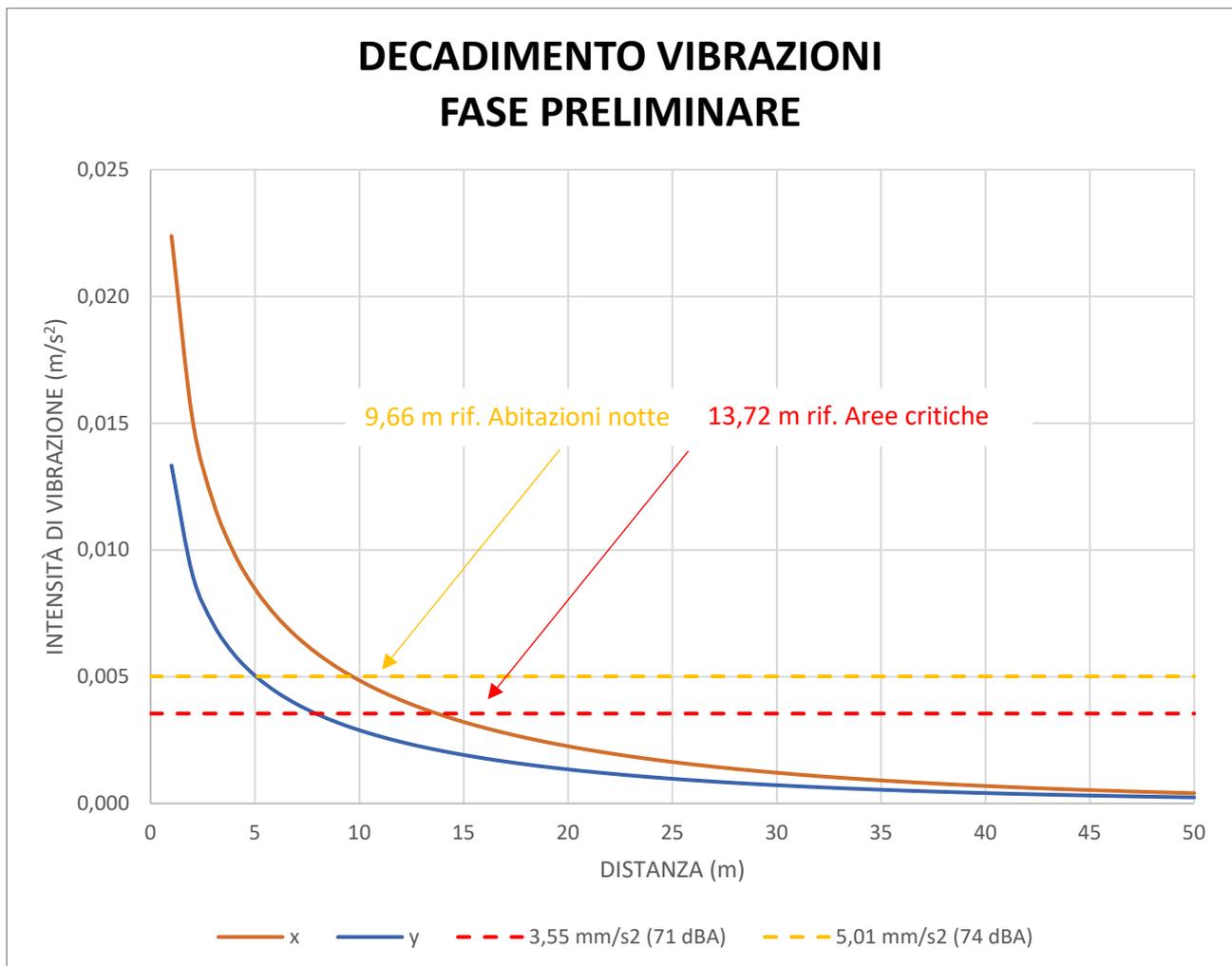


Figura 8: Decadimento delle vibrazioni in fase preliminare.

Da quanto mostrato in Tabella 9 e Figura 8 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. 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 installazione degli aerogeneratori. Trattasi fundamentalmente di attività di scavo, sbancamento, trasporto e stoccaggio del materiale che naturalmente di mezzi adeguati necessitano che seppur in modo contenuto, generano vibrazioni di livello diverso in virtù dei mezzi e 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) cui le turbine, e quindi la maggior parte del fronte di cantiere 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 ricettive 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

PAF

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 relazione non riepiloga di eventuali modifiche e/o aggiornamenti accettati dal costruttore.)

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: Terrreno 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 _{wv max} 0,8 m/s ²

Figura 9: 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 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 10 e Tabella 11 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 10: 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 11: 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 10 e Tabella 11, 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 50,5 m.

CODICE	EO.APR01.PD.VB.01
REVISIONE n.	00
DATA REVISIONE	24/09/2021
PAGINA	31 di 32

5 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 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 di qualsiasi natura posti nell'intorno delle aree di progetto e considerati come recettori.

I risultati delle simulazioni di tipo previsionale hanno dimostrato che, sulla base delle assunzioni esplicitate, già a distanze di circa 13,72 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 producono 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.

6 BIBLIOGRAFIA

ISO 2631 - Guida per la valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni su tutto il corpo.

UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo", 1990.

UNI 9916:2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", 2014.

Anderson, J.S.; Solving problems in vibrations; London, Longman Scientific & Technical, 1987

Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 2000

Di Colin H. Hansen, Con J. Doolan, Kristy L. Hansen; Wind Farm Noise: Measurement, Assessment, and Control.

Styles P., England R., Stimpson I., Toon S., Bowers D. and Hayes M. 2005a A detailed study of the propagation and modelling of the effects of low frequency seismic vibration and infrasound from wind turbines. First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control, Berlin, Germany.