



Green Power

Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.99.IT.W.12420.05.054.00

PAGE

1 di/of 31

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

INTEGRALE RICOSTRUZIONE DELL'IMPIANTO EOLICO DI NICOSIA

PROGETTO DEFINITIVO

Studio vibrazionale

File: GRE.EEC.R.99.IT.W.12420.05.054.00 - Studio di impatto vibrazionale.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
00	12/07/2024	Prima emissione	Ing. V. Limone	Ing. S. Bossi	Ing. V. Limone

GRE VALIDATION

	Specchia	Iacofano
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT

Nicosia

GRE CODE

GROUP	FUNCTION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION										
GRE	EEC	R	9	9	I	T	W	1	2	4	2	0	0	5	0	5	4	0	0

CLASSIFICATION

UTILIZATION SCOPE

This document is property of Enel Green Power S.p.A. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power S.r.l.

INDEX

1. INTRODUZIONE	3
1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE	3
1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE	3
2. IDENTIFICAZIONE DEL SITO	3
2.1. AREA DI INTERVENTO ED AREA LIMITROFA	3
3. ANALISI PREVISIONALE IMPATTO DA VIBRAZIONI	11
3.1. DISPOSIZIONI DI LEGGE E VALORI LIMITE	11
3.2. METODOLOGIA DI ANALISI	15
3.3. CARATTERIZZAZIONE SORGENTI VIBRAZIONALI	19
3.4. VALUTAZIONE PER DISTURBO DERIVANTE DA VIBRAZIONI	22
3.5. IL CANTIERE	23
3.5.1. Le sorgenti di cantiere	26
3.6. IL MODELLO NUMERICO	27
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	30
5. CONCLUSIONI	30

1. INTRODUZIONE

Stantec S.p.A., in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da Enel Green Power S.p.A. ("EGP") di redigere il progetto definitivo per il potenziamento dell'esistente impianto eolico ubicato nei comuni di Nicosia (EN) e Mistretta (ME), in località "Contrada Marrocco", costituito da 55 aerogeneratori di potenza nominale pari a 0,85 MW, per una potenza totale installata di 46,75 MW.

L'energia prodotta dagli aerogeneratori, attraverso il sistema di cavidotti interrati in media tensione, viene convogliata alla sottostazione elettrica di alta tensione "Serra Marrocco" 150 kV, realizzata in entra-esce sulla linea Nicosia-Caltanissetta. La suddetta stazione elettrica è ubicata all'interno dell'area dell'impianto eolico.

Il progetto proposto prevede l'installazione di nuove turbine eoliche in sostituzione delle esistenti, in linea con gli standard più alti presenti sul mercato, e consentirà di ridurre il numero di macchine da 55 a 13, per una nuova potenza installata prevista pari a 78 MW, diminuendo in questo modo l'impatto visivo, in particolare il cosiddetto "effetto selva". Inoltre, la maggior efficienza dei nuovi aerogeneratori comporterà un aumento considerevole dell'energia specifica prodotta, riducendo in maniera proporzionale la quantità di CO₂ equivalente.

1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE

Enel Green Power S.p.A., in qualità di soggetto proponente del progetto, è la società del Gruppo Enel che dal 2008 si occupa dello sviluppo e della gestione delle attività di generazione di energia da fonti rinnovabili.

Enel Green Power è presente in 29 Paesi nel mondo: in 18 gestisce delle capacità produttive mentre in 11 è impegnata nello sviluppo e costruzione di nuovi impianti. La capacità gestita totale è di circa 46 GW, corrispondenti a più di 1.200 impianti.

In Italia, il parco di generazione di Enel Green Power è rappresentato da tutte le 5 tecnologie rinnovabili del gruppo: idroelettrico, eolico, fotovoltaico, geotermia e biomassa. Attualmente nel Paese conta una capacità gestita complessiva di oltre 14 GW.

1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE

La presente relazione ha come oggetto la valutazione dell'impatto da vibrazioni presso i ricettori individuati nell'area oggetto dell'intervento prodotte dalle attività di cantiere connesse alle operazioni di repowering dell'impianto eolico ubicato nei comuni di Nicosia (EN) e Mistretta (ME), in località "Contrada Marrocco". A tal scopo è stato definito un modello previsionale che ha permesso di stimare a livello numerico il possibile disturbo da vibrazioni eventualmente avvertito dagli occupanti dei ricettori individuati, a partire dai dati di emissione caratteristici dei macchinari impiegati e dalle caratteristiche geologiche del sito.

2. IDENTIFICAZIONE DEL SITO

2.1. AREA DI INTERVENTO ED AREA LIMITROFA

Il sito, oggetto del presente elaborato, è ubicato a circa 80 km a Sud-Est di Palermo ed a qualche km ad Est delle Madonie, nei comprensori comunali di Nicosia (EN) e Mistretta (ME), Regione Sicilia.

L'area interessata si sviluppa lungo il crinale della dorsale ad andamento O-E, che si estende tra Serra Marrocco, Monte Ferrante, Monte Quattro Finaite e località Portella Palumba (a sud di Monte Saraceno) per una lunghezza di circa 6 Km, e lungo i due crinali delle dorsali ad andamento Sud-Nord, che si estendono da Serra Marrocco per una lunghezza di circa 1 Km e tra Monte della Grassa e Monte Quattro Finaite per una lunghezza di circa 3 Km.

L'impianto in progetto ricade entro i confini comunali di Nicosia e Mistretta, in particolare all'interno dei seguenti riferimenti cartografici:

- Foglio di mappa catastale del Comune di Nicosia n° 1, 3, 4 e 5;
- Foglio di mappa catastale del Comune di Mistretta n° 96;

- Foglio di mappa catastale del Comune di Castel di Lucio n° 36;
 - Foglio di mappa catastale del Comune di Geraci Siculo n° 57;
 - Fogli I.G.M. in scala 1:25.000, codificati 260-I-SO Castel di Lucio e 260-II-NO Ganci;
 - Carta tecnica regionale CTR in scala 1:10.000, foglio n° 610160.
- Di seguito è riportato l'inquadramento territoriale dell'area in esame.



Green Power

Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.99.IT.W.12420.05.054.00

PAGE

5 di/of 31

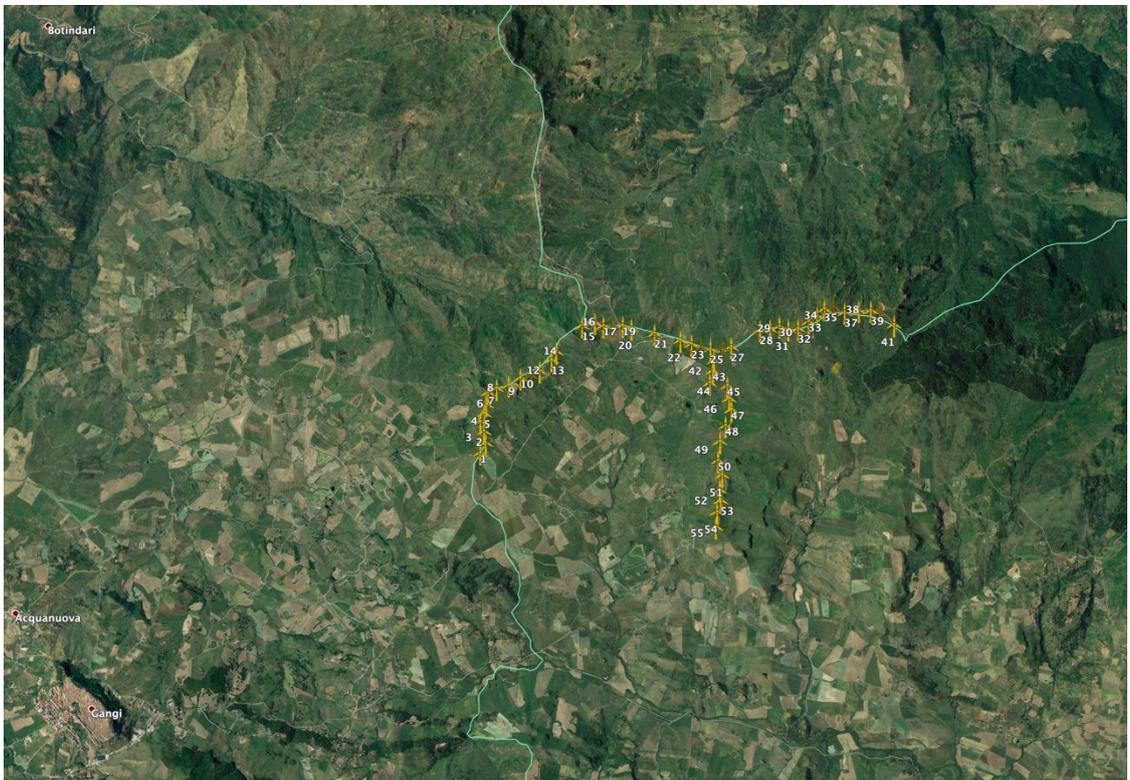




Figura 2-1: Inquadramento generale dell'area di progetto in cui sono riportate le 55 turbine eoliche attualmente presenti in sito (nella seconda immagine, in giallo) e le 13 turbine eoliche in progetto (nell'ultima immagine, in blu).

L'area limitrofa al sito indicato, dove verranno installate le nuove turbine eoliche in progetto, ha vocazione agricola ed è caratterizzata dalla presenza di pochi edifici a destinazione d'uso residenziale, alcuni dei quali disabitati.

ID	Comune	Fg	P.IIa	Sub	Accatastamento	Descrizione
RC01	Nicosia	1	347	-	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
				3	A/3	Abitazioni di tipo economico
			401	4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
				5	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
				2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
RC03	Nicosia	1	345	3	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
				2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
RC06	Nicosia	1	318	2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
				3	C/2	Magazzini e locali di deposito
				4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)

			308	5	C/2	Magazzini e locali di deposito
				6	C/2	Magazzini e locali di deposito
				2	C/2	Magazzini e locali di deposito
				3	C/2	Magazzini e locali di deposito
				4	A/3	Abitazioni di tipo economico
				5	C/2	Magazzini e locali di deposito
				RC07	Nicosia	1
3	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)				
4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)				
RC09	Nicosia	1	320	2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
				3	C/2	Magazzini e locali di deposito
				4	C/2	Magazzini e locali di deposito
RC10	Nicosia	1	336	1	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
				2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
			337	-	C/2	Magazzini e locali di deposito
			341	-	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
RC11	Nicosia	3	305	1	D/10	Fabbricati per funzioni produttive connesse alle attività agricole
				2	A/3	Abitazioni di tipo economico
RC12	Nicosia	3	307	1	D/10	Fabbricati per funzioni produttive connesse alle attività agricole
				2	A/3	Abitazioni di tipo economico
RC15	Nicosia	1	223	-	A/2	Abitazioni di tipo civile
RC16	Nicosia	1	140	-	A/4	Abitazioni di tipo popolare
RC18	Nicosia	1	11	2	A/4	Abitazioni di tipo popolare

				3	C/2	Magazzini e locali di deposito
				4	C/2	Magazzini e locali di deposito
			408	-	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
				2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
				3	C/2	Magazzini e locali di deposito
				4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
			316	5	C/2	Magazzini e locali di deposito
				2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
				3	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
RC19	Nicosia	1	339	4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
RC20	Nicosia	1	407	-	A/4	Abitazioni di tipo popolare
				2	C/2	Magazzini e locali di deposito
				3	A/4	Abitazioni di tipo popolare
RC22	Nicosia	3	317	4	C/2	Magazzini e locali di deposito
			11	-	C/2	Magazzini e locali di deposito
				1	A/3	Abitazioni di tipo economico
				2	C/2	Magazzini e locali di deposito
RC23	Nicosia	3	211	3	C/2	Magazzini e locali di deposito
				2	C/2	Magazzini e locali di deposito
			230	3	C/2	Magazzini e locali di deposito
RC24	Nicosia	3	244	-	A/3	Abitazioni di tipo economico
				1	A/4	Abitazioni di tipo popolare
				2	F/2	Unità collabenti
RC28	Geraci Siculo	48	543	3	C/2	Magazzini e locali di deposito

				4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)	
				545	1	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)
					2	A/4	Abitazioni di tipo popolare
					3	C/2	Magazzini e locali di deposito
					548	-	A/4
RC31	Geraci Siculo	48	540	3	C/2	Magazzini e locali di deposito	
				4	C/6	Stalle, scuderie, rimesse, autorimesse (senza fine di lucro)	
				5	A/4	Abitazioni di tipo popolare	
				6	A/4	Abitazioni di tipo popolare	
				7	C/2	Magazzini e locali di deposito	
				RC32	Geraci Siculo	48	550
3	A/4	Abitazioni di tipo popolare					

ID	Comune	Fg	P.IIa	Sub	Accatastamento	Descrizione
RC02	Geraci Siculo	57	175		[ND]	
RC04	Nicosia	1	2		[ND]	
RC05	Nicosia	1	218		[ND]	
RC08	Nicosia	1	321		[ND]	

RC13	Mistretta	85	122	[ND]
RC14	Nicosia	3	221	[ND]
RC17	Nicosia	1	259	[ND]
RC21	Nicosia	3	319	[ND]
RC25	Mistretta	85	122	[ND]
RC26	Castel di Lucio	34	25	[ND]
RC27	Castel di Lucio	35	25	[ND]
RC29	Castel di Lucio	48	549	[ND]
RC30	Castel di Lucio	35	25	[ND]

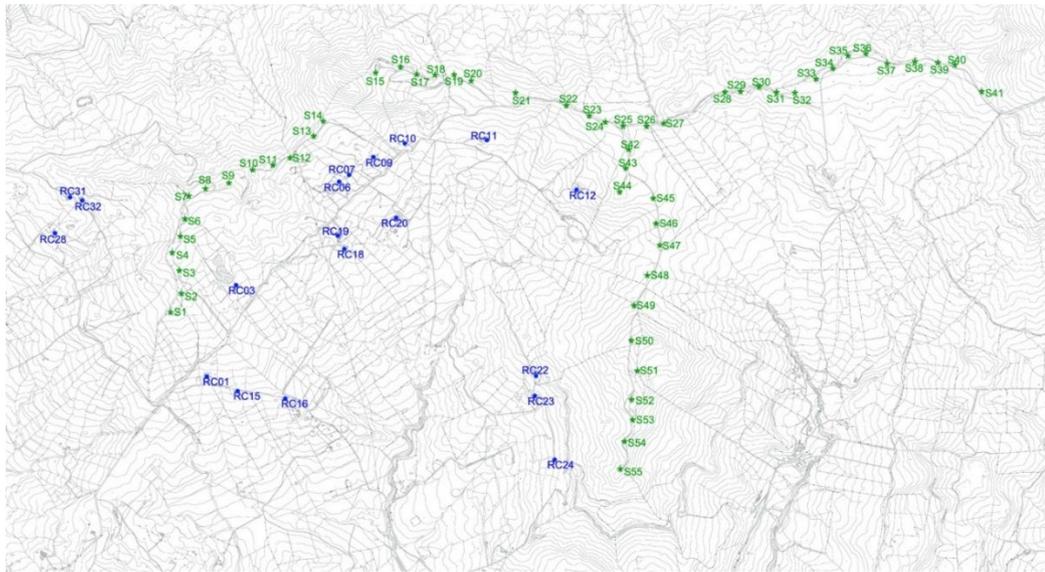


Figura 2-2: Schemi planimetrici dei generatori eolici esistenti (rappresentati in verde) rispetto ai recettori più prossimi analizzati (rappresentati in blu).

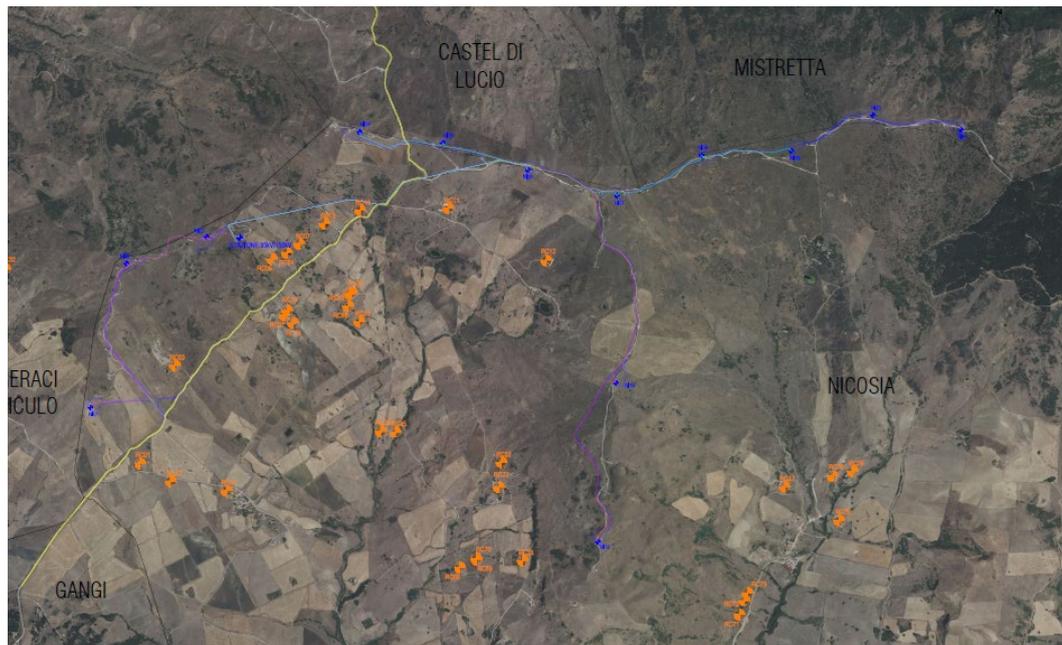


Figura 2-3: Schemi planimetrici dei generatori eolici in progetto (rappresentati in blu) rispetto ai recettori più prossimi analizzati (rappresentati in arancione).

3. ANALISI PREVISIONALE IMPATTO DA VIBRAZIONI

3.1. DISPOSIZIONI DI LEGGE E VALORI LIMITE

Negli ultimi anni il problema delle vibrazioni degli edifici ha assunto sempre maggiore importanza sia in relazione alla diversa tipologia strutturale delle moderne costruzioni, sia per il continuo aumento delle sorgenti vibratorie, nonché per la maggiore sensibilità dell'uomo all'impatto ambientale; ne segue quindi che, con sempre maggiore frequenza, si conducono valutazioni di impatto ambientale non solo da rumore, aspetto già regolamentato dalle attuali normative tecniche e giuridiche, ma anche da vibrazioni.

Le vibrazioni possono arrecare disturbo alle persone, danneggiamento delle apparecchiature

utilizzate, riduzione della efficienza operativa delle strutture e, nei casi più gravi, possono anche costituire dei rischi per la stessa integrità strutturale o architettonica degli edifici. Le normative riportate in tale relazione coprono tutto lo spettro delle problematiche associate alle vibrazioni:

- UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"
- UNI 11048:2003 "Vibrazioni meccaniche ed urti - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo"
- UNI 9916:2004 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"

Per la valutazione del disturbo vibrazionale alle persone si farà riferimento alla normativa UNI 9614:2017. La norma prescrive la valutazione delle accelerazioni (valore efficace espresso in dB) rispetto a un'accelerazione di riferimento di 10^{-6} m/s², secondo i tre assi di propagazione ponderati in frequenza secondo le curve riportate in Figura 4. La norma definisce metodologie di misura e analisi del segnale nonché i livelli di vibrazioni che arrecano disturbo in funzione della durata e della direzione di oscillazione. Il parametro utilizzato nell'ambito di questa trattazione è l'accelerazione ponderata efficace L_{aw} la cui determinazione è subordinata all'individuazione del valore efficace di accelerazione ponderata lungo ciascuno dei tre assi di misura. È importante notare che, nell'ambito delle valutazioni da disturbo, si fa esplicitamente riferimento al filtro w_m da applicare lungo ciascuno degli assi.

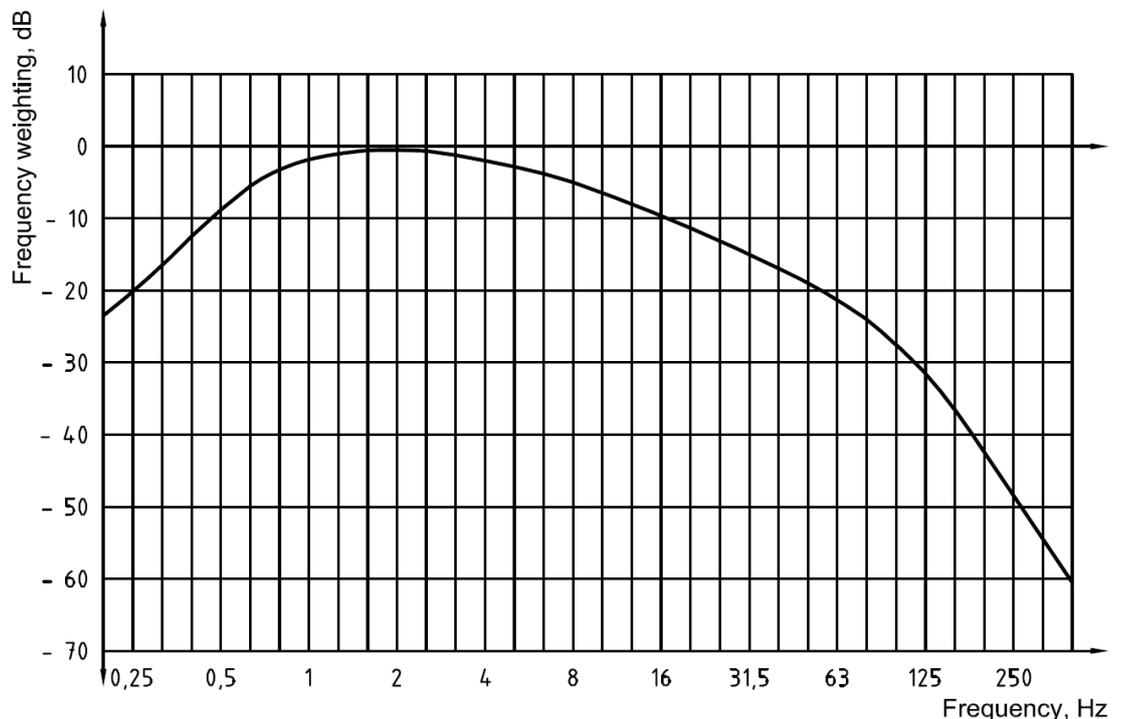


Figura 4 - Filtro w_m per disturbo da vibrazioni secondo UNI 9614:2017

Dai segnali relativi ai tre assi, filtrati opportunamente, vengono calcolati i valori efficaci lungo i tre assi utilizzando un tempo di integrazione pari ad 1s.

$$a_{w,rms,j}(t) = \left(\frac{1}{\tau} \times \int_{t-\tau}^t a_{w,j}^2(\xi) \times d\xi \right)^{0,5}$$

Noti i valori all'istante temporale t per ciascuno degli assi, è possibile calcolare il valore dell'accelerazione ponderata efficace.

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,rms,x}^2(t) + a_{w,rms,y}^2(t) + a_{w,rms,z}^2(t)}$$

Tale valore è stato rappresentato in dB per ragioni di leggibilità. A seguito della determinazione dell'accelerazione ponderata efficace, si definisce l'accelerazione massima ponderata nell'ambito del j-esimo evento individuato. Successivamente si procede al calcolo della massima accelerazione statistica definita come:

$$a_{w,95} = \overline{a_{w,max}} + 1,8 \times \sigma$$

Dove $a_{w,max}$ soprastegnato rappresenta lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate. Successivamente si procede con la caratterizzazione della sorgente responsabile del disturbo che viene quantificata attraverso l'accelerazione ponderata massima statistica della sorgente che deve essere calcolata a partire dalla accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse e residue secondo la seguente equazione:

$$V_{sor} = \sqrt{(V_{imm}^2 - V_{res}^2)}$$

Tale valore è confrontabile con i valori limite espressi dalla normativa:

Classi di destinazione d'uso	Tempi di Riferimento	
	Diurno	Notturmo
Abitazioni	7.2 mm/s ²	3.6 mm/s ²
Luoghi Lavorativi	14 mm/s ²	-
Case di cura, Ospedali e affini	2 mm/s ²	2 mm/s ²

Tabella 1 - Valori limite accelerazioni UNI 9614:2024

Per la valutazione del danno arrecato da vibrazioni viene effettuata con una metodologia sostanzialmente diversa: non viene applicato il filtro di ponderazione per asse applicato sui valori medi della terna, ma si fa riferimento a valori istantanei integrati con filtro con pendenza decrescente di 6 dB/ottava) su tutto il range di frequenza, in modo da ottenere un segnale di velocità di vibrazione, anziché di accelerazione. La norma UNI 9916, fornisce un riferimento relativamente ai valori di picco ammissibile per diverse classi di edifici.

Edificio	V_{pk} (mm/s)	L_{aw} dB
----------	-----------------	-------------

Edifici Industriali	10	101.0
Edifici Residenziali	5	95.0
Edifici Storici	2.5	89.0

Tabella 2 - Valori limite velocità ed accelerazione ponderata equivalente per ISO 9916, vibrazioni di breve durata

Edificio	V_{pk} (mm/s)	L_{aw} dB
Edifici Industriali	20	107.0
	40	113.0
Edifici Residenziali	5	95.0
	15	104.5
Edifici Storici	3	89.0
	8	99.1

Tabella 3 - Valori limite velocità ed accelerazione ponderata equivalente per ISO 9916, vibrazioni Permanenti

Sia la normativa in esame (UNI 9614) che alcuni criteri quali: "Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration, Jorgen Jakobsen, Danish Environmental Protection Agency, Industrial Section, Strandgade 29, DK - 1401 Copenhagen K, Denmark", fanno riferimento ad un valore di percezione per fenomeni vibrazionali di circa 75 dB per l'accelerazione ponderata efficace L_{aw} . La normativa UNI 9614 considera continui i livelli di vibrazione che, ponderati nel tempo utilizzando una media esponenziale con costante di tempo "slow", presentano una variazione di ampiezza inferiore ai 5 dB; diversamente il fenomeno è considerato non continuo. Si definiscono altresì vibrazioni impulsive se sono originate da eventi di breve durata. La norma non stabilisce dei criteri per la determinazione della scala temporale di riferimento: si intuisce quindi che uno stesso fenomeno "non continuo" potrà essere considerato di breve durata o al contrario di lunga durata o addirittura impulsivo; il tutto dipende dal tempo di riferimento prescelto. Nel caso specifico, lì dove sussiste ambiguità nell'interpretazione della norma, verranno esaminate, per completezza, le diverse possibilità, evidenziando l'effettivo significato fisico della scelta operata.

Gli effetti delle vibrazioni sulle strutture sono particolarmente critici in corrispondenza di determinate frequenze, infatti, possono generarsi dei fenomeni di amplificazione della risposta strutturale anche a fronte di "piccole" sollecitazioni; ciò è ancora più critico quando la struttura (o il terreno di sovrapposizione) versa in uno stato tensionale gravoso (presenza di un quadro fessurativo esteso, non coesione delle masse murarie e del terreno) e oltre il limite elastico. Per ridurre le vibrazioni indotte dal traffico veicolare e ferroviario possono essere attuate diverse azioni, come ad esempio il miglioramento della sovrastruttura stradale (o ferroviaria), la realizzazione di schermi e barriere nel terreno; tutti interventi che post operam possono risultare economicamente molto onerosi; da qui l'importanza di uno studio previsionale che - prevedendo in modo corretto i livelli vibratorii ai ricettori - possa consentire in fase di progettazione o di realizzazione i giusti accorgimenti tecnici. Per determinare correttamente i livelli di vibrazione, è necessario condurre uno studio di caratterizzazione dinamica della sorgente (contenuto spettrale, e livelli di eccitazione, energia, ecc.) nonché uno studio di propagazione delle onde vibratorie in superficie e nel sottosuolo; è quest'ultimo un aspetto di notevole complessità; infatti, la conoscenza delle caratteristiche e della conformazione geologica del terreno possono risultare di difficile determinazione.

3.2 METODOLOGIA DI ANALISI

La propagazione delle vibrazioni in un suolo è governata dalla natura del terreno, dalla tipologia di sorgente (spettro di emissione) e dalla distanza rispetto al punto ricettore. È necessario distinguere tre diverse tipologie di onde che veicolano l'energia vibrazionale. In particolare, si distinguono onde di corpo quali, le onde di compressione e le onde di taglio, ed onde superficiali quali, ad esempio, le onde di Rayleigh. Si noti che tali onde, hanno velocità e meccanismi di propagazione differenti. In linea generale è possibile riscontrare un predominio nella trasmissione delle onde superficiali con particolare prevalenza delle onde di compressione p (le più veloci) e delle onde di taglio t .

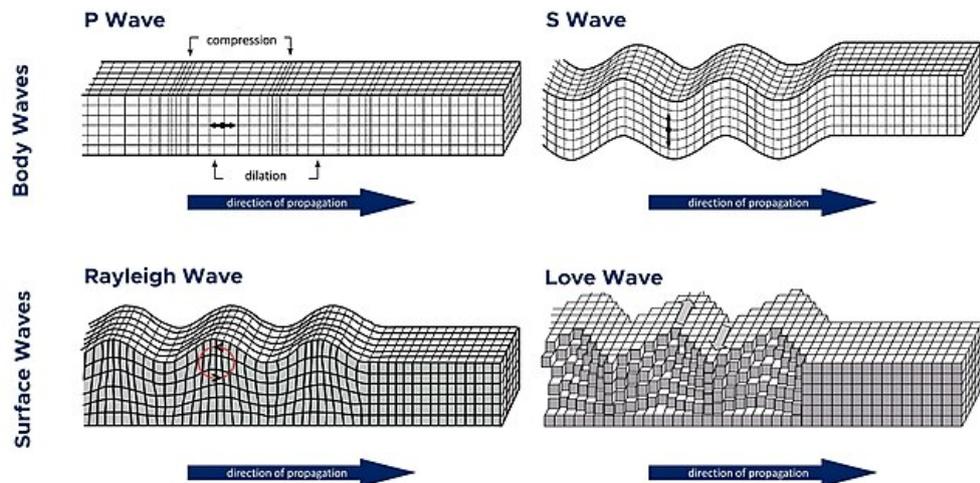


Figura 5 - Rappresentazione schematica onde coinvolte in propagazione di vibrazioni

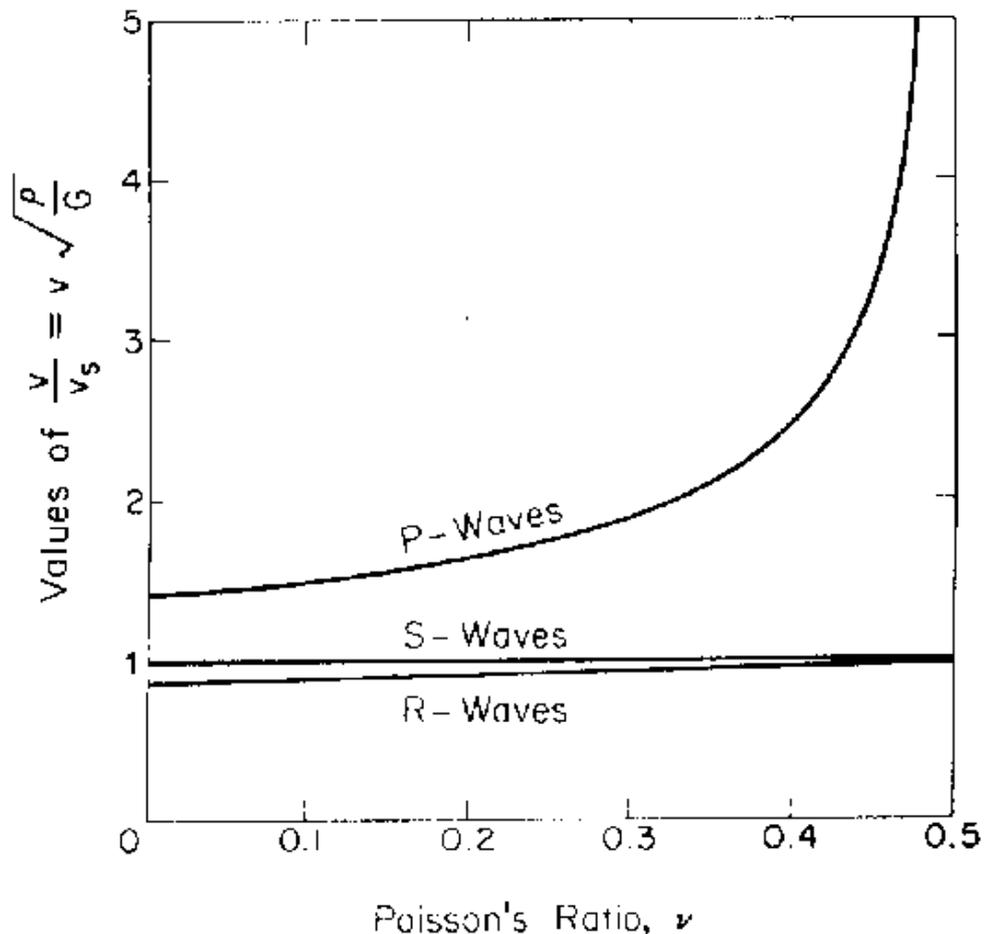


Figura 6 - Velocità di propagazione delle onde al variare del modulo di Poisson del terreno

Le onde di taglio e quelle di volume viaggiano a velocità inferiori rispetto alle onde di compressione e tipicamente dipendenti dal modulo di Poisson del terreno. Nella seguente trattazione verranno analizzati modelli di c,t,s ovvero comprendenti onde di compressione, taglio e superficiali. Al fine di caratterizzare lo stato vibrazionale ai ricettori, derivante dallo spettro di emissione delle sorgenti, sono state implementate in parallelo due diverse metodologie di analisi consolidate nell'ambito, anche in letteratura:

1. Modello di bassa velocità
2. Modello di attenuazione esponenziale

Modello di bassa velocità

Tale modello è stato validato in ambito di attività riportati in bibliografia internazionale, e prima di essere implementato nel software previsionale, è stato ulteriormente verificato mediante campagne di misure sperimentali [2-3].

Il modello di bassa velocità presenta un approccio semi-empirico: il disturbo vibrazionale ai ricettori - valutato in termini spettrali nel dominio delle frequenze - dipende da differenti meccanismi di propagazione e di attenuazione (o di amplificazione) presenti lungo la catena di trasmissione: sorgente del disturbo, tipologia del suolo da attraversare, tipologia strutturale dell'edificio, sensibilità fisiologica dell'uomo, ecc. I macchinari generano sia onde di corpo (compressione e taglio), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), in misura differente in relazione al tipo di infrastruttura. La formula utilizzata per il calcolo dell'attenuazione delle vibrazioni nella loro propagazione attraverso il terreno è:

$$L = 20 \cdot \log \left[10^{\frac{L_c}{20}} + 10^{\frac{L_t}{20}} + 10^{\frac{L_s}{20}} \right]$$

L_c , L_t e L_s , rispettivamente i livelli trasmessi attraverso onde di compressione, di taglio e di superficie, sono dati dalle seguenti relazioni:

$$L_t = L_0 + 20 \cdot \log(\beta_t) - k_t \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha_t (R - R_0) \frac{f}{V_t}$$

$$L_c = L_0 + 20 \cdot \log(\beta_c) - k_c \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha_c (R - R_0) \frac{f}{V_c}$$

$$L_s = L_0 + 20 \cdot \log(\beta_s) - k_s \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha_s (R - R_0) \frac{f}{V_s}$$

Dove:

- L ed L_0 rappresentano i livelli di vibrazione in decibel alla velocità V e V_0 , ovvero alla velocità di transito e alla velocità di riferimento
- R distanza plano-altimetrica, riferita all'asse della linea, del ricettore
- R_0 distanza plano-altimetrica, riferita all'asse della linea, della sorgente (pt. di riferimento)
- V_c Velocità per le onde di compressione
- V_t Velocità per le onde di taglio
- V_s Velocità per le onde di superficie
- α fattore di perdita per dissipazione
- β fattori di importanza relativa tra i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno
- K coefficiente di attenuazione geometrica
- c, t, s indici riferiti rispettivamente alle onde di compressione di taglio e di superficie

Per i differenti meccanismi di propagazione delle onde nel terreno (onde di compressione, di taglio e di superficie), ed in relazione al tipo di sorgente sono attesi i valori del coefficiente di attenuazione geometrica k riportati nella tabella seguente.

Tipo di sorgente	Tipo di onde di corpo	Tipo di onde di superficie
Puntuale	$K = 20$	$K = 10$
Lineare	$K = 10$	$K = 0$

Tabella 4 - Coefficiente di attenuazione geometrica per i differenti meccanismi di propagazione

Tipo di onda	Rilevato Raso	Viadotto	Galleria Profonda
Compressione	$\beta_c = 0.20$	$\beta_c = 0.35$	$\beta_c = 0.40$
Taglio	$\beta_t = 0.20$	$\beta_t = 0.35$	$\beta_t = 0.40$
Superficie	$\beta_s = 0.60$	$\beta_s = 0.30$	$\beta_s = 0.20$

Tabella 5 - Fattori di importanza relativa tra i differenti meccanismi di propagazione

Il modello semplificato progettato, in prima istanza, per la previsione di vibrazioni indotte da treni a bassa velocità implementa quindi una legge di dissipazione del tipo:

$$y = a \cdot (R - R_0) \cdot Fc + b \cdot \log_{10} \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

È possibile calcolare la curva che interpola la legge di attenuazione in frequenza misurata ad una data distanza; visto che il modello semplificato implementa una legge di dissipazione lineare in frequenza (vd equazione precedente), è stata utilizzata una interpolazione lineare, dove $(R - R_0)$ e $\log_{10} \left(\frac{R}{R_0} \right)$ sono quantità note.

Modello di attenuazione esponenziale

Il modello di attenuazione esponenziale riportato in [4] risulta funzione del livello di vibrazione misurato ad una distanza nota rispetto alla sorgente, di un fattore di perdita del terreno η e della velocità di propagazione della specifica onda all'interno del terreno.

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

Il parametro η/c può essere facilmente ricondotto ad un parametro qualitativo del terreno analizzato secondo quanto riportato in tabella 6.

Classe	Descrizione tipologia di terreno	Coefficiente di attenuazione	ρ
I	Cedevole o tenero (terreno che può essere scavato facilmente)	0.003-0.01	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$
II	Consolidato (terreno che può essere scavato utilizzando una pala)	0.001-0.003	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$
III	Duro (terreno che non può essere scavato con una pala ma necessità di un piccone)	0.0001-0.001	$6 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-5}$
IV	Duro consolidato (terreno che scavato difficilmente utilizzando un martello)	<0.0001	< 6×10^{-6}

Tabella 6 - Coefficiente di attenuazione al variare della tipologia di terreno.

Si noti che l'esponente del rapporto d/d_0 varia in relazione alla tipologia di sorgente e di onda considerata, secondo quanto riportato nella seguente tabella.

Tipo di sorgente	Onda	Strato	n
Linea	Superficie	Superficie	0

	Volume	Superficie	1
Punto	Rayleigh	Superficie	0.5
	Volume	Superficie	2.0
Linea sotterranea	Volume	Profondo	0.5
Punto sotterraneo	Volume	Profondo	1.0

Tabella 7 - Definizione dell'esponente n in base al tipo di sorgente e onda.

Si noti che tale modello semplificato si basa sull'ipotesi di suolo isotropo e che, nel caso in esame, il coefficiente n è stato posto uguale a 0.5 nel caso di onde superficiali e 1 nel caso di onde di corpo.

3.3 CARATTERIZZAZIONE SORGENTI VIBRAZIONALI

Gli spettri vibrazionali sono stati caratterizzati sulla base di studio bibliografici di settore. In particolare, si è fatto riferimento a [1]

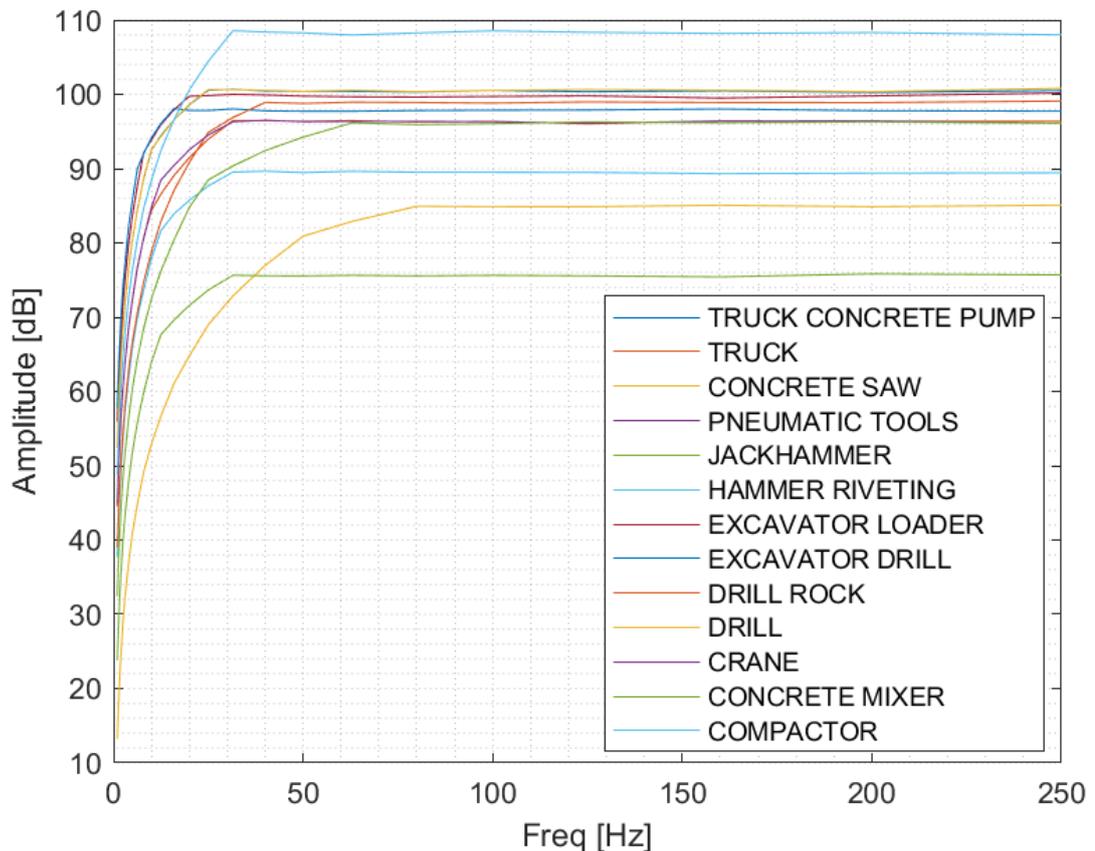


Figura 7 - Valori emissione spettrale sorgenti vibrazionali

FREQ [Hz]	1	1.25	1.6	2	2.5	3.1	4
TRUCK CONCRETE PUMP	52.4	56.5	60.7	64.5	68.4	72.0	76.5
TRUCK	44.5	48.4	52.5	56.6	60.4	64.1	68.5
SAW CONCRETE	13.2	16.7	21.0	24.8	28.9	32.7	36.9
PNEUMATIC TOOL	23.8	27.4	32.0	35.8	39.9	43.5	47.9
JACKHAMMER	23.8	27.4	32.0	35.8	39.9	43.5	47.9
HAMMER RIVETING	37.7	41.5	45.9	49.7	53.6	57.6	61.7
EXCAVATOR LOADER	55.9	59.7	64.0	67.8	71.7	75.3	79.9
EXCAVATOR_DRILL	57.8	61.7	65.9	70.2	74.0	77.5	82.2
DRILL ROCK	39.0	42.6	47.0	50.8	54.5	58.4	62.8
DRILL	52.5	56.5	60.6	64.5	68.6	72.1	76.6
CRANE	44.9	48.8	52.8	56.7	60.5	64.1	68.6
CONCRETE MIXER	32.4	36.3	40.4	44.5	48.4	51.9	56.4
COMPACTOR	48.7	52.4	56.8	60.6	64.3	68.2	72.6
FREQ [Hz]	5	6.3	8	10	12.5	16	20
TRUCK CONCRETE PUMP	80.4	84.5	88.7	92.5	94.4	96.6	98.6
TRUCK	72.3	76.6	80.8	84.4	86.6	89.1	91.5
SAW CONCRETE	40.9	44.8	49.2	52.9	56.7	61.1	64.8
PNEUMATIC TOOL	51.9	55.8	59.9	63.9	67.6	69.6	71.6
JACKHAMMER	51.9	55.8	59.9	63.9	67.6	69.6	71.6
HAMMER RIVETING	65.9	69.9	73.7	77.8	81.7	83.9	85.7
EXCAVATOR LOADER	83.7	87.7	92.2	93.9	95.9	97.9	99.7
EXCAVATOR_DRILL	85.7	90.0	92.1	94.1	96.1	98.1	97.8
DRILL ROCK	66.7	70.6	74.8	78.8	82.9	87.1	90.8
DRILL	80.5	84.4	88.8	92.6	94.3	96.6	98.6
CRANE	72.4	76.7	80.7	84.7	88.4	90.5	92.5
CONCRETE MIXER	60.4	64.3	68.6	72.4	76.2	80.4	84.8
COMPACTOR	76.4	80.4	84.7	88.4	92.4	96.6	100.6
FREQ [Hz]	25	31.5	40	50	63	80	100

TRUCK CONCRETE PUMP	100.5	100.7	100.5	100.4	100.4	100.3	100.5
TRUCK	94.0	96.5	96.5	96.4	96.5	96.3	96.4
SAW CONCRETE	69.0	72.8	77.0	80.9	82.9	84.9	84.9
PNEUMATIC TOOL	73.7	75.6	75.6	75.5	75.6	75.5	75.6
JACKHAMMER	73.7	75.6	75.6	75.5	75.6	75.5	75.6
HAMMER RIVETING	87.7	89.5	89.7	89.5	89.6	89.5	89.5
EXCAVATOR LOADER	99.8	100.0	99.9	99.8	99.7	99.6	99.7
EXCAVATOR_DRILL	97.8	98.0	97.8	97.7	97.7	97.8	97.9
DRILL ROCK	94.9	96.9	98.9	98.8	98.9	98.9	98.8
DRILL	100.6	100.6	100.5	100.4	100.5	100.4	100.5
CRANE	94.5	96.3	96.5	96.3	96.4	96.4	96.3
CONCRETE MIXER	88.5	90.4	92.4	94.2	96.2	95.9	96.0
COMPACTOR	104.5	108.6	108.4	108.3	108.0	108.3	108.6
FREQ [Hz]	125	160	200	250			
TRUCK CONCRETE PUMP	100.3	100.5	100.2	100.5			
TRUCK	96.0	96.4	96.4	96.4			
SAW CONCRETE	84.9	85.1	84.9	85.1			
PNEUMATIC TOOL	75.6	75.4	75.8	75.7			
JACKHAMMER	75.6	75.4	75.8	75.7			
HAMMER RIVETING	89.5	89.3	89.4	89.4			
EXCAVATOR LOADER	99.8	99.5	99.8	100.2			
EXCAVATOR_DRILL	97.9	98.0	97.8	97.7			
DRILL ROCK	99.0	98.9	98.9	99.1			
DRILL	100.6	100.6	100.4	100.8			
CRANE	96.1	96.4	96.4	96.1			
CONCRETE MIXER	96.3	96.2	96.3	96.1			
COMPACTOR	108.3	108.2	108.3	108.0			

Tabella 8 - Valori emissione spettrale sorgenti vibrazionali

I parametri dei modelli di bassa velocità e di attenuazione esponenziale (Velocità di propagazione delle onde di taglio) sono stati scelti in accordo a quanto riportato nel rapporto di indagine geologica. Nelle seguenti tabelle è evidenziato un dettaglio delle ipotesi assunte.

Parametro modello di bassa velocità	Valore
Vc	~1588 m/s
Vt	~800 m/s
Vs	~720 m/s
Alpha _{c,t,s}	[1-7]
Beta _{c,t,s}	[0.20 0.20 0.60]
K _{c,t,s}	[20 20 10]

Tabella 9 - Parametri impiegati nel modello di bassa velocità.

Parametro modello di bassa velocità	Valore
Vc	~800 m/s
η	0.00006

Tabella 10 - Parametri impiegati nel modello di attenuazione esponenziale

I parametri relativi alla tipologia del terreno nonché le velocità delle onde vibrazionali nel terreno sono stati scelti in accordo alla perizia geologica e geotecnica presentata nel corso del suddetto procedimento. Gli spettri di emissione per ciascuna lavorazione sono stati sommati logaritmicamente.

$$A_{TOT,f} = \sqrt{A_1(f,d)^2 + A_2(f,d)^2 + \dots + A_N(f,d)^2}$$

3.4 VALUTAZIONE PER DISTURBO DERIVANTE DA VIBRAZIONI

Si procede con la verifica del disturbo derivante da vibrazioni [4]. A tal fine viene applicata allo spettro di vibrazione misurato presso i ricettori, la ponderazione che riproduce la risposta del corpo umano.

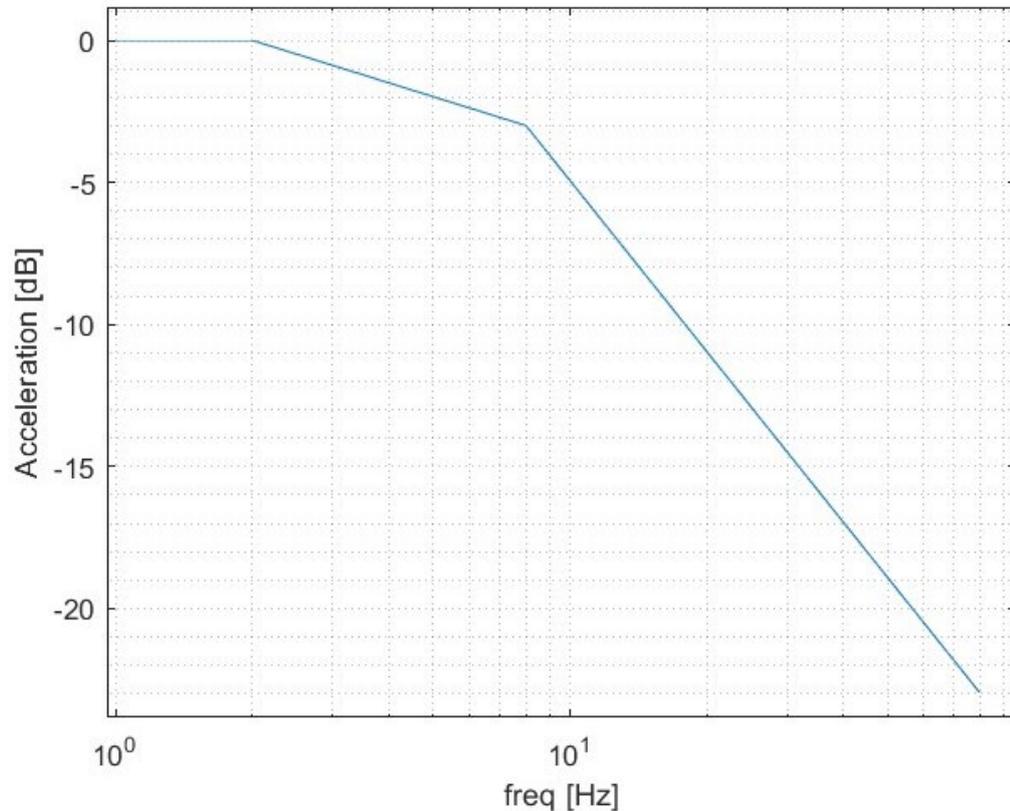


Figura 8 - Curva di risposta per filtro applicato allo spettro di accelerazione presso i ricettori per valutazioni di disturbo

Per una valutazione qualitativa del possibile disturbo avvertito dagli occupanti delle strutture, è stato applicato il filtro in figura 9 alle risposte simulate presso i ricettori e derivanti dalle emissioni prodotte in fase di lavorazione. Nella regione dai 50 ai 100 Hz si è sfruttata una interpolazione lineare per determinare il valore della attenuazione seguendo la pendenza del filtro. Si noti che il valore limite che identifica un possibile disturbo in ambiente abitativo in periodo diurno si attesta intorno ai 77 dB di accelerazione ponderata equivalente mentre la soglia di percezione è individuata intorno ai 71 dB.

3.5 IL CANTIERE

Il cantiere avrà una durata di 618 giorni.

Le attività possono essere suddivise in due macrofasi:

- Fase 1: Dismissione impianto esistente
- Fase 2: Realizzazione nuovo impianto e posa nuovi cavidotti
- Fase 3: Montaggio degli aerogeneratori + commissioning e avvio

La Fase 1 comprende le seguenti operazioni:

- Allestimento cantiere
- Adeguamento piazzole
- Smontaggio aerogeneratori
- Demolizione fondazioni
- Rimozione vecchi cavidotti

- Rinterri e ripristino morfologico

La Fase 2 comprende le seguenti operazioni:

- Adeguamenti viabilità comunale esistente
- Scavo/posa dei nuovi cavidotti
- Realizzazione strade e piazzole
- Realizzazione scavi e plinti di fondazione

La Fase 3, la meno impattante a livello acustico, comprende le seguenti operazioni:

- Montaggio aerogeneratori
- Commissioning/test e avviamento

Engineering & Construction

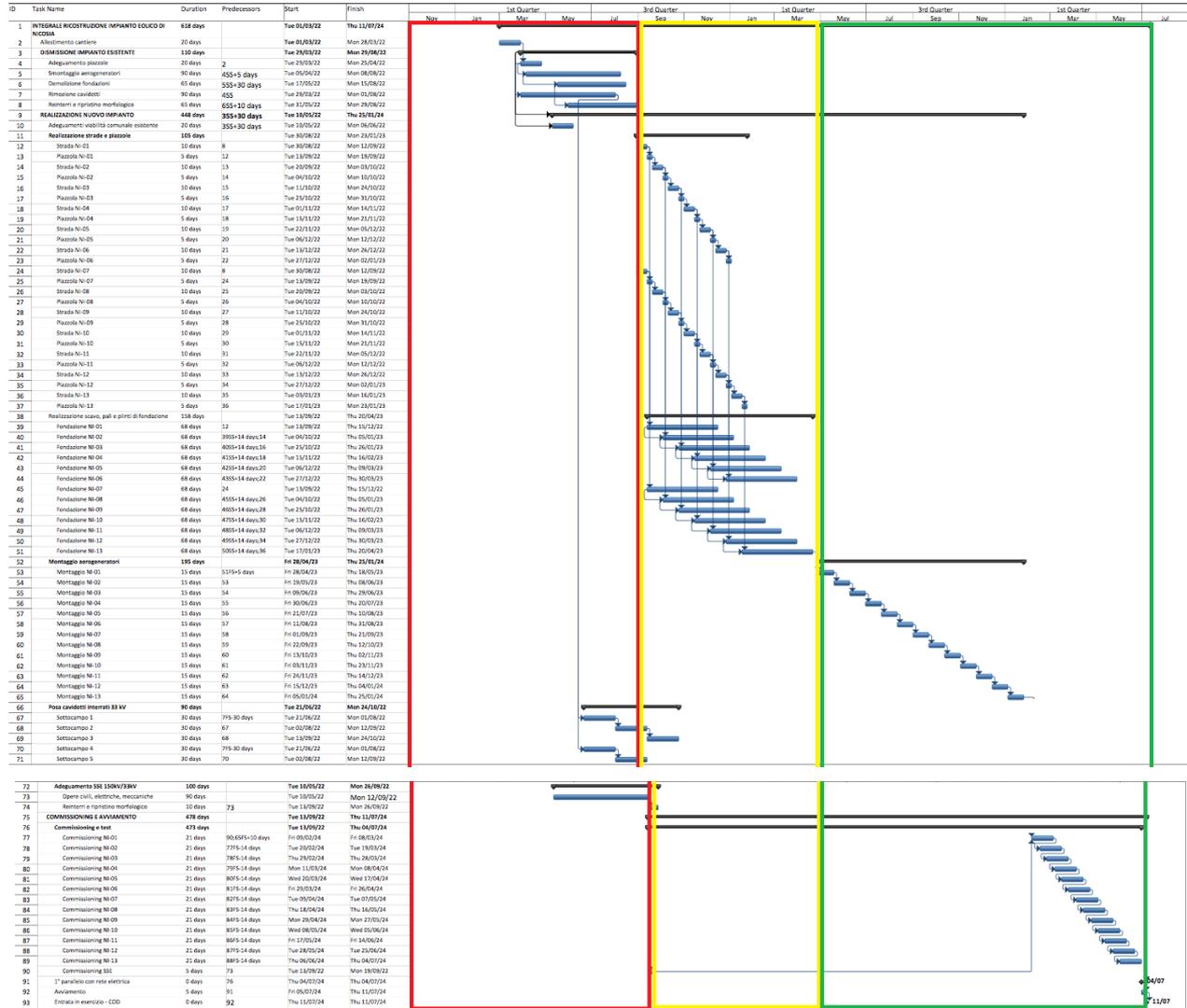


Figura 9 - Individuazione fasi di cantiere

3.5.1 LE SORGENTI DI CANTIERE

Le lavorazioni di cantiere prevedono l'impiego di diversi mezzi.

Nella tabella qui di seguito viene riportato l'elenco delle lavorazioni svolte e dei mezzi

Opera	Lavorazione	Mezzo
Adegualiamenti strade /piazze	Scavo / riporto	Pala meccanica cingolata
		Bobcat
		Autocarro
Smontaggio aerogeneratori	Smontaggio	Gru
	Trasporto componenti	Automezzo speciale
		Gru
Rimozione fondazioni	Scavo	Escavatore cingolato
		Autocarro
	Demolizione plinto	Martello demolitore
	Trasporto detriti	Autocarro
	Rinterro	Escavatore cingolato
Rimozione cavidotti	Scavo a sezione obbligato	Escavatore cingolato
Ripristini ambientali / rinaturalizzazione	Scavo / riporto	Pala meccanica cingolata
		Bobcat
		Rullo ferro-gomma
		Autocarro

Opera	Lavorazione	Mezzo
Fondazione	Scavo	Escavatore cingolato
		Autocarro
	Perforazione pali	Trivella perforazione pali
	Trasporto e installazione ferri	Autocarro
	Posa calcestruzzo pali	Betoniera (2)
		Pompa
	Posa magrone	Betoniera (2)
		Pompa
	Trasporto e installazione ferri	Autocarro
Posa calcestruzzo plinto	Pompa	
	Autocarro	
	Rinterro	Escavatore cingolato
Strade e piazzole	Scavo / riporto	Pala meccanica cingolata
		Bobcat
		Rullo ferro-gomma
		Autocarro
Cavidotti	Scavo a sezione obbligata	Escavatore cingolato
	Apertura trincee	Escavatore cingolato
		Taglia asfalto
Sottostazione elettrica	Trasporto componenti	Automezzo speciale
		Gru
	Montaggio	Gru
Montaggio aerogeneratori	Trasporto componenti	Automezzo speciale (4)
		Gru
	Montaggio	Gru

Tabella 11 - Elenco dei mezzi e strumenti utilizzati nel cantiere

L'impatto vibrazionale di ciascuna lavorazione è stato valutato considerando i mezzi impiegati operativi in contemporaneità.

3.6 IL MODELLO NUMERICO

Come evidenziato nelle sezioni precedenti, entrambi i meccanismi di propagazione impiegati dipendono fortemente dalla distanza sorgente-ricettore. Nel caso specifico si è scelto di ricostruire numericamente la scena a partire da mappe georeferenziate che riportano, per ciascun punto discreto, latitudine, longitudine ed elevazione. Si precisa che per fornire dettaglio alla superficie, si è successivamente provveduto ad interpolare linearmente i punti a disposizione.

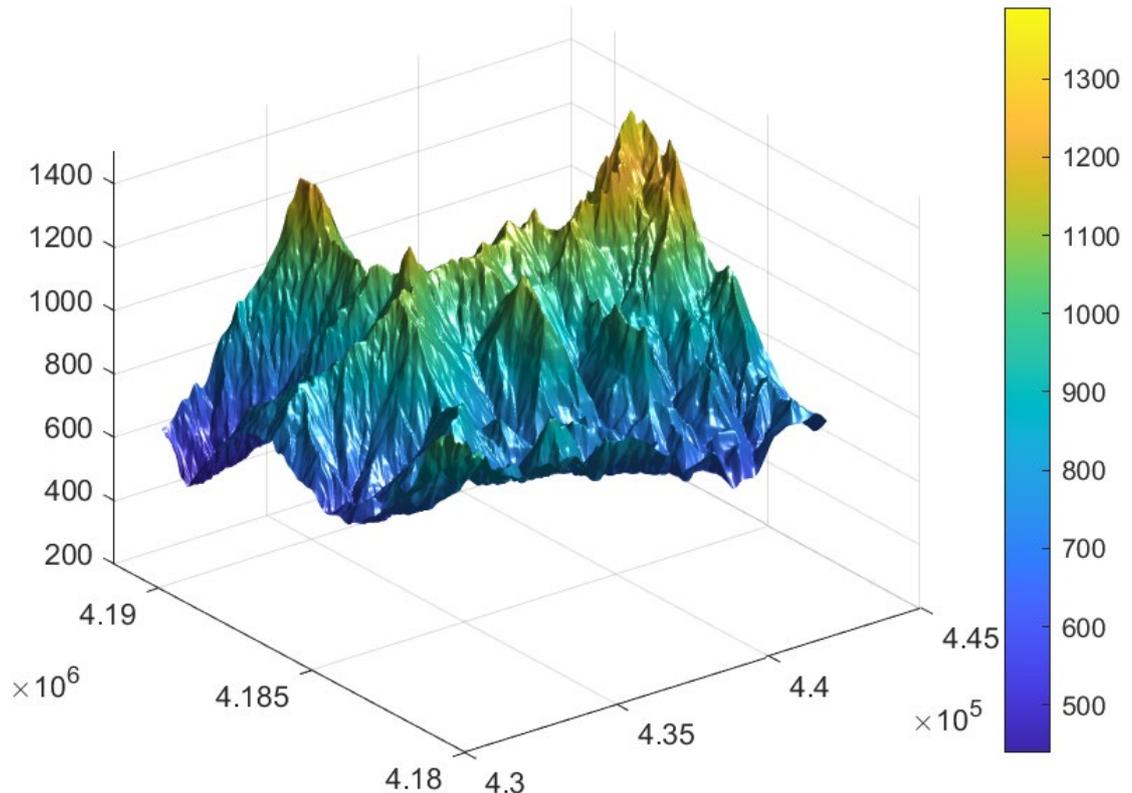


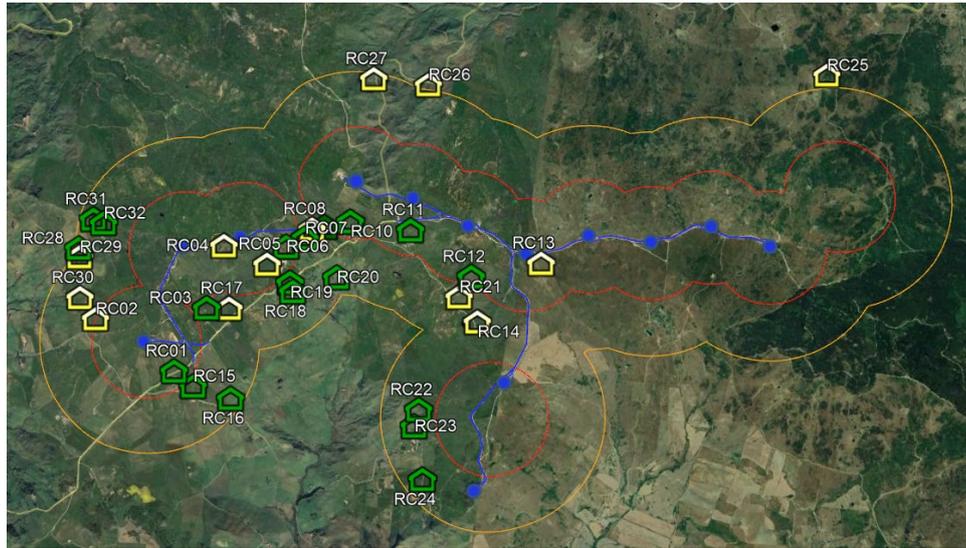
Figura 10 - Scena ricostruita, profilo di elevazione medio area interessata dal cantiere

Ricostruita la scena, è stato possibile determinare le distanze tra ricettori e linea di cantiere. Per ragioni di leggibilità, i risultati vengono divisi per ciascuno dei tratti comprendenti l'intervento. In particolare, sono state analizzate due condizioni:

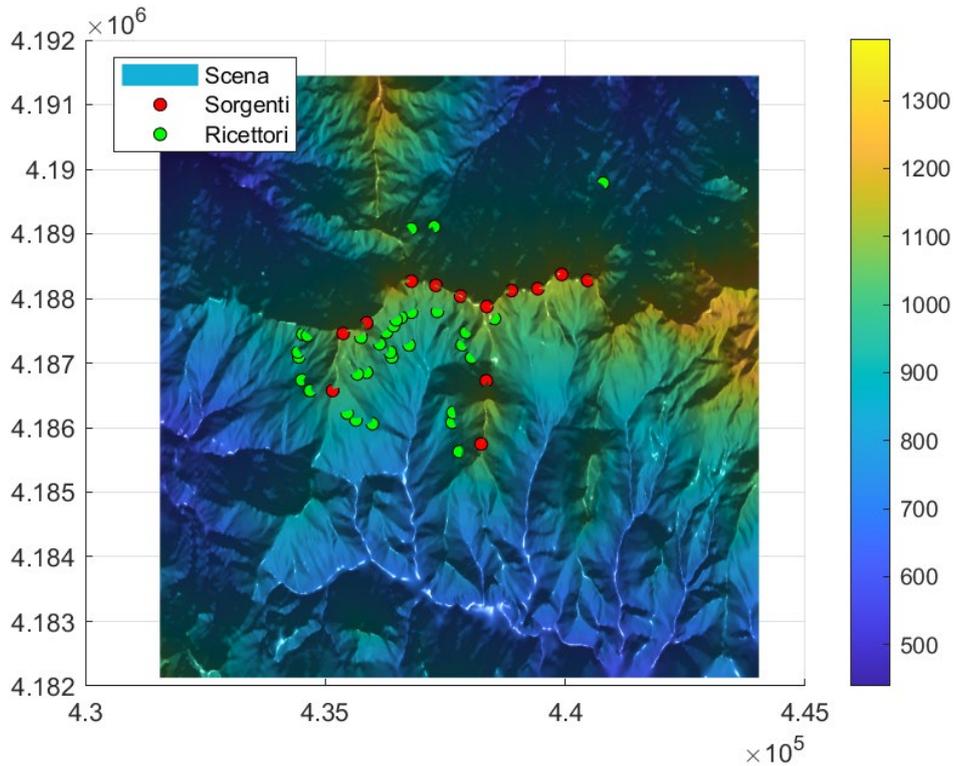
- Valutazione impatto vibrazionale per attività di cantiere in prossimità degli aerogeneratori
- Valutazione impatto vibrazionale per attività lungo la linea di cavidotto

Ricostruzione scena per attività di cantiere in prossimità degli aerogeneratori

Ortofoto area di cantiere

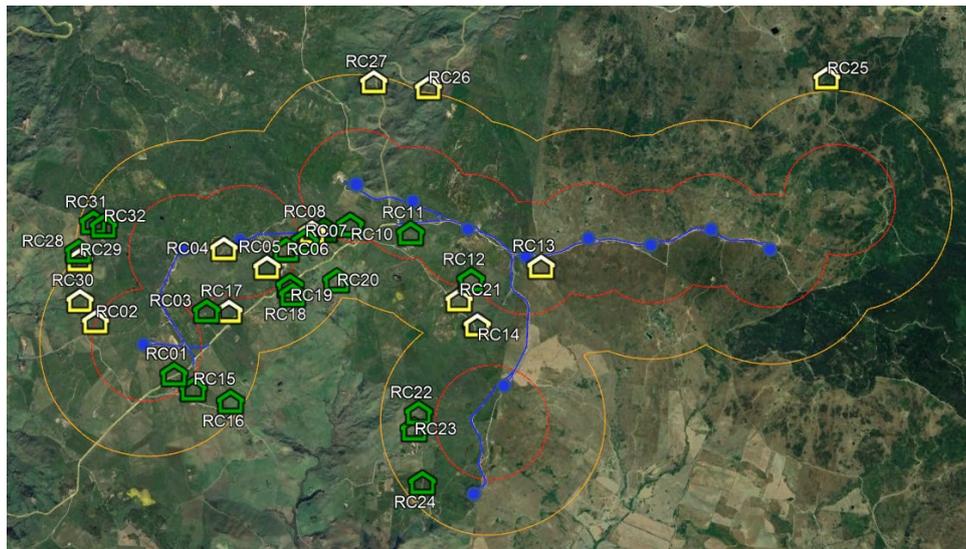


Ricostruzione scena

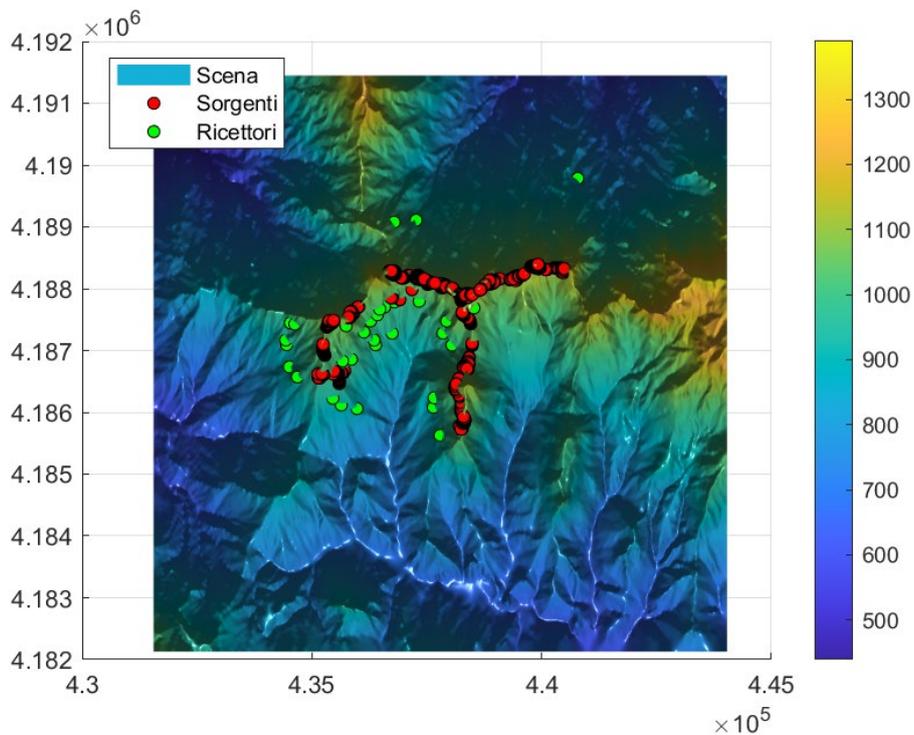


Ricostruzione scena per attività di cantiere lungo la linea di cavidotto

Ortofoto area di cantiere



Ricostruzione scena



Il dettaglio relativo alla distanza sorgente- ricevitore e al profilo altimetrico locale è riportato in allegato (GRE.EEC.R.99.IT.W.12420.05.054.00 - SCHEDE VIBRAZIONI NICOSIA - LINEA CAVIDOTTO, GRE.EEC.R.99.IT.W.12420.05.054.00 - SCHEDE VIBRAZIONI NICOSIA - AEROGENERATORI).

Essendo il modello di propagazione fortemente dipendente dalla distanza tra sorgente e ricettore, si è ritenuto opportuno prendere come riferimento per la valutazione dell'impatto complessivo delle lavorazioni la coppia costituita dal ricettore RC13 e dalla WTG NI07 (il ricettore RC13 è il più prossimo ad un aerogeneratore in progetto) e quella costituita dal ricettore RC10 ed il tratto di linea cavidotto (cantiere) situato alle coordinate 37°50'7.13"N 14°16'54.19"E (il ricettore RC10 è il più prossimo ad un tratto di cavidotto in progetto). Tali coppie, infatti, sono caratterizzate dalle minime distanze fra sorgente vibrazionale e ricettore; verificando quindi la conformità rispetto ai limiti consentiti di tali casi, si può dedurre il rispetto dei limiti consentiti anche per tutti gli altri ricettori, situati ad una distanza maggiore dalle sorgenti vibrazionali.

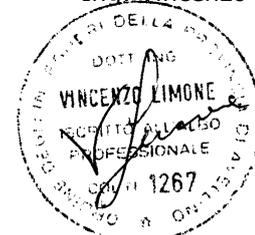
4. **RISULTATI E DISCUSSIONE**

I risultati relativi alla simulazione numerica dell'impatto delle lavorazioni presso i ricettori sono riportati in allegato (Risultati impatto vibrazionale RC13 ed RC10). Nell'ambito della valutazione dell'impatto vibrazionale relativo alle lavorazioni svolte in prossimità degli aerogeneratori, sono state simulate tutte le lavorazioni descritte in tabella 11. Il ricettore indagato è stato RC13 posto a circa 250 m dall'area di cantiere. Appare evidente (Risultati impatto vibrazionale RC13) che in nessun caso vengono raggiunti i 71 dB definita come soglia di percezione umana (6 dB più bassa di quella di disturbo) definita nei principali standard di settore. Nell'ambito della valutazione dell'impatto vibrazionale relativo alle lavorazioni svolte in prossimità della linea di scavo del cavidotto, si è deciso di indagare il ricettore RC10, distante circa 80 m della linea di cantiere. Anche in questo caso, non vengono superati i 77 dB definiti come soglia di disturbo per abitazioni in periodo diurno (Risultati impatto vibrazionale RC10). Si riporta, inoltre, che il modello è basato su presupposti di conservatività in quanto si è optato per utilizzare la massima possibile delle velocità delle onde di taglio e del coefficiente η relativi alla tipologia di suolo in esame. Anche gli spettri di emissione appaiono conservativi se confrontati con misure effettuate in campo con macchinari simili su terreni di durezza maggiore.

5. **CONCLUSIONI**

Lo studio previsionale vibrazionale effettuato ha escluso un superamento della soglia di disturbo per tutti i ricettori presenti all'interno dell'area indagine. Data la bassa entità delle vibrazioni stimate, sono state invece escluse eventuali problematiche legate al danno agli edifici. È opportuno notare che l'analisi implementata è influenzata dall'incertezza derivante, oltre che dal modello di attenuazione, dal locale scostamento dal profilo di caratterizzazione del terreno approssimato riportato rispetto alle reali condizioni geologiche in prossimità dei ricettori. Si precisa che gli spettri di sollecitazione utilizzati nel calcolo sono da ritenersi comunque sovrastimati. Il modello è da considerarsi conservativo anche in virtù del fatto che le distanze utilizzate per il calcolo dell'attenuazione fanno riferimento alla distanza tra il ricettore e l'ipotetica linea di scavo/rinterro e non tengono conto dell'effettivo posizionamento dello specifico macchinario all'interno dell'area di lavoro. Altro aspetto da considerare è la supposta contemporaneità di utilizzo dei macchinari nell'ambito della singola lavorazione analizzata. Si ritiene dunque che sussistano le condizioni per lo sviluppo del cantiere (visto il suo carattere temporaneo) con la possibilità di effettuare misure di vibrazione in loco qualora dovessero palesarsi conclamate dinamiche di disturbo ai ricettori.

Ing. Vincenzo Limone



Bibliografia

[1] Todd Busch, "Generic third-octave band vibration spectra for construction equipment", Todd Busch Consulting, Mississauga, Ontario, Canada.

[2] Giuseppe MARSICO, Ernesto Monaco, Francesco Amoroso, Vincenzo Limone, Salvatore Curcuruto, et al... Propagation of vibrations induced on track: implementation of previsual models for low and high-speed trains and comparison with experimental measurements. Société Française d'Acoustique. Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France. <hal-00810889>

[3] Salvatore Curcuruto, Delio Atzori, Rinaldo Betti, Giuseppe Marsico and Enrico Mazzocchi, Ernesto Monaco, Francesco Amoroso and Vincenzo Limone, Giuseppe Loprencipe, Models to predict the railway vibrations: preliminary results and comparison with experimental measurements.

[4] A. Farina, VALUTAZIONE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONI IN EDIFICI RESIDENZIALI

Normativa, tecniche di misura e di calcolo, Universit  degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale