



Regione Puglia
 Provincia di Foggia
 Comuni di Sant'Agata di Puglia e Accadia



Proposta di ammodernamento complessivo (“repowering”) del “Parco Eolico Sant’Agata” esistente da 72MW, con smantellamento degli attuali 36 aerogeneratori e sostituzione in riduzione degli stessi con l’installazione di 17 aerogeneratori, per una potenza totale definitiva di 115,6 MW

Titolo:

1MTGFJ4_DocumentazioneSpecialistica_19

Analisi previsionale e stima dei livelli di vibrazione nelle fasi di realizzazione e dismissione delle opere

Numero documento:

Commissa						Fase	Tipo doc.	Prog. doc.				Rev.	
2	2	4	3	0	2	D	R	0	4	1	1	0	0

Proponente:

FRI-EL

FRI-EL S.AGATA S.R.L.
 Piazza del Grano 3
 39100 Bolzano (BZ)
fri-el_s.agata@legalmail.it
 P. Iva/Cod. Fisc. 02380420212

PROGETTO DEFINITIVO

Progettazione:



PROGETTO ENERGIA S.R.L.
 Via Cardito, 202 | 83031 | Ariano Irpino (AV)
 Tel. +39 0825 891313
www.progettoenergia.biz | info@progettoenergia.biz

SERVIZI DI INGEGNERIA INTEGRATI
 INTEGRATED ENGINEERING SERVICES



Progettista:

Ing. Massimo Lo Russo



Sul presente documento sussiste il DIRITTO di PROPRIETA'. Qualsiasi utilizzo non preventivamente autorizzato sarà perseguito ai sensi della normativa vigente

REVISIONI	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
	00	04.07.2023	Riscontro nota CVTA/6348 del 30/05/2023	A. FIORENTINO	D. LO RUSSO	M. LO RUSSO

INDICE

1. SCOPO	3
2. DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO EOLICO ESISTENTE DA DISMETTERE	3
2.1. CONSISTENZA ED UBICAZIONE DELL'IMPIANTO EOLICO ESISTENTE	3
2.2. PARERI ACQUISITI IN AUTORIZZAZIONE	6
3. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO D'AMMODERNAMENTO	6
3.1. CONSISTENZA ED UBICAZIONE DEL PROGETTO D'AMMODERNAMENTO	6
4. COMPONENTE VIBRAZIONI	8
4.1. RIFERIMENTI NORMATIVI	8
4.2. METODOLOGIA	12
4.2.1. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	13
4.2.2. SORGENTI DI VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE (COSTRUZIONE E DISMISSIONE)	15
4.2.3. PROPRIETA' MECCANICHE DEL TERRENO	16
4.2.4. VALUTAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI _Fase di Cantiere	17
4.2.4.1. Propagazione delle vibrazioni indotte da un autocarro	18
4.2.4.2. Propagazione delle vibrazioni indotte da un rullo vibrante	19
4.2.4.3. Propagazione delle vibrazioni indotte da una pala cingolata	19
4.2.4.4. Propagazione delle vibrazioni indotte da una pala gommata	20
4.2.5. SORGENTI DI VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO	21
5. MISURE MITIGATIVE	21
6. CONCLUSIONI	22

1. SCOPO

Scopo del presente documento è una analisi tecnica documentale che attesti una stima dei livelli vibrazionali previsti nella fase di cantiere e d'esercizio della proposta di ammodernamento complessivo ("repowering") del "Parco Eolico Sant'Agata" esistente da 72MW, con smantellamento degli attuali 36 aerogeneratori e sostituzione in riduzione degli stessi con l'installazione di 17 aerogeneratori, per una potenza totale definitiva di 115,6 MW, in riscontro a quanto richiesto con nota n.6348 della Commissione Tecnica PNRR-PNIEC del 30/05/2023.

2. DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO EOLICO ESISTENTE DA DISMETTERE

2.1. CONSISTENZA ED UBICAZIONE DELL'IMPIANTO EOLICO ESISTENTE

L'impianto esistente "Parco Eolico Sant'Agata", di proprietà della società Fri-El S.p.A., è costituito da 36 aerogeneratori, ciascuno con potenza di 2 MW (Vestas V80 altezza al mozzo pari a 67 m), per una potenza totale di impianto pari a 72 MW, diviso in due sottocampi. In particolare, il Parco eolico (aerogeneratori, piazzole e viabilità d'accesso agli aerogeneratori) ricade interamente nel Comune di Sant'Agata di Puglia (FG) mentre il cavidotto MT attraversa anche il Comune di Accadia (FG) per collegare il suddetto impianto alla stazione elettrica di utenza 150/30 kV, a sua volta connessa alla Rete Elettrica Nazionale mediante connessione con uno stallo a 150 kV alla Stazione RTN di smistamento 150 kV, ubicata nel Comune di Accadia (FG).

Entrando più nel dettaglio, il Parco Eolico in oggetto è localizzato sul territorio del Comune di Sant'Agata di Puglia in due località separate e distinte.

L'"Impianto Palino", sito in località Ciommarino – Viticone – Palino, costituito originariamente da 20 aerogeneratori ed ora da 11, è localizzato tra Nord - Nord Est ed Est - Nord Est dall'abitato di Sant'Agata di Puglia, separato da quest'ultima dai rilievi Mariconda e Serra Pomezio che si sovrappongono tra l'impianto e l'abitato. Il parco è limitrofo ai confini di Deliceto e Candela ed è posto su di una porzione della vallata Viticone – Palino in prossimità della S.P. Sant'Agata di Puglia – Foggia, ad un'altitudine media di 320 m s.l.m.

L'"Impianto Piano d'Olivola", sito in località Piano d'Olivola – Pezza del Tesoro, costituito originariamente da 16 aerogeneratori ed ora da 6, è localizzato tra Ovest - sud Ovest e Sud - Sud Ovest dall'abitato di Sant'Agata di Puglia. Il parco è limitrofo al confine del comune di Accadia ed è situato nella vallata Pezza del Tesoro in prossimità della Strada Comunale Pierci – Pietrapone, ad un'altitudine media di 570 m s.l.m.

La Stazione Elettrica d'Utenza, l'impianto d'utenza e di rete per la connessione sono localizzati nel Comune di Accadia in direzione Nord-Ovest ad oltre 2 km dall'abitato, ad un'altitudine di circa 800 m s.l.m.



Figura 1 – Stralcio della planimetria con individuazione dell'impianto eolico esistente "Impianto Palino" su ortofoto



Figura 2 – Stralcio della planimetria con individuazione dell'impianto eolico esistente "Impianto Piano d'Olivola" su ortofoto



Figura 3 – Stralcio della planimetria con individuazione delle opere di connessione su ortofoto

2.2. PARERI ACQUISITI IN AUTORIZZAZIONE

- ✓ Determinazione del Dirigente del Settore Ecologia della Regione Puglia n.185 del 23/06/2003 e Parere favorevole ai fini della Valutazione d'Incidenza _ Regione Puglia, Assessorato all'Ecologia – Settore Ecologia Ufficio Parchi e Riserve Naturali, Prot. n. 8045 del 01/07/2005;
- ✓ Permesso di Costruire n.24 del 16/12/2003 e n.4667 del 20/06/2005 del Comune di Sant'Agata di Puglia (FG);
- ✓ Permesso Costruire n. 2 del 13/04/2005 del Comune di Accadia (FG);
- ✓ Nulla Osta per Vincolo Idrogeologico _ Ispettorato Ripartimentale delle Foreste di Foggia, Determinazione n.265 del 13/05/2005;
- ✓ Concessioni S.P. _ Provincia di Foggia, Servizio Progettazione Manutenzione Gestione Strade Ufficio Concessione, Prot. n. 15294, Concessioni n. 70-71-72-73-74, del 14/03/05;
- ✓ Nulla Osta_Soprintendenza per i beni architettonici e per il Paesaggio della Puglia _ Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio della Puglia – BARI – Prot. n. 9584 del 18/05/2004;
- ✓ Attestazione Deposito Genio Civile _ Struttura Tecnica Periferica Regionale (Genio Civile) di Foggia, Prot. n. 8547 e 8543 del 10/06/2005.
- ✓ Nulla-Osta del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Prot. 1B/1597 del 17 maggio 2004 e Prot. 1B/7039 (30kV) del 02 novembre 2004.

3. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO D'AMMODERNAMENTO

3.1. CONSISTENZA ED UBICAZIONE DEL PROGETTO D'AMMODERNAMENTO

Il Progetto di ammodernamento è realizzato nell'ambito dello stesso sito in cui è localizzato l'impianto autorizzato ed in esercizio "Parco Eolico Sant'Agata", dove per stesso sito si fa riferimento alla definizione introdotta dall'art. 32, comma 1 del D.L. n.77/2021 che aggiunge il comma 3-bis all'art. 5 del D. Lgs. N. 28/2011.

In particolare, il Parco eolico (aerogeneratori, piazzole e viabilità d'accesso agli aerogeneratori) ricade interamente nel Comune di Sant'Agata di Puglia (FG) mentre il cavidotto MT attraversa anche il Comune di Accadia (FG) per collegare il suddetto impianto alla stazione elettrica di utenza 150/30kV, a sua volta connessa alla Rete Elettrica Nazionale mediante connessione con uno stallo a 150 KV alla Stazione RTN di smistamento 150kV, ubicata nel Comune di Accadia (FG).

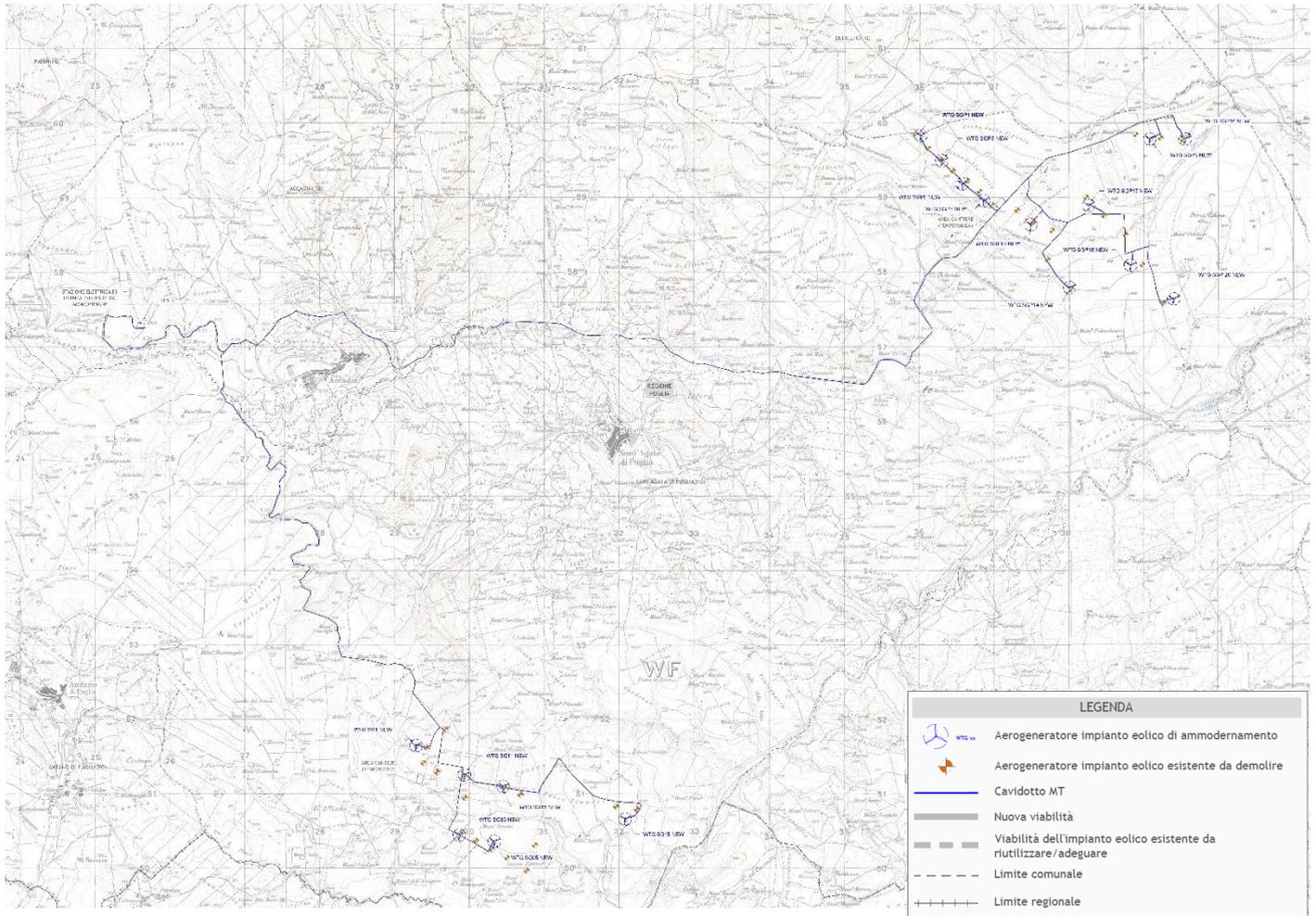


Figura 4 – Corografia d'inquadramento

L' Impianto eolico esistente e il progetto di ammodernamento ricadono all'interno dei comuni di Sant'Agata di Puglia (FG) e Accadia (FG) sulle seguenti particelle catastali:

- **Sant'Agata di Puglia (FG):** Foglio 9 particelle 216, 213, 61, 321, 218, 57, 146; Foglio 10 particelle 227, 226, 228, 120, 121, 265, 266, 230, 129, 229, 231, 222, 221, 146, 284, 225, 85, 190, 86; Foglio 11 particelle 380, 377, 284, 283, 397, 414, 375, 376, 378, 379, 164, 163, 131, 395, 132, 130, 128, 229, 147, 127, 257, 258, 126, 125, 124, 123, 122, 192, 939, 938, 386, 385, 214, 2, 265, 259, 170, 260, 409, 406, 232, 5127, 235, 276, 383, 34, 223, 219; Foglio 12 particelle 226, 263, 113, 161, 67, 445, 433, 66, 65, 58, 57, 56, 435, 436, 54, 446, 39, 431, 41, 42, 43, 44, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 222, 52, 53, 101, 107, 361, 362, 313, 319, 320, 231, 16, 116, 123, 247, 185, 411; Foglio 13 particelle 68, 69, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 225, 229, 232; Foglio 15 particelle 40, 45; Foglio 47 particelle 128, 129, 440, 415, 9, 414, 3; Foglio 48 particelle 180, 179, 200, 199, 235, 194, 25, 190, 6, 228, 177; Foglio 67 particelle 202, 204, 68, 195, 395, 112, 113, 114, 168, 396, 296, 164, 338, 429, 130, 129, 128, 59, 136; Foglio 71 particelle 29, 568, 551, 45, 46, 371, 249, 250, 331, 251, 252, 332, 373, 375, 377, 379, 381, 560, 574, 562, 387, 389, 388, 386, 384, 382, 54, 58, 255, 59, 60, 123, 61, 523, 566, 433, 323, 431, 324, 325, 402, 403, 240, x3, 405, 404, 326, 505, 506, 269, 65, 579, 580, 117, 559, 241, 67, 558, 19, 334, 63, 90; Foglio 72 particelle 46, 146, 47, 48, 144, 145, 50, 51, 52, 131, 65, 66, 129, 58, 130, 116, 85, 117, 76, 96, 137, 135, 136, 138; Foglio 73 particelle 33, 34, 49, 41, 35, 36, 44, 37, 89, 88, 31, 30, 74; Foglio 74 particelle 9, 8, 55, 67, 63, 52; Foglio 78 particelle 22, 631, 55, 621, 724, 1, 474;

- *Accadia (FG): Foglio 16 particelle 194, 199, 187, 188, 137, 138; Foglio 21 particelle 89, 88; Foglio 22 particelle 304, 194, 92, 308, 307, 224, 193, 303, 266, 257, 49, 45, 46, 44; Foglio 27 particelle 17; Foglio 28 particelle 166, 163, 1541, 616, 123, 10;*
- *Deliceto (FG): Foglio 40 particelle 60, 61, 62, 63;*

Si riportano di seguito le coordinate in formato UTM (WGS84) del **progetto di ammodernamento** con i fogli e le particelle in cui ricade la fondazione degli aerogeneratori:

AEROGENERATORE	COORDINATE AEROGENERATORE UTM (WGS84) - FUSO 33		Identificativo catastale		
	Long. E [m]	Lat. N [m]	Comune	Foglio	Particella
WTG SGP1NEW	535.952,0	4.559.648,0	Sant'Agata di Puglia	10	121
WTG SGP3NEW	536.234,5	4.559.307,3	Sant'Agata di Puglia	10	229
WTG SGP5NEW	536.508,7	4.558.998,1	Sant'Agata di Puglia	10	221
WTG SGP7NEW	536.791,5	4.558.771,0	Sant'Agata di Puglia	10	284
WTG SGP8NEW	539.010,0	4.559.598,5	Sant'Agata di Puglia	11	128
WTG SGP10NEW	539.481,1	4.559.599,4	Sant'Agata di Puglia	11	397
WTG SGP12NEW	537.421,8	4.558.449,8	Sant'Agata di Puglia	11	385
WTG SGP14NEW	537.940,0	4.557.605,0	Sant'Agata di Puglia	12	433
WTG SGP17NEW	538.191,0	4.558.710,0	Sant'Agata di Puglia	11	276-383
WTG SGP18NEW	538.753,0	4.557.903,0	Sant'Agata di Puglia	12	93-94
WTG SGP20NEW	539.328,0	4.557.453,0	Sant'Agata di Puglia	13	72-229
WTG SG01NEW	529.214,8	4.551.457,5	Sant'Agata di Puglia	67	395
WTG SG03NEW	529.792,5	4.550.256,4	Sant'Agata di Puglia	71	560-562
WTG SG05NEW	530.259,6	4.550.173,3	Sant'Agata di Puglia	71	558
WTG SG11NEW	529.864,0	4.551.068,0	Sant'Agata di Puglia	72	50-144
WTG SG13NEW	530.375,9	4.550.907,6	Sant'Agata di Puglia	73	88
WTG SG15NEW	532.005,2	4.550.472,5	Sant'Agata di Puglia	71	568

4. COMPONENTE VIBRAZIONI

4.1. RIFERIMENTI NORMATIVI

In materia di vibrazioni risulta assente una normativa italiana di settore, perciò è necessario prendere come riferimento gli standard tecnici quali Norme UNI o Norme ISO:

- UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
- UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni negli edifici";
- ISO 2631/1 e 2631/2 "Evaluation of human exposure to whole-body vibration".

Il problema della percezione umana alle vibrazioni in termini di limiti di danno sono trattati negli allegati della norma UNI 9916, e risultano più elevati, a ciascuna frequenza, dei limiti di percezione individuati dalla norma UNI 9614.

A questo proposito, la sensibilità umana è variabile con la frequenza, e dipende dall'asse cartesiano considerato rispetto al riferimento relativo al corpo umano. Le curve di sensibilità umana sono codificate dalla norma tecnica UNI 9614, rispetto ai sistemi di riferimento per persone sdraiate, sedute o in piedi, riportato nelle seguenti figure:

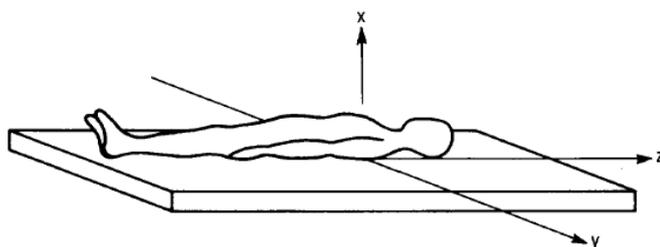


Figura 5 – Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata

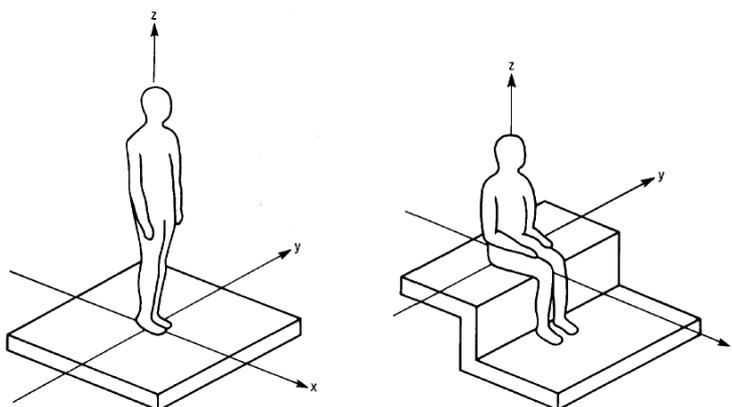


Figura 6– Sistema cartesiano di riferimento per persona in piedi o seduta

Nel caso considerato, tuttavia, la popolazione si troverà esposta indifferentemente su uno dei tre assi, a seconda della giacitura dei soggetti, che è ovviamente non predeterminabile e variabile nel corso delle 24 ore.

In tali casi, la norma UNI9614 prevede l'impiego di una curva di ponderazione per asse generico (o meglio, per asse non definibile), che è riportata nella seguente figura.

Correzione per sensibilità umana alle vibrazioni secondo UNI9614 - postura generica

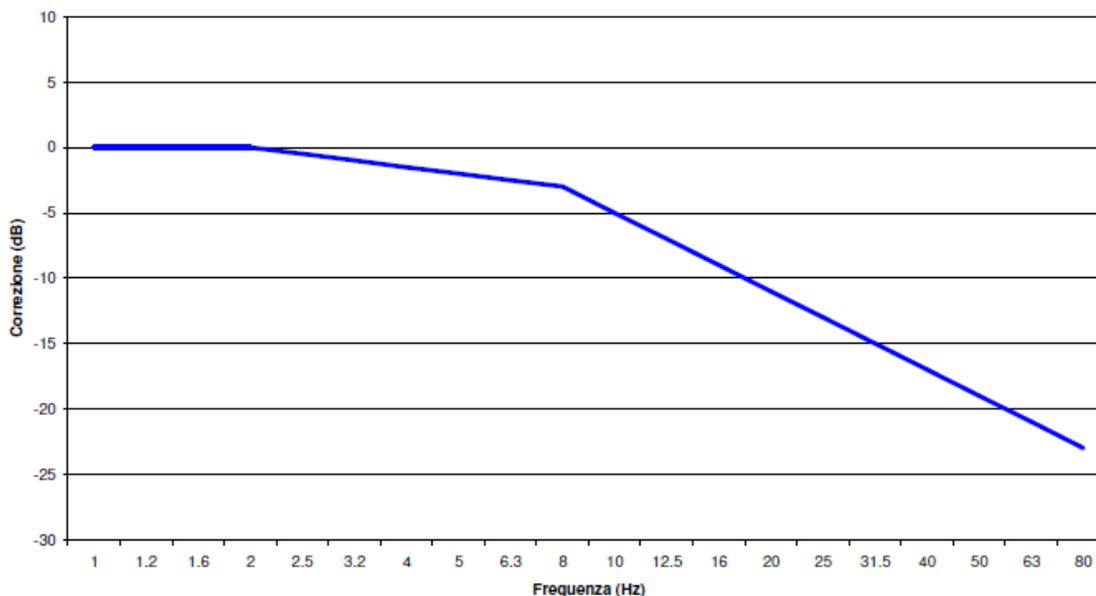


Figura 7– Curva di ponderazione asse generico

Le caratteristiche fisiche del sistema che possono influenzare le vibrazioni nel terreno sono:

Tipologia di sorgenti e alla modalità di esercizio: questa categoria include tutti i parametri collegati ai mezzi di escavazione e sbancamento del materiale. Le attività connesse alla fase di escavazione, movimento terra generano livelli vibratori di vari gradi in relazione ai macchinari e ai mezzi impiegati. Le attività che tipicamente generano livelli di vibrazioni pericolosi sono associate all'uso di esplosivi e attrezzature d'impatto (battipalo o martellone).

Tipologia e stato dell'Edificio Ricettore: i problemi legati alla vibrazione via terra si hanno quasi esclusivamente all'interno degli edifici. Quindi le caratteristiche della struttura ricevente sono fondamentali nella comprensione e nella valutazione delle vibrazioni.

Geologia e stratigrafie del sottosuolo: le condizioni del terreno hanno una forte influenza sui livelli vibratori, in particolare la rigidità e lo smorzamento interno del terreno e la profondità del letto roccioso. Fattori quali la stratificazione del terreno e la profondità delle falde acquifere possono avere effetti significativi sulla propagazione delle vibrazioni via terra.

Effetti delle vibrazioni sulle persone

La Norma UNI 9614, prescindendo da considerazioni delle caratteristiche dei singoli fabbricati quali, ad esempio, lo stato di conservazione e la tipologia costruttiva dell'immobile, assegna una classificazione di sensibilità dei ricettori adiacenti alle sorgenti. Le classi di sensibilità sono definite sulla base della destinazione d'uso dell'immobile, come da successiva tabella.

Tabella 1: Classificazione degli edifici ricettori per destinazione d'uso (UNI 9614:1990)

n.	Destinazione d'uso	Classe di sensibilità
1	Aree critiche *	ALTA
2	Abitazioni	MEDIA
3	Uffici	BASSA
4	Fabbriche ed altre aree	BASSA

* : con aree critiche si intendono le aree archeologiche di importanza storico-monumentale, le infrastrutture sanitarie, i fabbricati scolastici di qualsiasi genere nonché le attività industriali che impiegano macchinari di precisione.

La stessa norma, al punto 5, stabilisce quale soglia di percezione delle vibrazioni i seguenti valori:

– 5 mm/sec² (74 dB) per l'asse z;

– 3,6 mm/sec² (71 dB) per gli assi x e y.

Ancora la norma UNI, al punto A1 dell'appendice A, ai fini della valutazione del disturbo dovuto a vibrazioni, indica dei limiti per le accelerazioni con riferimento alla tollerabilità a fenomeni vibratorii, per i diversi assi e per le 4 classi di edifici:

Tabella 2: Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse z.

Ricettore	a (m/s ²)	L (dB)
aree critiche	5.0 10 ⁻³	74
Abitazioni (notte)	7.0 10 ⁻³	77
Abitazioni (giorno)	10.0 10 ⁻³	80
Uffici	20.0 10 ⁻³	86
Fabbriche	40.0 10 ⁻³	92

Tabella 3: Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per gli assi x e y.

Ricettore	a (m/s ²)	L (dB)
aree critiche	3.6 10 ⁻³	71
abitazioni (notte)	5.0 10 ⁻³	74
abitazioni (giorno)	7.2 10 ⁻³	77
Uffici	14.4 10 ⁻³	83
Fabbriche	28.8 10 ⁻³	89

La norma UNI9614 definisce infine il valore numerico del limite di accettabilità per **edifici residenziali**, corrispondente ad un valore del livello di accelerazione complessiva, ponderata secondo asse generico, pari a **74 dB** per il periodo notturno. La norma stabilisce inoltre che, per edifici residenziali, nel periodo diurno sono ammissibili livelli di vibrazioni superiori (**77 dB** anziché 74).

Tale limite è da intendersi riferito al livello di accelerazione (ponderata per asse generico) rilevata sul pavimento degli edifici, quindi alla presenza dei fenomeni di attenuazione/amplificazione propri dell'edificio stesso.

I livelli di accelerazione al suolo tali da non indurre il superamento del valore limite all'interno degli edifici dovranno essere più bassi di alcuni dB (tipicamente 5).

Concludendo il limite di accettabilità per edifici ad uso residenziale, nel seguito considerati **recettori sensibili**, considerato che le lavorazioni saranno effettuate esclusivamente nel periodo diurno, è cautelativamente posto pari a **72 dB**.

Effetti delle vibrazioni sugli edifici

Il riferimento adottato per la verifica del livello di vibrazione indotto dalle attività di cantiere rispetto ai limiti di danneggiamento delle strutture, è la normativa UNI 9916. Tale normativa recepisce ed è in sostanziale accordo con la normativa internazionale ISO 4866.

In accordo con tali normative, l'effetto della vibrazione sulle strutture viene valutato in termini di velocità di picco (PPV, Peak Particle Velocity), misurata in mm/s. A seconda del tipo di struttura considerato vengono assegnati i valori limite della PPV in funzione della frequenza considerata, secondo quanto riportato nella seguente.

Categoria	Tipi di strutture	Velocità di vibrazione alla fondazione in mm/s		
		Campi di frequenza [Hz]		
		< 10	10-50	> 50
1	Edifici utilizzati per scopi commerciali, edifici industriali e simili	20	20-40	40-50
2	Edifici residenziali	5	5-15	15-20
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3-8	8-10

Tabella 1 – Valori limite di vibrazione per effetti sugli edifici (UNI 9916)

In generale il rispetto dei limiti di disturbo vibrotattile alle persone garantisce anche di non avere effetti dannosi per le strutture edilizie.

4.2. METODOLOGIA

Il fenomeno delle vibrazioni è stato analizzato per i moti delle strutture edili con frequenze comprese fra 1 e 80 Hz. La caratterizzazione è effettuata in termini di valore medio efficace (RMS) della velocità (mm/s) e dell'accelerazione (in mm/s²): la velocità è il parametro per valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici, mentre l'accelerazione è quello per valutare la percezione umana. Per la misurazione delle vibrazioni, si utilizzano normalmente accelerometri, che ovviamente forniscono il livello di accelerazione.

I valori dell'accelerazione "a" sono poi agevolmente trasformabili nei corrispondenti valori di velocità "v", nota la frequenza "f", tramite la relazione:

$$v = \frac{a}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Convenzionalmente, in analogia con le analisi del rumore, i valori di velocità dell'accelerazione sono valutabili sulla scala dei dB, tramite le relazioni:

$$L_{acc} = 20 \cdot \lg \left[\frac{a}{a_0} \right] \qquad L_{vel} = 20 \cdot \lg \left[\frac{v}{v_0} \right]$$

Nelle quali i valori di riferimento sono **a₀ = 0.001 mm/s²** e **v₀ = 1·10⁻⁶ mm/s**.

Va osservato che un determinato evento vibratorio dà luogo, in generale, a valori in dB di accelerazione e velocità del tutto diversi, in funzione dalle frequenze interessate.

Il passaggio continuo di veicoli sopra la viabilità stradale o l'uso di benne escavatrici è fonte d'emissione di vibrazioni nel terreno circostante. Esse possono propagarsi agli edifici situati entro distanze limitate in relazione alla natura del terreno o suolo e dai livelli di vibrazione indotti sul pavimento stradale.

L'origine fisica del fenomeno è la stessa che causa l'emissione primaria di rumore.

L'eccitazione è principalmente in senso verticale, ma nel corso della propagazione nel terreno e dell'interazione con gli edifici possono svilupparsi rilevanti componenti di movimento anche in senso orizzontale.

4.2.1. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO

Le vibrazioni si propagano nel terreno circostante, alla zona della sorgente, subendo un'attenuazione dipendente dalla natura del terreno, dalla frequenza del segnale, e dalla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto.

Si deve distinguere tra tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale:

- a) Onde di compressione (onda P)
- b) Onde di taglio (onda S)
- c) Onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L)

I primi due tipi sono onde di volume ("body-waves"), mentre le onde di superficie, come dice il nome, si propagano sull'interfaccia fra due strati con diverse proprietà meccaniche, principalmente quindi sulla superficie di separazione fra terreno ed aria. La seguente figura mostra schematicamente i diversi tipi di onde.

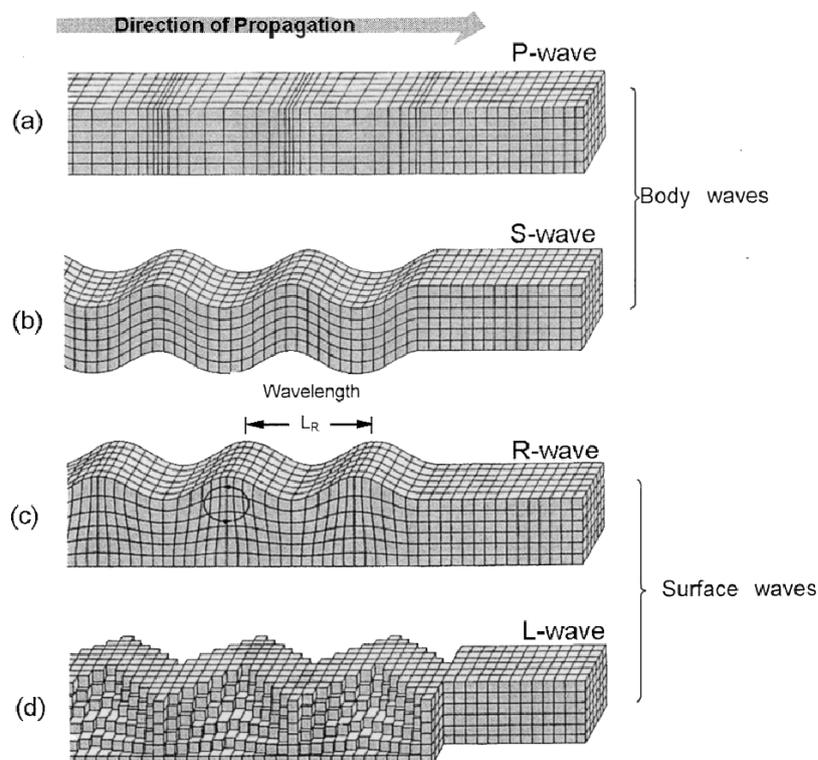


Figura 8– Vari tipi di onde di volume e di superficie.

Va anche osservato che il tipo d) (onde L) non è facilmente eccitato dal transito veicolare, in quanto richiederebbe l'imposizione di moti orizzontali alla fonte delle vibrazioni. Nella pratica, in caso di fondazioni dirette (plinto di fondazione, o nel caso dei viadotti con fondazioni superficiali dirette), si può ritenere un predominio delle onde di superficie, in particolare di tipo R che corrono sull'interfaccia suolo-aria. Nel caso invece di fondazioni profonde (ad es. Pali) si hanno anche onde di compressione e di taglio e le onde di superficie R tendono a correre sulle superfici di separazione fra strati diversi del terreno.

Va inoltre osservato che la velocità di propagazione dei diversi tipi di onde non è la stessa: le onde di compressione (onde P) sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie viaggiano con velocità più basse, in dipendenza del valore del modulo di Poisson del terreno.

Il modello di propagazione impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) è basato sulla seguente formulazione:

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

dove:

$a(d_0, f)$ = valore dell'accelerazione alla distanza di riferimento d_0 e alla frequenza considerata

η = fattore di perdita del terreno;

c = velocità di propagazione in m/s

f = frequenza in Hz;

d = distanza in m;

d_0 = distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

L'esponente "n" varia secondo il tipo di onda e di sorgente di vibrazioni.

Tabella 4: Valori del coefficiente di attenuazione in relazioni ai vari tipi di onde
Values of attenuation coefficient due to radiation damping for various combinations of source location and type (from Ref. [9])

Source location	Source type	Induced wave	n
Surface	Point	Body wave	2.0
		Surface wave	0.5
	Infinite line	Body wave	1
		Surface wave	0
In-depth	Point	Body wave	1.0
	Infinite line		0.5

La propagazione delle onde vibrazionali è modellata adottando le seguenti ipotesi:

- La zona di cantiere (in cui è previsto l'allestimento del cantiere, l'adeguamento delle strade esistenti e la realizzazione di nuove strade, la dismissione dell'impianto eolico esistente, la realizzazione delle piazzole di montaggio degli aerogeneratori, la realizzazione delle fondazioni, il trasporto degli aerogeneratori ed il successivo montaggio, la sostituzione dei cavidotti interrati e gli interventi di adeguamento della stazione elettrica d'utenza) è considerata come **una sorgente emittente** la cui lunghezza corrisponde alla lunghezza dei mezzi d'opera utilizzati nelle varie fasi lavorative;

- la propagazione dell'energia vibrazionale avviene sulla superficie del suolo per mezzo di onde di Rayleigh, la cui ampiezza decresce esponenzialmente in direzione verticale, perpendicolarmente alla superficie del suolo. L'effetto delle onde primarie, secondarie e di Love è trascurato;

- Ogni sorgente emette energia vibrazionale in superficie in modo omnidirezionale.

Sulla base di quanto affermato emerge che le condizioni maggiormente critiche in termini di impatto da vibrazione si manifestano per sorgenti concentrate, con esponente $n = 0.5$ per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie), e $n = 1$ per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda, come nel caso di fondazione su pali).

Emerge quindi che la propagazione delle vibrazioni, a partire da una sorgente posta in profondità, è dotata, anche nel caso di terreno omogeneo, di una più rapida attenuazione al crescere della distanza dalla sorgente medesima.

Il termine esponenziale $e^{-2\pi \cdot f \cdot \eta / c \cdot (d-d_0)}$ descrive il fenomeno di dissipazione energetica in calore, che cresce proporzionalmente alla frequenza. In altri termini le vibrazioni alle alte frequenze si estinguono dopo un breve percorso, mentre quelle alle frequenze più basse si propagano a distanze maggiori.

Il rapporto η/c dipende dal tipo di terreno, ed assume valori elevati nel caso di suoli soffici, mentre assume valori molto modesti nel caso di pavimentazioni rigide in CLS.

Quindi si evince che nei terreni più soffici l'attenuazione intrinseca del mezzo di propagazione è maggiore di quella nelle rocce compatte; le frequenze più alte, inoltre, sono attenuate più di quelle basse (analogamente all'attraversamento di un mezzo fluido). La migliore propagazione delle vibrazioni (equivalente ad un'attenuazione molto bassa), pertanto, si ha in presenza di terreno rigido e a basse frequenze (in tal caso infatti il termine $f \cdot \eta/c$ assume valori bassi).

Tabella 5-Velocità di propagazione delle onde longitudinali e fattore di perdita per diversi tipi di terreno

Tipo di terreno	Velocità di propagazione onda longitudinale m/s	Fattore di perdita η	Massa volumica ρ (g/cm ³)
Roccia	3500	0.01	0,128472
Sabbia	600	0.10	0,083333
Argilla	1500	0.50	0,090278

4.2.2. SORGENTI DI VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE (COSTRUZIONE E DISMISSIONE)

Con fase di cantiere, si intendono 3 fasi dell'intero Progetto di ammodernamento: dismissione dell'impianto eolico esistente, realizzazione del nuovo impianto e dismissione futura dello stesso.

La dismissione dell'impianto eolico esistente comporterà in primo luogo l'adeguamento delle piazzole e della viabilità per poter allestire il cantiere, sia per la dismissione delle opere giunte a fine vita, sia per la costruzione del nuovo impianto; successivamente si procederà con lo smontaggio dei componenti dell'impianto ed infine con l'invio dei materiali residui a impianti autorizzati ad effettuare operazioni di recupero o smaltimento.

Non saranno oggetto di dismissione tutte le infrastrutture utili alla realizzazione del nuovo parco potenziato, come la viabilità esistente, le opere idrauliche ad essa connesse e le piazzole esistenti, nei casi in cui coincidano parzialmente con le nuove piazzole di montaggio. Anche la stazione elettrica d'utenza, l'impianto di utenza e di rete per la connessione non saranno oggetto di dismissione, a meno della sostituzione di un trasformatore all'interno della stazione elettrica d'utenza.

Tali lavorazioni richiedono l'impiego di mezzi d'opera quali sorgenti di vibrazioni nel terreno: autocarri, per l'allontanamento dei materiali di risulta; rullo vibrante; pale escavatrici cingolate, per l'esecuzione di scavi a sezione obbligatoria; pale meccaniche gommate, per movimenti terra ed operazioni di carico/scarico di materiali dismessi.

La seconda fase del progetto, che consiste nella realizzazione del nuovo impianto eolico, si svolgerà in parallelo con lo smantellamento dell'impianto eolico esistente.

L'intervento prevede l'installazione di 17 nuovi aerogeneratori di ultima generazione, con dimensione massima del diametro di 172 m e potenza massima pari a 6,8 MW ciascuno. La viabilità interna al sito sarà mantenuta il più possibile inalterata, in alcuni tratti saranno previsti solo degli interventi di adeguamento della sede stradale mentre in altri tratti verranno realizzati alcune piste ex novo, per garantire il trasporto delle nuove pale in sicurezza e limitare per quanto più possibile i movimenti terra. Sarà in ogni caso sempre seguito e assecondato lo sviluppo morfologico del territorio.

Sarà parte dell'intervento anche la posa del nuovo sistema di cavidotti interrati MT in sostituzione di quelli attualmente in esercizio e l'ammodernamento di due stalli trasformatori, con demolizione delle relative fondazioni e costruzione delle nuove per l'ubicazione dei trasformatori da 40/50MVA e le relative apparecchiature elettromeccaniche. Il tracciato di progetto, interamente interrato, seguirà principalmente il percorso del tracciato del cavidotto esistente, a meno di modeste variazioni.

Oltre ai veicoli per il normale trasporto giornaliero del personale di cantiere, saranno presenti in cantiere autogrù per la posa dei componenti degli aerogeneratori, macchinari battipalo e/o macchine perforatrici per i pali di fondazione aerogeneratori, mezzi pesanti per il trasporto dei materiali da costruzione e dei rifiuti, muletti per lo scarico e il trasporto interno del materiale, escavatori a benna per la realizzazione dei cavidotti.

Infine, per la dismissione futura del parco, si prevedono gli stessi mezzi utilizzati per la dismissione dell'impianto eolico esistente.

4.2.3. PROPRIETA' MECCANICHE DEL TERRENO

Dall'analisi delle conoscenze del professionista incaricato, così come analizzato dettagliatamente nelle Relazione Geologica e Geotecnica (cfr. 224302_D_R_0111 e 224302_D_R_0112), dal modello geologico e dalle indagini geotecniche in sito opportunamente eseguite, unitamente alle indagini reperite nelle immediate vicinanze, è stato possibile definire il modello geotecnico del sottosuolo.

In particolare sono stati definiti n. 2 modelli geotecnici:

Il primo, conseguito attraverso l'interpretazione ed analisi delle prove penetrometriche statiche CPT 01 e CPT 02, è stato attribuito alle aree di sedime che ospiteranno i nuovi aerogeneratori WTGSG01NEW - WTGSG03NEW - WTGSG05NEW - WTGSG11NEW - WTG SG13NEW - WTG SG15NEW.

Il secondo, ottenuto dalle risultanze delle prove penetrometriche dinamiche pesanti DPSH 01, DPSH 01 Bis, DPSH 02 e dalla prova penetrometrica CPT 03, racchiude le aree di sedime che ospiteranno i nuovi aerogeneratori WTG SGP1NEW - WTG SGP3NEW - WTG SGP5NEW - WTG SGP7NEW - WTG SGP8NEW - WTG SGP10NEW - WTG SGP12NEW - WTG SGP14NEW - WTG SGP17NEW - WTG SGP18NEW - WTG SGP20NEW.

Di seguito si riportano le tabelle con i parametri geotecnici medi dei due settori geotecnici individuati.

TABELLA PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI PRESENTI NEL SOTTOSUOLO

(aerogeneratori WTGSG01NEW - WTGSG03NEW - WTGSG05NEW - WTGSG11NEW - WTG SG13NEW - WTG SG15NEW)

Profondità dal piano campagna. (m)		Descrizione litologica (Formazione)	Resistenza alla punta CPT (Kg/cm ²)	Numero di Colpi N _{SP} (n.)	Peso di volume naturale g/cm ³	Peso di volume saturo g/cm ³	Angolo di attrito Picco (°)	Coesione non drenata Kg/cm ²	Modulo edometrico Kg/cm ²
Da	a								
0.00	6.00	Sabbie limose da sciolte a poco addensate.	15		1.60	1.80	24	0.60	40
6.00	8.00	Sabbie limose moderatamente addensate	25		1.70	1.90	26	1.00	70
8.00	12.00	Sabbie limoso argillose e argille limose moderatamente consistenti	60		1.90	2.00	30	2.50	150
12.00	20.00	Sabbie limoso argillose e argille limose consistenti con livelli arenacei da parzialmente cementati a cementati.	200		2.00	2.20	35	5.00	250
Vs eq: 366 m/sec Categoria di suolo: B Categoria topografica: T1									

TABELLA PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI PRESENTI NEL SOTTOSUOLO

(aerogeneratori WTG SGP1NEW - WTG SGP3NEW - WTG SGP5NEW - WTG SGP7NEW - WTG SGP8NEW - WTG SGP10NEW - WTG SGP12NEW - WTG SGP14NEW - WTG SGP17NEW - WTG SGP18NEW - WTG SGP20NEW)

Profondità dal piano campagna. (m)		Descrizione litologica (Formazione)	Resistenza alla punta CPT (Kg/cm ²)	Numero di Colpi N _{SP} (n.)	Peso di volume naturale g/cm ³	Peso di volume saturo g/cm ³	Angolo di attrito Picco (°)	Coesione non drenata Kg/cm ²	Modulo edometrico Kg/cm ²
Da	a								
0.00	3.00	Sabbie limose moderatamente addensate.		10	1.60	1.80	32	2.00	80
3.00	6.00	Sabbie limose argillose poco addensate		5	1.50	1.70	30	1.00	50
6.00	10.00	Sabbie limoso argillose e argille limose moderatamente addensate/consistenti		15	1.80	2.00	34	2.50	100
10.00	20.00	Sabbie limose passanti a ghiaie da parzialmente cementate a cementate con intercalazioni di livelli sabbiosi da poco a moderatamente addensati		40	1.90	2.20	36	5.00	200
Vs eq: 329 m/sec Categoria di suolo: C Categoria topografica: T1									

Per la caratterizzazione sismica dell'area interessata dalla realizzazione dell'impianto eolico e delle opere connesse sono state eseguite n° 2 indagini sismiche di tipo MASW, dalle quali emerge che le velocità delle onde di taglio sono compatibili con le litologie presenti con valori di V_{seq} attribuibili alle categorie di suolo C e B:

B – Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

C – Deposit di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

4.2.4. VALUTAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI _Fase di Cantiere

La valutazione della propagazione delle vibrazioni è sviluppata implementando la sorgente di vibrazione (mezzo di trasporto e/o di cantiere) definita nel precedente cap. 4.2.2 con i dati caratteristici delle onde di superficie relative alle tipologie di terreno affioranti (v. cap. 4.2.3).

Sulla base dell'utilizzo delle fonti dei dati, è stata derivata la legge di propagazione delle vibrazioni con la distanza.

4.2.4.1. Propagazione delle vibrazioni indotte da un autocarro

I dati di riferimento dei terreni affioranti stimati anche in riferimento ai dati reperibili dalla letteratura specializzata sono:

- velocità di propagazione delle onde di superficie: $V_R = c = 360 \text{ m/s}$ (dato ricavato dalle indagini geognostiche che catalogano il sottosuolo delle aree come terreni di tipo B e C di cui alle NTC-18)

* si consideri infatti che la velocità delle onde di superficie V_R è inferiore alla velocità delle onde di volume (V_s), per cui (specialmente se l'evento è distante) il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P ed S.

- fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.10$.

- a (d_0, f)= 10 mm/s² alla frequenza massima e distanza $d_0=10 \text{ m}$ dalla sorgente di emissione

Sulla base di tali dati, utilizzando lo spettro tipico di emissione del mezzo pesante a 10 m e la legge di propagazione tarati sperimentalmente, è possibile calcolare il livello ponderato di accelerazione da confrontare con i criteri di valutazione del disturbo degli edifici circostanti in base alla loro destinazione d'uso.

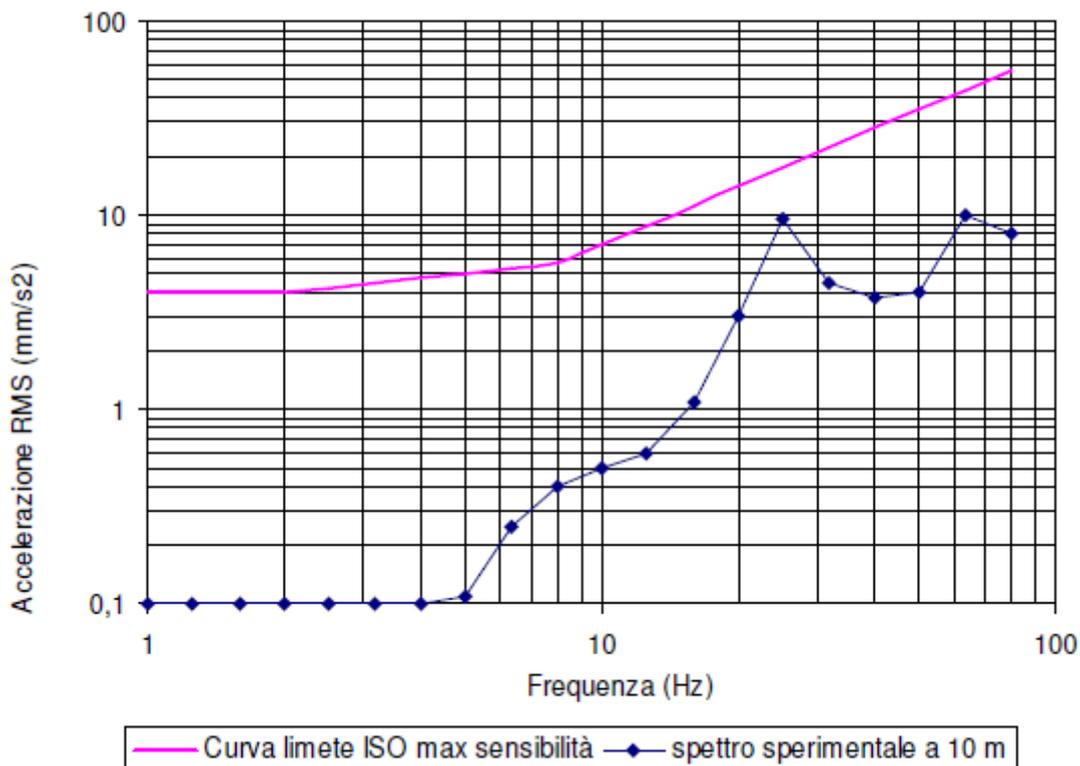


Figura 9 - Spettro di emissione della sorgente di un autocarro

Applicando la legge di variazione del livello di accelerazione, ponderata in funzione della distanza dalla sorgente di emissione della vibrazione, il valore della distanza dall'asse della sorgente a cui il limite prudenziale di **72 dB** è raggiunto, è di circa **22 m**.

Questo significa che tutti i recettori posti a distanze maggiori sono sicuramente esenti da ogni tipo di problematica vibrazionale.

4.2.4.2. Propagazione delle vibrazioni indotte da un rullo vibrante

I dati di riferimento dei terreni affioranti stimati anche in riferimento ai dati reperibili dalla letteratura specializzata sono:

- velocità di propagazione delle onde di superficie: $V_R = c = 360$ m/s
- fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.10$.
- $a(d_0, f) = 30$ mm/s² alla frequenza massima e distanza $d_0 = 10$ m dalla sorgente di emissione

Sulla base di tali dati, utilizzando lo spettro tipico di emissione del rullo vibrante e la legge di propagazione tarati sperimentalmente, è possibile calcolare il livello ponderato di accelerazione da confrontare con i criteri di valutazione del disturbo degli edifici circostanti in base alla loro destinazione d'uso.

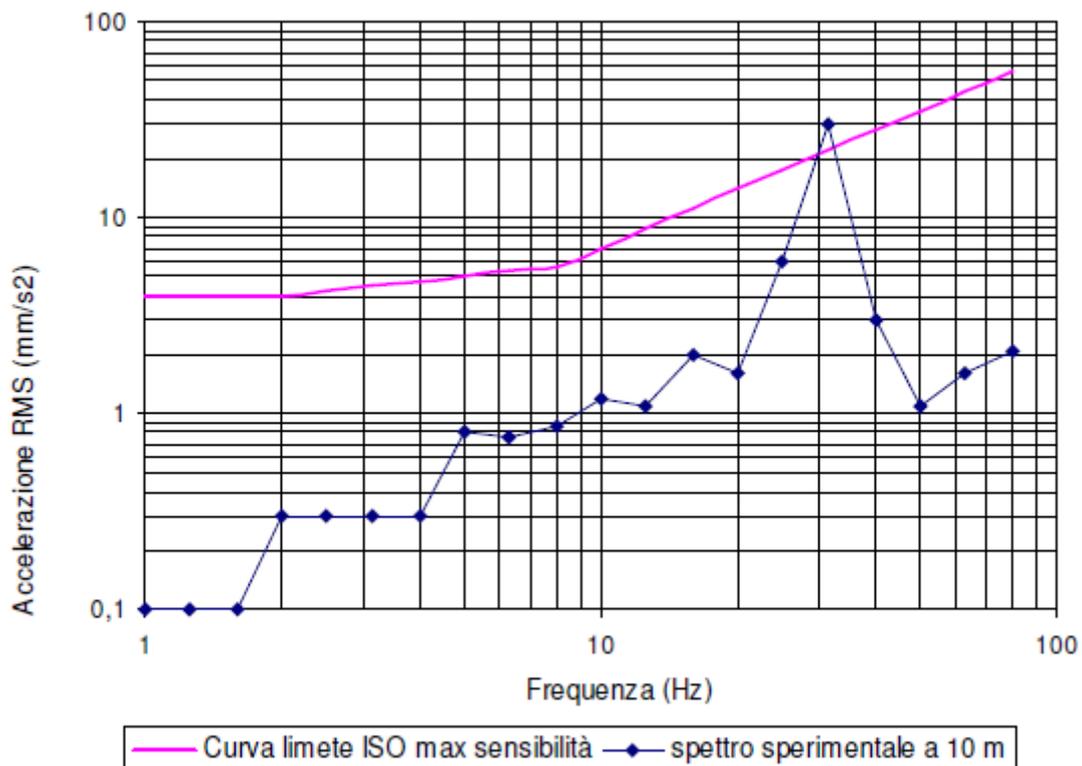


Figura 10-Spettro di emissione della sorgente di compattatore a rullo vibrante

Applicando la legge di variazione del livello di accelerazione ponderata in funzione della distanza dalla sorgente di emissione della vibrazione, il valore della distanza dall'asse della sorgente a cui il limite prudenziale di **72 dB** è raggiunto, è di circa **40 m**.

Questo significa che tutti i recettori posti a distanze maggiori sono sicuramente esenti da ogni tipo di problematica vibrazionale.

4.2.4.3. Propagazione delle vibrazioni indotte da una pala cingolata

I dati di riferimento dei terreni affioranti stimati anche in riferimento ai dati reperibili dalla letteratura specializzata sono:

- velocità di propagazione delle onde di superficie: $V_R = c = 360$ m/s
- fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.10$

-a (do,f)= 25 mm/s² alla frequenza massima e distanza d0=10 m dalla sorgente di emissione.

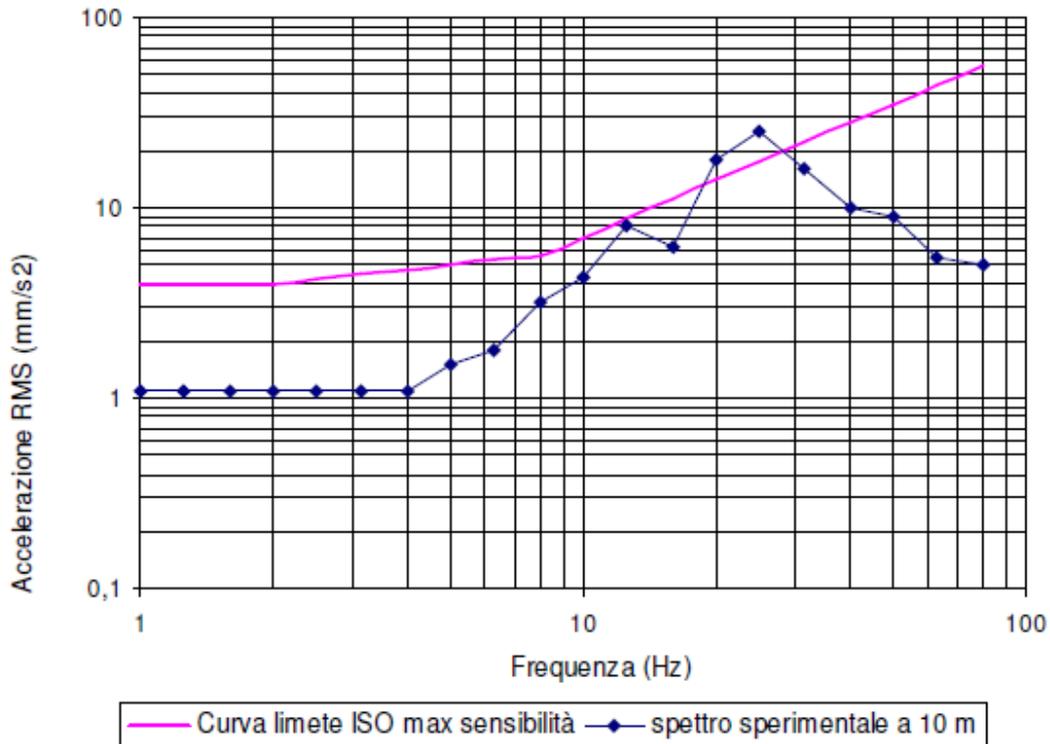


Figura 11 - Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata

Applicando la legge di variazione del livello di accelerazione ponderata in funzione della distanza dalla sorgente di emissione della vibrazione, il valore della distanza dall'asse della sorgente a cui il limite prudenziale di **72 dB** è raggiunto, è di circa **37 m**. Questo significa che tutti i recettori posti a distanze maggiori sono sicuramente esenti da ogni tipo di problematica vibrazionale.

4.2.4.4. Propagazione delle vibrazioni indotte da una pala gommata

I dati di riferimento dei terreni affioranti stimati anche in riferimento ai dati reperibili dalla letteratura specializzata sono:

- velocità di propagazione delle onde di superficie: $V_R = c = 360$ m/s
- fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.10$.

-a (do,f)= 18 mm/s² alla frequenza massima e distanza d0=10 m dalla sorgente di emissione.

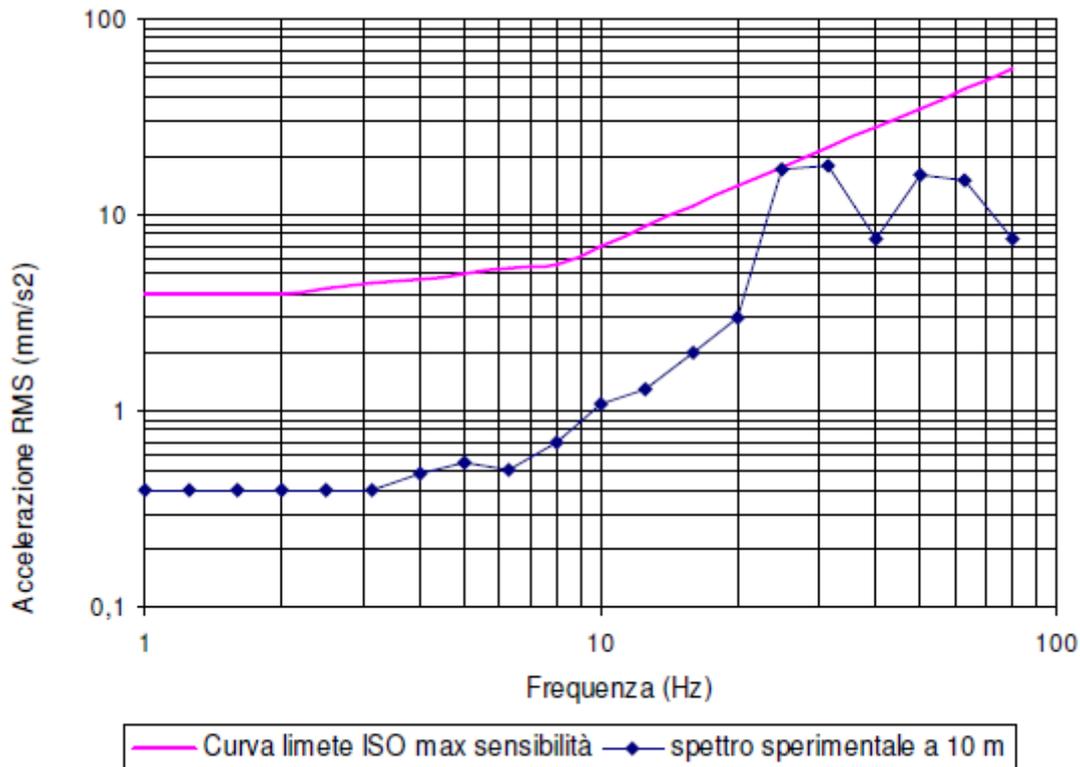


Figura 12 - Spettro di emissione della sorgente di una pala gommatata

Applicando la legge di variazione del livello di accelerazione ponderata in funzione della distanza dalla sorgente di emissione della vibrazione, il valore della distanza dall'asse della sorgente a cui il limite prudenziale di **72 dB** è raggiunto, è di circa **31 m**. Questo significa che tutti i recettori posti a distanze maggiori sono sicuramente esenti da ogni tipo di problematica vibrazionale.

4.2.5. SORGENTI DI VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO

In fase di esercizio solo le operazioni di manutenzione possono esporre gli addetti a vibrazioni per le stesse considerazioni precedenti. Una turbina eolica, in fase di esercizio, emette vibrazioni di natura aerodinamica (causate dall'interazione tra il vento e le pale), meccanica (generate dagli attriti meccanici dei componenti del rotore e del sistema di trasmissione del generatore) e cinetica (prodotte dalle oscillazioni e dal passaggio e cambiamento di stato da stazionario a combinato).

Le vibrazioni, tuttavia, perdono energia durante la propagazione nel terreno e diminuiscono di ampiezza con l'aumentare della distanza dalla sorgente, pertanto si può affermare che l'apporto in termini di effetti o sensazioni di vibrazione anche nei confronti dei recettori (edifici) più vicini (circa 450 m) può essere considerato trascurabile e/o nullo.

5. MISURE MITIGATIVE

Si riportano di seguito alcuni accorgimenti da adottare nell'organizzazione del cantiere al fine di ridurre per quanto possibile l'emissione di vibrazioni:

- utilizzo di macchine conformi alla normativa di settore (DIRETTIVA MACCHINE);
- Utilizzo di macchine e impianti di recente fabbricazione e in ottimo stato manutentivo;

- Pianificare la logistica interna limitando la velocità di mezzi pesanti e macchine operatrici;
- pianificare e attuare la manutenzione ordinaria e straordinaria di macchine e mezzi;
- pianificare la cantierizzazione ponendo ove possibile la massima distanza degli impianti pesanti e vibratori dai ricettori;
- limitazioni delle lavorazioni nelle ore più sensibili (primo mattino / primo pomeriggio / tardo serale);
- evitare, ove possibile, l'uso contemporaneo di macchine particolarmente impattanti;
- informare e formare il personale in merito alle istruzioni e procedure corrette.

6. CONCLUSIONI

Sulla base delle valutazioni analitiche e delle considerazioni effettuate emerge quanto segue:

- la determinazione della sorgente vibrazionale è stata basata estesamente su rilievi strumentali reperibili dalla bibliografia specializzata;
- il livello di accettabilità è stato scelto pari a 72 dB nella fase di cantiere e dismissione a vantaggio di sicurezza, nonostante la norma UNI9614 prende in considerazione un valore di 77 dB come limite diurno per gli edifici residenziali.
- come mezzi d'opera quali sorgenti di vibrazioni nel terreno sono stati considerati: autocarri, rullo vibrante, pale escavatrici cingolate e pale meccaniche gommate.
- le proprietà dei terreni, in termini di velocità delle onde di superficie e dei fattori di smorzamento, sono state desunte dalla bibliografia specializzata sulla base delle litologie affioranti
- le verifiche effettuate presentano un'incertezza legata alla mancanza di misurazioni accurate sulle caratteristiche di propagazione delle onde superficiali per le varie litologie attraversate;
- sulla base dei dati a disposizione è emerso che la propagazione dei livelli di vibrazione è da considerare superiore al limite di accettabilità (72 dB) entro una fascia di 40 metri dal ciglio del cantiere. Pertanto, si può ritenere che questo tipo di impatto sia di **breve termine, estensione locale ed entità riconoscibile** per i pochi ricettori sensibili che possono ricadere nella fascia fino a 40m dall'area di cantiere, verosimilmente presenti solo lungo il percorso del cavidotto MT, in numero esiguo.
- nel presente studio è stato considerato a priori che ogni recettore sensibile sia, in ogni caso, soggetto ad effetti di amplificazione, quantificabili in 5 dB, i quali non è detto che si verifichino.

