



Regione Sardegna
 Provincia di Sassari
 Comuni di Tergu, Nulvi, Sedini, Chiaramonti,
 Ploaghe e Codrongianos



Proposta di ammodernamento complessivo (“repowering”) del “Parco Eolico Nulvi Tergu” esistente da 29,75 MW, con smantellamento degli attuali 35 aerogeneratori e sostituzione in riduzione degli stessi con l’installazione di 15 aerogeneratori, per una potenza totale definitiva di 99 MW

Titolo:

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 8	D	R	0 4 1 7	0 0

Proponente:



FRI-EL ANGLONA S.R.L.
 Piazza del Grano 3
 39100 Bolzano (BZ)
fri-el_anglona@legalmail.it
 P.iva 02429050210

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	01.08.2023	Riscontro nota MASE – Prot. n. 5969 del 22.05.2023	S. P. IACOVIELLO	A. FIORENTINO	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.....	5
3. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO D’AMMODERNAMENTO	6
3.1. CONSISTENZA ED UBICAZIONE DEL PROGETTO D’AMMODERNAMENTO	6
4. COMPONENTE VIBRAZIONI	9
4.1. RIFERIMENTI NORMATIVI	9
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	16
4.2.4.1. Propagazione delle vibrazioni indotte da un autocarro.....	16
4.2.4.2. Propagazione delle vibrazioni indotte da un rullo vibrante	17
4.2.4.3. Propagazione delle vibrazioni indotte da una pala cingolata.....	18
4.2.4.4. Propagazione delle vibrazioni indotte da una pala gommata	19
4.2.5. SORGENTI DI VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO	20
5. MISURE MITIGATIVE	20
6. CONCLUSIONI	21

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 Nulvi Tergu” esistente da 29.75 MW, con smantellamento degli attuali 35 aerogeneratori e sostituzione in riduzione degli stessi con l’installazione di 15 aerogeneratori, per una potenza totale definitiva di 99 MW, in riscontro a quanto richiesto con nota del Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (Commissione Tecnica PNRR-PNIEC), Prot. n. 5969 del 22.05.2023.

Si rende noto che è stata predisposta un’ottimizzazione del layout come soluzione migliorativa riguardante gli aspetti tecnici ed ambientali mediante una modesta modifica alla posizione dell’aerogeneratore WTG NEW 06 pari a circa 75 m. Pertanto, data l’esigua modifica, si ritengono inalterate le valutazioni di compatibilità ambientale e territoriale riportate alla data di presentazione dell’istanza di VIA.

Per ulteriori approfondimenti, si rimanda ai seguenti elaborati:

- 224308_D_D_0120_01 Corografia di inquadramento
- 224308_D_D_0226_01 Planimetria di progetto su catastale - Foglio 6

2. DESCRIZIONE GENERALE DELL’IMPIANTO EOLICO ESISTENTE DA DISMETTERE

2.1. CONSISTENZA ED UBICAZIONE DELL’IMPIANTO EOLICO ESISTENTE

L’impianto eolico esistente, da dismettere, è costituito come di seguito descritto:

- ✓ n° 35 aerogeneratori (modello Vestas V52) e relative fondazioni, piazzole e viabilità;
- ✓ cavidotto interrato di collegamento in media tensione (MT = 20 kV) fra gli aerogeneratori e la Stazione di Utenza di utenza;
- ✓ n° 1 Stazione elettrica di Utenza con relativi impianti elettrici MT/AT (MT = 20 kV -AT=150 kV) ubicata nel Comune di Tergù;

Le macchine hanno tutte una potenza dichiarata di 850 kW per un totale di 29,75 MW con tre pale, un rotore da 52 m di diametro ed un’altezza di hub di 55 m.

L’impianto eolico esistente come innanzi descritto, è ubicato a nord del comune di Nulvi (SS) e a Sud del comune di Tergù (SS), situato ad un’altitudine compresa fra i 370 e 570 m slm.

Le opere di connessione, il cavidotto di collegamento e la stazione di utenza sita in prossimità della “C.P. Tergù” interessano i territori comunali di Nulvi e Tergù, entrambi in provincia di Sassari.



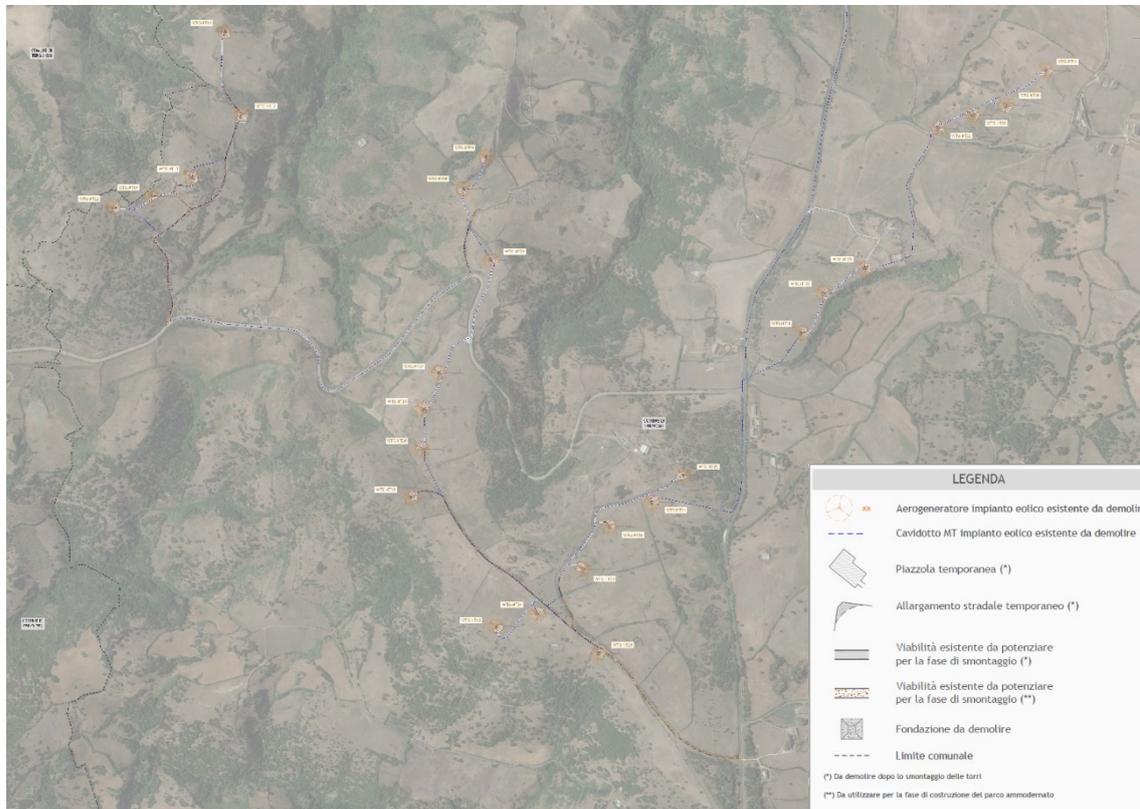


Figura 1 – Stralcio della planimetria con individuazione dell’impianto eolico esistente su ortofoto

2.2. PARERI ACQUISITI IN AUTORIZZAZIONE

L’Impianto Eolico esistente ha ottenuto a suo tempo tutti i permessi necessari alla sua realizzazione, in dettaglio:

- Concessione edilizia n. 24 del 2003 del comune di Tergu e n. 55 del 2003 del comune di Nulvi per il progetto definitivo; Concessione edilizia n. 16 del 2004 del comune di Tergu e n. 55 del 2004 del comune di Nulvi per la variante in corso d’opera del Parco eolico Nulvi-Tergu;
- Concessione edilizia n. 17 del 2004 del comune di Tergu per la costruzione punto di raccolta dell’energia prodotta dal parco eolico Nilvi-Tergu.
- Certificato di assenza di vincolo idrogeologico ai sensi dell’articolo 1 del R.D.L. 3267/1923 – Prot. n. 8522 Pos. 4/4.1 del 01.12.03, Assessorato Regionale Difesa Ambientale Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale della Regione Sarda.
- Consenso di massima alla costruzione di linee elettriche – Prot. n. 03595/IE 9232/MU/CA del 16.09.2004, Ministero delle Comunicazioni Ispettorato Territoriale della Sardegna Cagliari.
- Nulla osta e parere favorevole Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Soprintendenza per i Beni Archeologici di Sassari, Prot. n. 3544 del 14.03.2004.
- Autorizzazione in materia di beni culturali e ambientali (D.Lgs. n. 490 del 29.10.1999) – Prot. n. 2029 Posizione n. 705-02 del 04.11.2003, Regione Autonoma della Sardegna – Assessorato della Pubblica Istruzione, Beni Culturali, Informazioni, Spettacolo e Sport – il Direttore del Servizio Tutela del Paesaggio di Sassari.
- Autorizzazione in materia di beni culturali e ambientali (D.Lgs. n. 490 del 29.10.1999) – Prot. n. 4959 Posizione n. 705-02 del 06.05.2004, Regione Autonoma della Sardegna – Assessorato della Pubblica Istruzione, Beni Culturali, Informazioni, Spettacolo e Sport – il Direttore del Servizio Tutela del Paesaggio di Sassari.
- Autorizzazione Regione Autonoma della Sardegna – Servizio del Genio Civile alla realizzazione dell’impianto elettrico (punto

di raccolta per ampliamento cabina primaria AT 150 kV Comune di Tergu), prot. n.10683 del 30.12.2004.

- Autorizzazione Regione Autonoma della Sardegna – Servizio del Genio Civile alla realizzazione dell’impianto elettrico (costruzione linee elettriche MT interrate, località Monte Sos Paris comuni di Nulvi e Tergu) prot. n. 8187 del 30.09.2004.
- Consenso di massima alla costruzione di linee elettriche del Ministero delle Comunicazioni – Ispettorato territoriale della Sardegna Cagliari, prot. n. 03595/IE 9232/MU/CA del 16.09.2004
- Nulla osta Ministero delle Comunicazioni – Ispettorato territoriale della Sardegna, prot. n. 4573/CA/IE/2004/06/9256/MU del 30.11.2004.
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali Soprintendenza Archeologica di Sassari, parere favorevole (con condizioni) alla realizzazione del progetto di parco eolico nei comuni di Nulvi e Tergu, prot. n. 13867 del 2.11.2003.
- Nulla osta Ministero per i Beni e le Attività Culturali Soprintendenza Archeologica di Sassari relativo agli aerogeneratori contrassegnati con i numeri 10-11-31-34-35, prot. n. 3544 del 17.03.2004.
- Deposito Genio Civile ai sensi dell’art.4 della Legge n.10886 del 05.11.1971, protocollo n.23250 del 22.09.06.

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 eolico esistente, autorizzato ed in esercizio, dove per stesso sito si fa riferimento alla definizione del comma 3-bis dell’art. 5 del D. Lgs. N. 28/2011.

Il Parco eolico (aerogeneratori, piazzole e viabilità d’accesso agli aerogeneratori) ricade nei Comuni di Tergù (SS) e Nulvi (SS), con opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Tergù (SS), Nulvi (SS), Sedini (SS), Chiaramonti (SS), Ploaghe (SS), e Codrongianos (SS), collegato alla Rete Elettrica Nazionale mediante connessione con uno stallo a 150 KV in antenna alla Stazione Elettrica di Trasformazione (SE) della RTN 380/150 kV di Codrongianos (SS).

Si riporta di seguito lo stralcio della corografia dell’area di impianto e si rimanda all’elaborato cartografico “224308_D_D_0120 Corografia di inquadramento” dove viene riportato l’intero progetto.

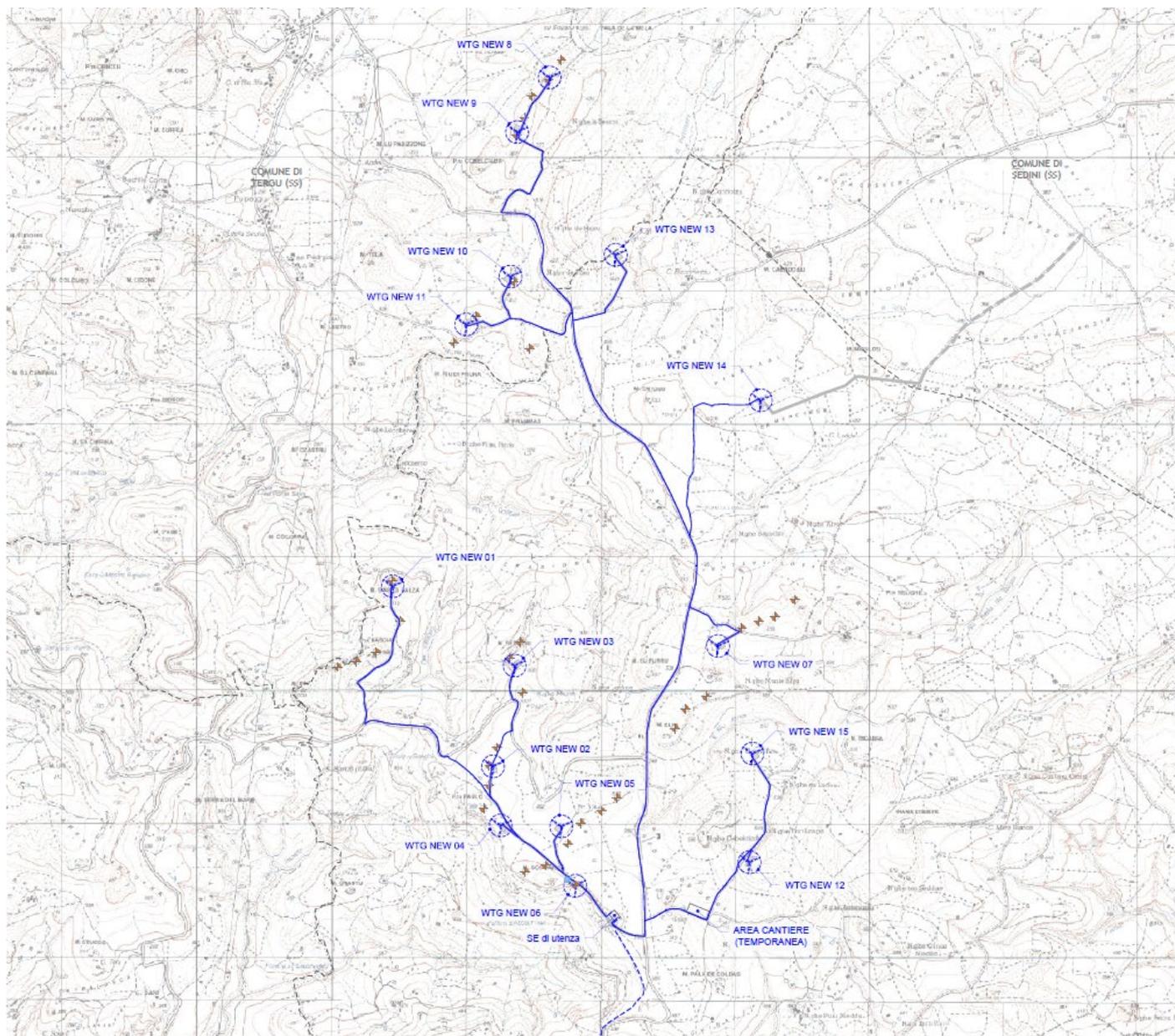


Figura 2 – Corografia d’inquadramento

L’impianto eolico esistente e il Progetto di ammodernamento ricadono all’interno dei Comuni di Tergu, Nulvi, Sedini, Chiaramonti, Ploaghe e Codrongianos, tutti in Provincia di Sassari (SS), sulle seguenti particelle catastali:

- Comune di Codrongianus Foglio 16 particelle 113-125-103-101-100-99-68-132-15-130-14;
- Comune di Sedini Foglio 70 particelle 5-6; Foglio 71 particelle 6-17-14-15-113-86-85-87-110-117-32-31; Foglio 72 particelle 21-48-23-28-18-29-30; Foglio 76 particelle 47-3-49-45-58-5-51;
- Comune di Tergu Foglio 2 particelle 259-50-256-55-253-48-56-53-394-395-397-396-63-69-70-311-1223-75; Foglio 3 particelle 58-60-105-106-107; Foglio 4 particelle 14-124-15-186-209-185-123-121-12-207-218-220-24-16-127-187-13-192-57;
- Comune di Chiaramonti Foglio 17 particelle 174-176-194-178-180-190-192-196-199-202-269-205-204-206-207-211-210-

213-214-217-216-221; Foglio 32 particelle 45-46-47-48-49-50;

- Comune di Ploaghe Foglio 3 particelle 226-229-182; Foglio 7 particelle 123-131; Foglio 9 particelle -350-261-115-44-227-328-144-139; Foglio 14 particelle 5-44-38-6-43-59; Foglio 23 particelle 3-4-282-81-80-420-279-277-90; Foglio 13 particelle 227-226-126-125-308-224-128-39-32-219; Foglio 22 particelle 42-486-43-44-183-87-188-84-844-82-229-81-73-72-71-74-140-137-136-477-142-133-490-132-475-474-888-164-162-161; Foglio 18 particelle 64-63-62-193-61-60-251-59-333-57-56-41-40; Foglio 25 particelle 287-17-19-20-821-53-355-377-276-50-832-835-788-798-801-804;
- Comune di Nulvi Foglio 3 particelle 117-119-116-62-63; Foglio 7 particelle 29-46; Foglio 5 particelle 11-128-114-82-83-146-9-126-125-123; Foglio 8 particelle 123-101-1; Foglio 11 particelle 313-44-40-34-245-244-19-106-15-11-16-107-312-13-18-101-14-12; Foglio 10 particelle 35-103-106-117-108-28-27-146-145-144-135-136-99-143-10-101-137-141-31-20; Foglio 14 particelle 137-146-30-32-128-127-62-154-156-176-178-15; Foglio 6 particelle 47-133-141-45-74-89-129-127-114-53-119-124-12-75-90-88-115-39-85-10-36; Foglio 15 particelle 248-272-266-85-229-228-281; Foglio 16 particelle 47; Foglio 22 particelle 787-691-742-758; Foglio 24 particelle 205; Foglio 27 particelle 158-213-211; Foglio 25 particelle 80-125-295-145-146-205-323-197-199; Foglio 28 particelle 164-165-176; Foglio 29 particelle 281-199-283-235-14-155-154-160-157-163-166.

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

AEROGENERATORE	COORDINATE AEROGENERATORE UTM (WGS84) - FUSO 32		COORDINATE AEROGENERATORE GAUSS BOAGA - WEST		Identificativo catastale			Elevazione Z [m]
	Long. E [m]	Lat. N [m]	Long. E [m]	Lat. N [m]	Comune	Foglio	Particella	
WTG NEW 01	476.380,0	4.519.595,0	1.476.409,6	4.519.603,4	NULVI	6	124	427,5
WTG NEW 02	477.126,0	4.518.245,0	1.477.155,6	4.518.253,4	NULVI	10	136-143	571,0
WTG NEW 03	477.287,0	4.519.001,0	1.477.316,6	4.519.009,4	NULVI	6	133	507,0
WTG NEW 04	477.183,0	4.517.802,0	1.477.212,6	4.517.810,4	NULVI	14	128	580,0
WTG NEW 05	477.634,0	4.517.795,0	1.477.663,6	4.517.803,4	NULVI	10	27	580,5
WTG NEW 06	477.738,0	4.517.350,0	1.477.767,6	4.517.358,4	NULVI	14	146-137	600,5
WTG NEW 07	478.800,0	4.519.148,0	1.478.829,6	4.519.156,4	NULVI	8	123	525,5
WTG NEW 08	477.547,0	4.523.411,0	1.477.576,5	4.523.419,5	TERGU	2	256-308	390,5
WTG NEW 09	477.305,0	4.523.002,0	1.477.334,5	4.523.010,5	TERGU	2	253-301	410,0
WTG NEW 10	477.256,0	4.521.918,0	1.477.285,6	4.521.926,5	TERGU	4	124-186	399,5
WTG NEW 11	476.926,0	4.521.559,0	1.476.955,6	4.521.567,5	TERGU	4	207	403,0
WTG NEW 12	479.034,0	4.517.526,0	1.479.063,6	4.517.534,4	NULVI	11	244	544,5
WTG NEW 13	478.039,0	4.522.080,0	1.478.068,6	4.522.088,5	NULVI	3	62	408,0
WTG NEW 14	479.118,0	4.520.990,0	1.479.147,6	4.520.998,5	NULVI	5	14	462,0
WTG NEW 15	479.056,0	4.518.341,0	1.479.085,6	4.518.349,4	NULVI	11	15-16	522,5

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:

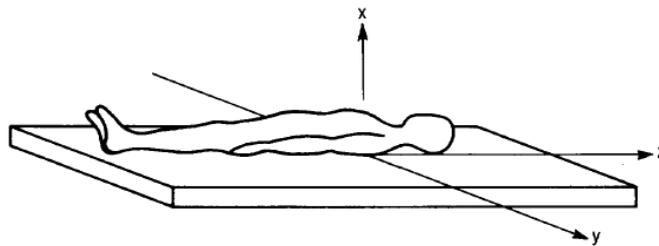


Figura 3 – Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata

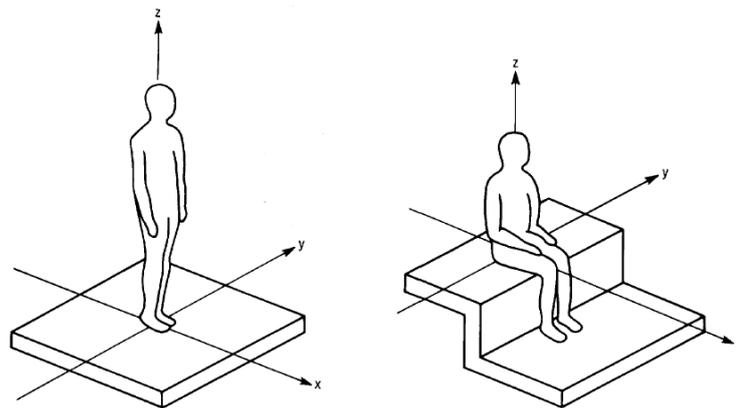


Figura 4– Sistema cartesiano di riferimento per persona in piedi o seduta

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

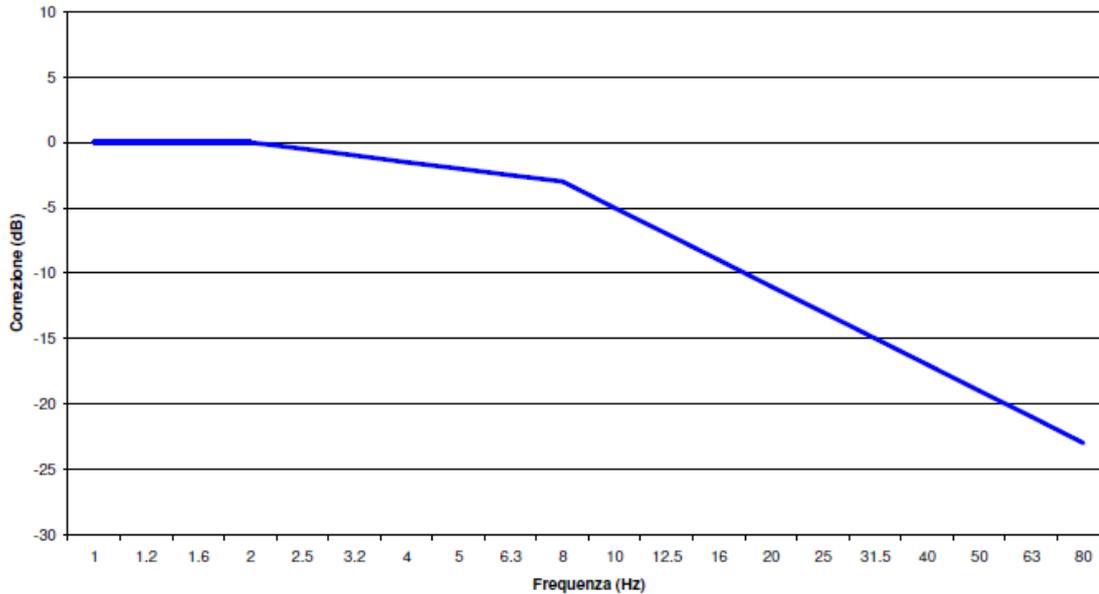


Figura 5– Curva di ponderazione asse generico

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.

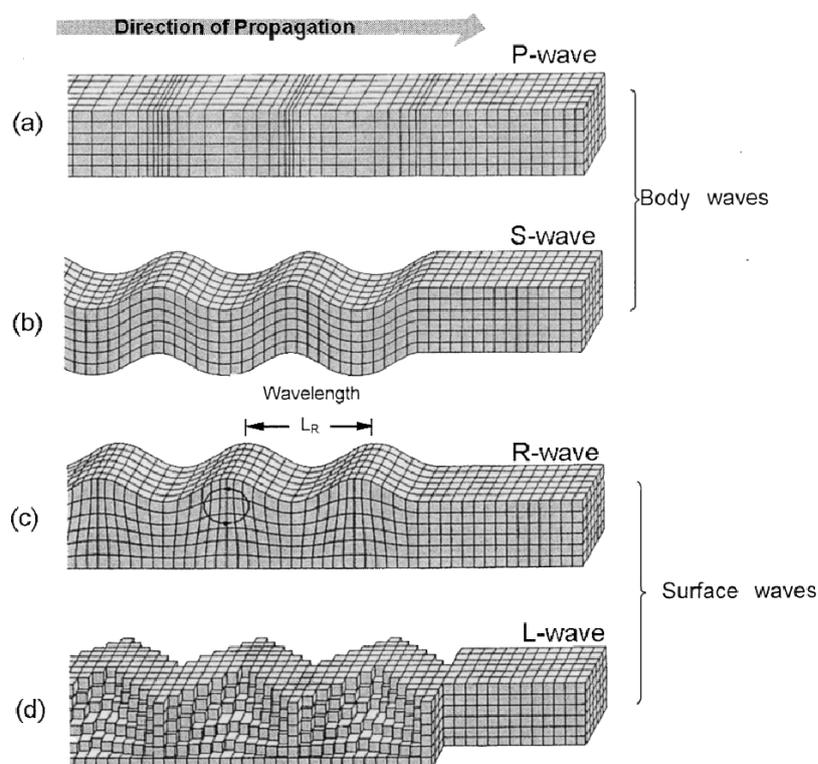


Figura 6– Vari tipi di onde di volume e di superficie.

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	Fattore di perdita η	Massa volumica ρ
	m/s		(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 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.

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 15 nuovi aerogeneratori di ultima generazione, con dimensione del diametro di 170 m e potenza pari a 6,6 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 e AT e la realizzazione della nuova stazione elettrica di Utenza e la stazione elettrica di Condivisione.

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. 224308_D_R_0341) 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.

Sulla base dei parametri litologici, integrati con i dati risultanti dalle analisi di laboratorio ed indagini eseguite, le formazioni geologiche interessate dal progetto sono state suddivise in due gruppi principali:

- Gruppo A, caratterizzato da terreni classificabili come rocce sciolte, incoerenti o pseudocoerenti;
- Gruppo B, relativo alle rocce lapidee o con comportamento assimilabile in situ.

La categoria del suolo di fondazione nei siti degli aerogeneratori e della sottostazione, sono definite secondo le specifiche del DM del 2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni” e dal suo regolamento applicativo.

Indipendentemente da prove MASW da eseguirsi in fase successiva, le valutazioni di V_{s30eq} , stanti i parametri geotecnici desunti dalle indagini, certamente classificheranno i terreni in classe A:

A – Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiore a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

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: $V_R = c = 800 \text{ m/s}$ (dato ricavato dalle indagini geognostiche che catalogano il sottosuolo delle aree come terreni di tipo A 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: $\eta = 0.08$

-a (d_0, f)= 10 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 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.

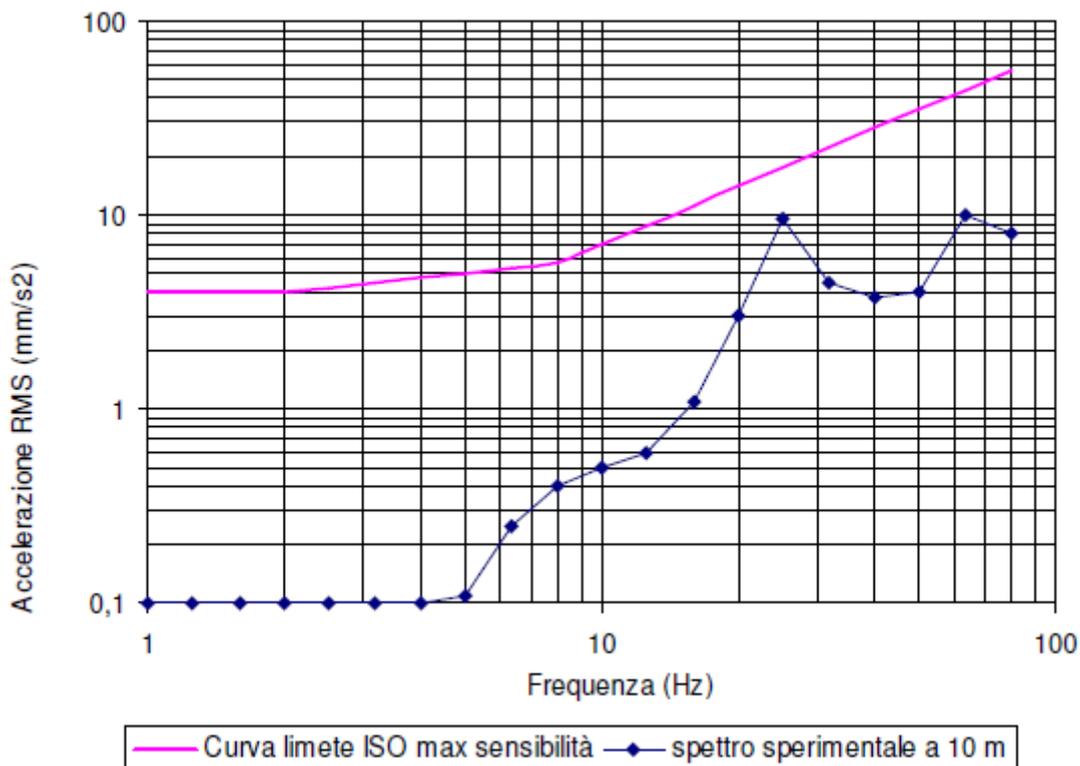


Figura 7 - Spettro di emissione della sorgente di un autocarro

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 **32 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: $V_R = c = 800$ m/s

– fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.08$.

-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.

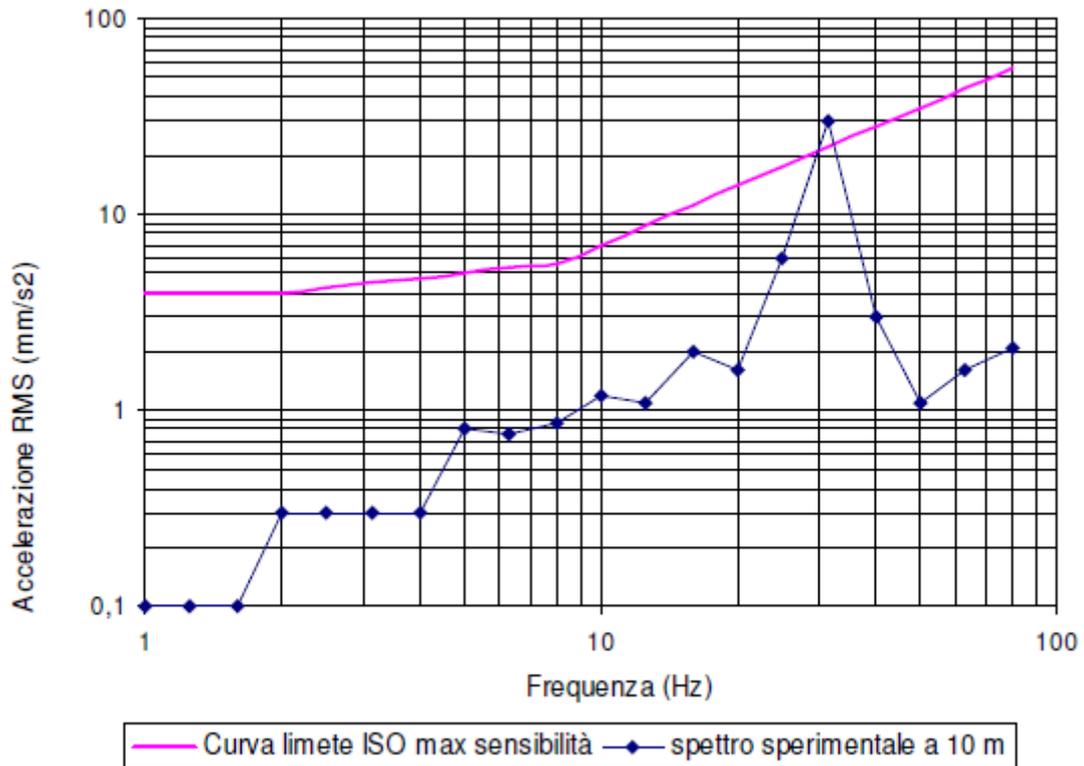


Figura 8-Spettro di emissione della sorgente di compattatore a rullo vibrante

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 **75 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: $VR = c = 800 \text{ m/s}$
- fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.08$
- a $(d_0, f) = 25 \text{ mm/s}^2$ alla frequenza massima e distanza $d_0 = 10 \text{ m}$ dalla sorgente di emissione.

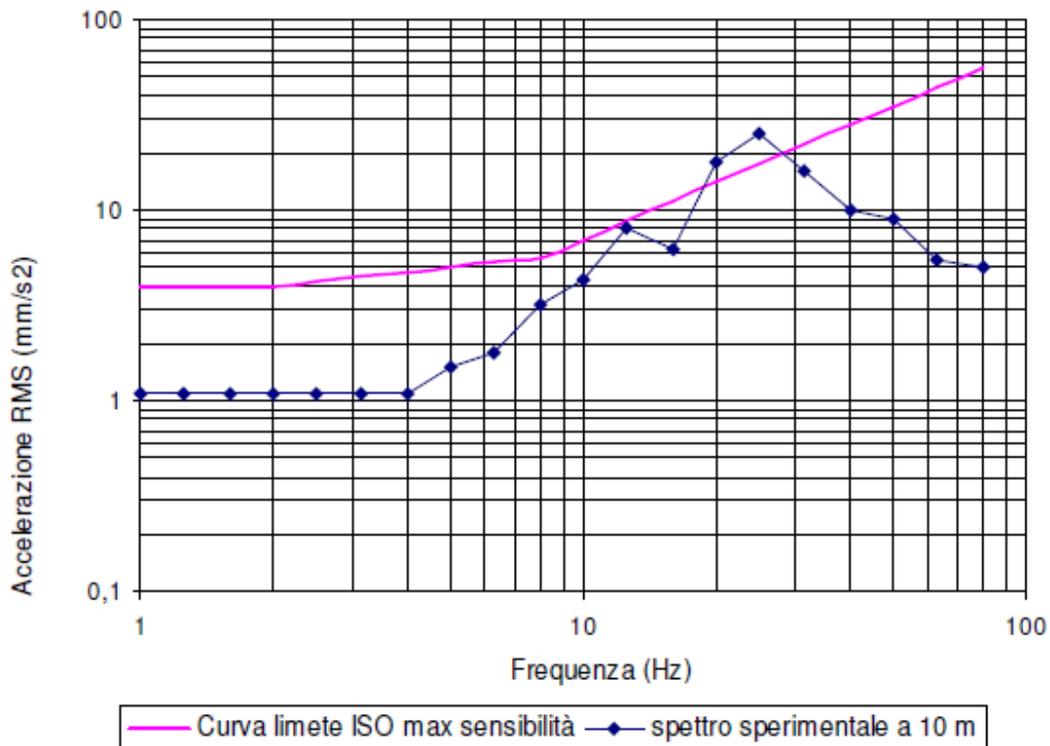


Figura 9 - Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata

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 **67 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: $V_R = c = 800 \text{ m/s}$
- fattore di smorzamento del terreno: $\eta = 0.08$.

-a $(d_0, f) = 18 \text{ mm/s}^2$ alla frequenza massima e distanza $d_0 = 10 \text{ m}$ dalla sorgente di emissione.

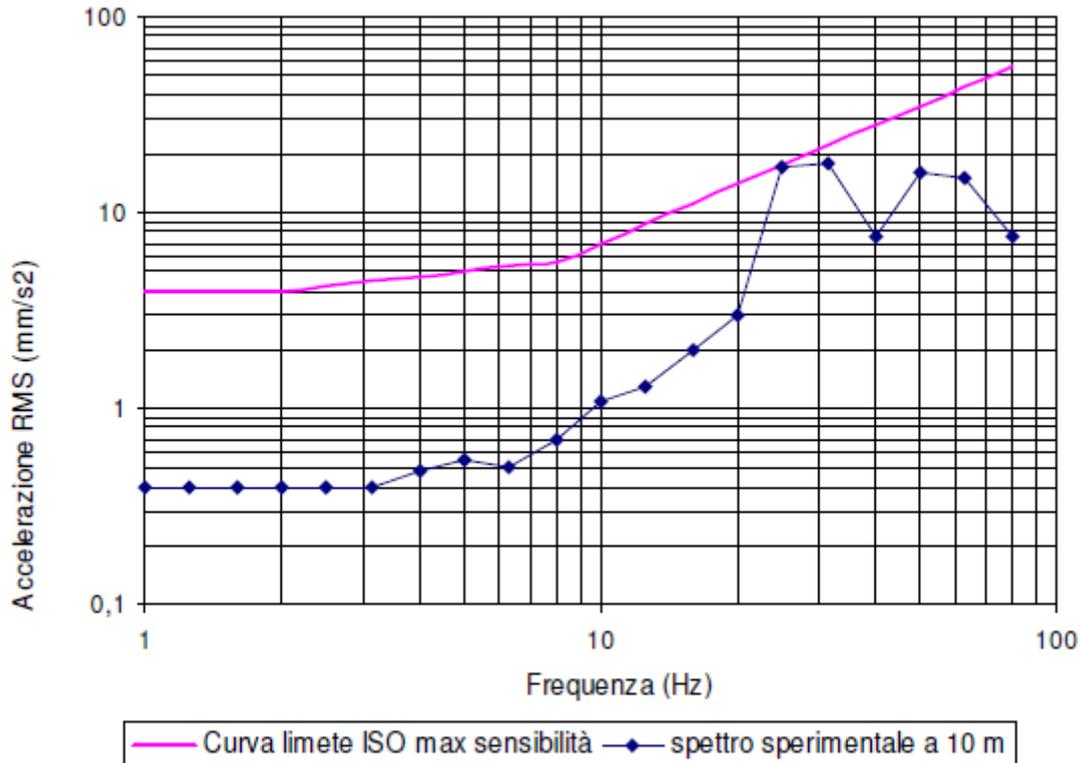


Figura 10 - Spettro di emissione della sorgente di una pala gommata

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 **53 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 700 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 vibratorii 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.

