




Impianto di produzione di energia elettrica agrivoltaico di potenza nominale pari a 71,05 MWp situato nei Comuni di Troia (FG), Lucera (FG) e Biccari (FG) e relative opere di connessione alla RTN nel Comune di Troia (FG), in provincia di Foggia

STUDIO SULLE VIBRAZIONI

Nov. 2023	00	Richiesta A.U.	GIUSEPPE DE SCISCIO	PASQUALE IORIO	MASSIMO LEPORE
Data	Rev.	Descrizione Emissione	Preparato	Verificato	Approvato
Logo Committente e Denominazione Commerciale			ID Documento Committente		
			H004_FV_BGR_00125		
Logo Appaltatore e Denominazione Commerciale			ID Documento Appaltatore		
			SEZIONE SIA 00125_Studio sulle vibrazioni		
<p>sede legale e operativa San Martino Sannita (BN) Loc. Chianarile snc Area Industriale</p> <p>sede operativa Lucera (FG) via A. La Cava 114 P.IVA 01465940623 Azienda con sistema gestione qualità Certificato N. 50 100 11873</p> <p>Il Progettista Dott. Ing. Massimo Lepore</p>					



ID Documento Committente
H004_FV_BGR_00125


Pagina
2 / 26

Numero
Revisione

00

INDICE

1.	PREMESSA	4
1.1.	DESCRIZIONE SINTETICA DEL PROGETTO	5
1.2.	INDIVIDUAZIONE E SCELTA DEI RECETTORI	7
2.	CENNI TEORICI SULLE VIBRAZIONI	12
2.1.	DEFINIZIONI E NOZIONI GENERALI (FONTE ISPRA)	12
2.2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	15
2.3.	CASO STUDIO E PARAMETRI DI TRASMISSIONE DELLE VIBRAZIONI	15
2.4.	MODELLO PREVISIONALE	17
2.5.	RISCHIO DEL DANNO A STRUTTURE ED EDIFICI	19
2.6.	RISCHIO ESPOSIZIONE UMANA – RISCHIO DISTURBO	20
3.	STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO	21
4.	STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE	22
5.	CONCLUSIONI	25
	BIBLIOGRAFIA	26

	ID Documento Committente H004_FV_BGR_00125	Pagina 4 / 26
		Numero Revisione
		00


1. PREMESSA

Il progetto proposto riguarda la realizzazione di un impianto di tipo agrivoltaico di potenza nominale pari a 71,05 MWp da installarsi in provincia di Foggia, nei territori comunali di Troia, Lucera e Biccari.

Proponente dell'iniziativa è la società Iren Green Generation Tech s.r.l.

L'impianto consta di sedici campi che si sviluppano nella parte settentrionale del territorio di Troia, interessando anche le zone immediatamente limitrofe di Biccari e Lucera. Gli stessi sono collegati a mezzo di un cavidotto MT interrato che si diparte dalla cabina di raccolta presente all'interno del Campo 14 e che arriva fino alla stazione elettrica di trasformazione 30/150 kV di utenza sita alla località "Monsignore" del comune di Troia. In particolare, per la connessione alla rete RTN sarà realizzato il prolungamento del sistema sbarre in AT 150 kV, all'interno dell'esistente stazione elettrica condivisa e di trasformazione.

La presente relazione, nel dettaglio, si pone lo scopo di valutare l'entità delle vibrazioni generate durante la fase di cantiere, per la realizzazione del progetto, e durante la fase di esercizio dell'impianto fotovoltaico al fine di verificare che queste non arrechino disturbo alle attività circostanti, alla popolazione umana ed in generale ai recettori sensibili presenti.

	ID Documento Committente H004_FV_BGR_00125	Pagina 5 / 26
		Numero Revisione
		00

1.1. Descrizione sintetica del progetto

Come detto, l'impianto consta di sedici campi che si sviluppano nella parte settentrionale del territorio di Troia, interessando anche le zone immediatamente limitrofe di Biccari e Lucera. Gli stessi sono collegati a mezzo di un cavidotto MT interrato che si diparte dalla cabina di raccolta presente all'interno del Campo 14 e che arriva fino alla stazione elettrica di trasformazione 30/150 kV di utenza sita alla località "Monsignore" del comune di Troia. In particolare, per la connessione alla rete RTN sarà realizzato il prolungamento del sistema sbarre in AT 150 kV, all'interno dell'esistente stazione elettrica condivisa e di trasformazione.

La viabilità locale garantisce l'accesso anche a mezzi di portata e dimensione superiore agli autoveicoli, ed in particolare l'area nord è servita dalla SP 132 e quindi da una strada locale che si interseca con quest'ultima, mentre l'area sud è servita dalla SP 125, anch'essa collegata ad una strada locale che lambisce le aree di impianto.

Il progetto proposto non insiste all'interno di nessuna area protetta, tantomeno in aree SIC o ZPS.

Si prevede l'occupazione di una superficie pari a circa **157,73 Ha**, tutti ricadenti in aree agricole; la **vegetazione** presente al momento delle ispezioni e dei rilievi in sito (estate/autunno 2023) risulta infatti costituita da ampie distese di colture estensive ad indirizzo cerealicolo con presenza elevata di uno strato erbaceo caratterizzato, a livello intercalare, da malerbe infestanti di natura spontanea.

Si riporta di seguito l'inquadramento territoriale su planimetria satellitare estratta da Google Earth con evidenza dei campi fotovoltaici e del cavidotto di connessione dell'impianto alla Rete di Trasmissione Nazionale.

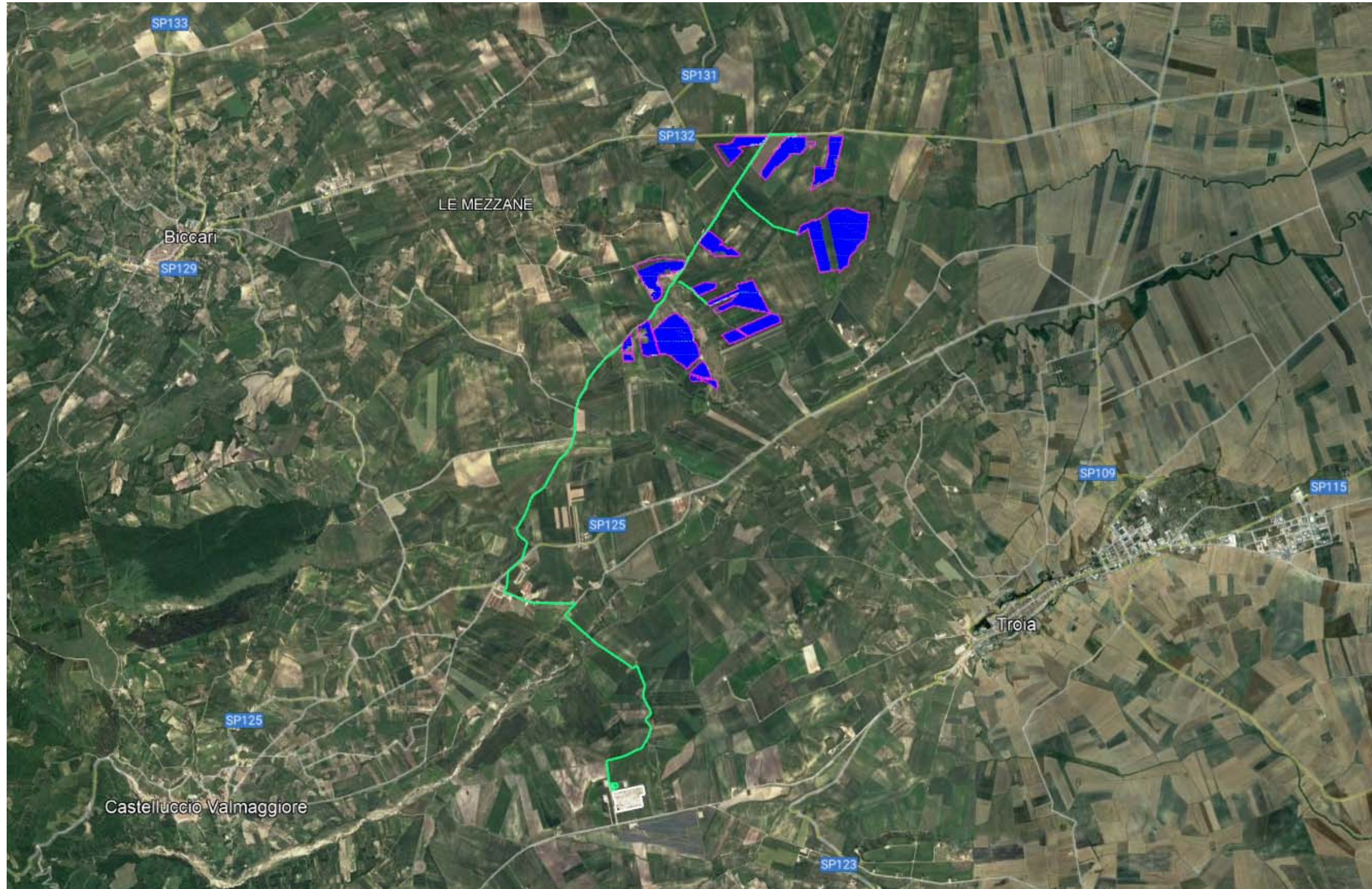


Figura 1: Inquadramento territoriale dell'area di installazione dei campi fotovoltaici e del tracciato del cavidotto di connessione su stralcio ortofotografico estratto da Google Earth.

1.2. Individuazione e scelta dei recettori

Ai fini della previsione degli impatti indotti dall'impianto di progetto, sono stati individuati i "ricettori sensibili", facendo riferimento al **DPCM 14/11/97** e alla **Legge Quadro n.447/95**, che stabiliscono che la verifica dei limiti di immissione acustica va effettuata in corrispondenza degli ambienti abitativi, definiti come:

"ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o di comunità ed utilizzato per le diverse attività umane, fatta eccezione per gli ambienti destinati ad attività produttive per i quali resta ferma la disciplina di cui al D.Lgs. 15 agosto 1991, n. 277 (2), salvo per quanto concerne l'immissione di rumore da sorgenti sonore esterne ai locali in cui si svolgono le attività produttive".

Per il sito in esame, sono state prese in considerazione e valutate tutte le strutture presenti nell'area limitrofa i punti di futura installazione dell'impianto di progetto, in un buffer di 500 m dall'area di installazione dei moduli e 100 m dal tracciato del cavidotto di connessione. Per il dettaglio e i criteri di scelta dei recettori da considerare per l'impatto dovuto alle vibrazioni derivanti dall'installazione e dall'esercizio delle apparecchiature dell'impianto, nonché dei recettori individuati lungo il tracciato del cavidotto di connessione si faccia riferimento all'elaborato:

H004_FV_BGD_00119	PLANIMETRIA SU ORTOFOTO CONTENENTE L'INDIVIDUAZIONE DEI FABBRICATI DESUNTI DA CARTOGRAFIE
H004_FV_BGD_00120	PLANIMETRIA SU C.T.R. CONTENENTE L'INDIVIDUAZIONE DEI FABBRICATI DESUNTI DA CARTOGRAFIE
H004_FV_BGD_00121	PLANIMETRIA SU CATASTALE CONTENENTE L'INDIVIDUAZIONE DEI FABBRICATI DESUNTI DA CARTOGRAFIE
H004_FV_BGR_00122	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA RELATIVA AI FABBRICATI NON CONSIDERATI RECETTORI ED ESCLUSI DALLE ANALISI ACUSTICHE

Pertanto, sono state individuate 17 strutture aventi caratteristiche di abitabilità, e sebbene a distanze significative dalle sorgenti emmissive, risultano essere le uniche strutture potenzialmente esposte alle emissioni acustiche e alle vibrazioni derivanti dal funzionamento delle apparecchiature durante la fase di esercizio dell'impianto e dei macchinari e dei mezzi di movimentazione che operano durante la fase di cantiere.

A seguire saranno proposte le tabelle di inquadramento dei recettori, la matrice delle distanze dei recettori dalle cabine di campo che ospiteranno inverter e trasformatori presenti nel layout dell'impianto nonché le immagini relative alle porzioni di territorio interessate rispettivamente dall'impianto di progetto (con dettaglio del posizionamento delle cabine) e dai recettori individuati e considerati nel modello di stima previsionale.

È bene sottolineare che è stato considerato il numero massimo possibile di cabine (e relative sorgenti di vibrazioni di esercizio) come da layout di progetto, il tutto a vantaggio di sicurezza poiché in fase esecutiva il numero di cabine effettivamente occupate potrebbe ridursi, e con esso il numero di sorgenti di vibrazioni.

Tabella 1: Coordinate di inquadramento geografico dei recettori sensibili individuati in un buffer di 500 m dall'area di installazione dei moduli FV.

ID RICEVITORE	Coordinate UTM WGS 84 33N		Quota
	X	Y	
	[m]	[m]	[m]
R01A	521936	4584136	278
R01B	521935	4584088	279
R02	522004	4584246	275
R03	522538	4584404	288
R04	523399	4584570	311
R05	523480	4584068	305
R06	521917	4582661	310
R07	522410	4581547	326
R08	524154	4581877	284

Tabella 2: Coordinate di inquadramento geografico dei recettori sensibili individuati in un buffer di 100 m dal tracciato del cavidotto di connessione.

ID RICEVITORE	Coordinate UTM WGS 84 33N		Quota
	X	Y	
	[m]	[m]	[m]
E01	520247	4579391	370
E02	519970	4579137	385
E03	520067	4579056	381
E04	520100	4579036	379
E05	520296	4579032	375
E06	520683	4578975	360
E07	520762	4578933	358
E08	520809	4578975	357

Tabella 3: Inquadramento geografico – coordinate dei recettori dell’area campo FV nel sistema UTM WGS 84 fuso 33 e distanze con le cabine di campo che ospiteranno inverter e trasformatori.

COORDINATE E MATRICE DISTANZE SORGENTI / RECETTORI [m]											
recettore		R01A	R01B	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	
sorgente sonora	Coordinate WGS 84 UTM34 [m]		521936	521935	522004	522538	523399	523480	521917	522410	524154
			4584136	4584088	4584246	4584404	4584570	4584068	4582661	4581547	4581877
c1	521371	4581846	2359	2312	2482	2812	3396	3064	981	1081	2783
c2	521701	4581738	2409	2362	2526	2794	3302	2932	948	734	2457
c3	521755	4581882	2261	2213	2377	2641	3151	2785	796	736	2399
c4	522124	4582017	2127	2080	2232	2423	2854	2459	676	550	2035
c5	522197	4581839	2312	2264	2415	2588	2984	2572	868	361	1957
c6	522139	4581638	2506	2458	2611	2795	3191	2775	1047	286	2029
c7	522259	4581495	2661	2613	2763	2922	3280	2848	1215	160	1933
c8	521985	4582685	1452	1404	1561	1806	2356	2037	72	1215	2315
c9	522356	4582468	1720	1674	1813	1945	2347	1955	480	923	1893
c10	522977	4582165	2229	2187	2297	2282	2442	1968	1170	839	1212
c11	522917	4582398	1996	1955	2061	2041	2225	1762	1034	991	1342
c12	522478	4582996	1262	1220	1337	1409	1824	1467	653	1451	2015
c13	523606	4582676	2218	2188	2243	2031	1905	1398	1689	1645	969
c14	523503	4583027	1920	1893	1932	1681	1547	1041	1628	1840	1321
c15	523744	4583031	2119	2095	2122	1827	1577	1070	1864	1995	1225
c16	524081	4583034	2412	2391	2405	2063	1681	1196	2196	2237	1159
c17	523779	4583938	1854	1850	1802	1326	737	326	2258	2755	2095
c18	523686	4583988	1756	1754	1702	1221	649	221	2211	2754	2162
c19	523373	4584009	1443	1440	1389	924	562	122	1984	2644	2271
c20	523232	4584178	1297	1300	1230	730	426	271	2008	2756	2479
c21	522813	4584102	878	878	822	408	750	668	1697	2587	2598

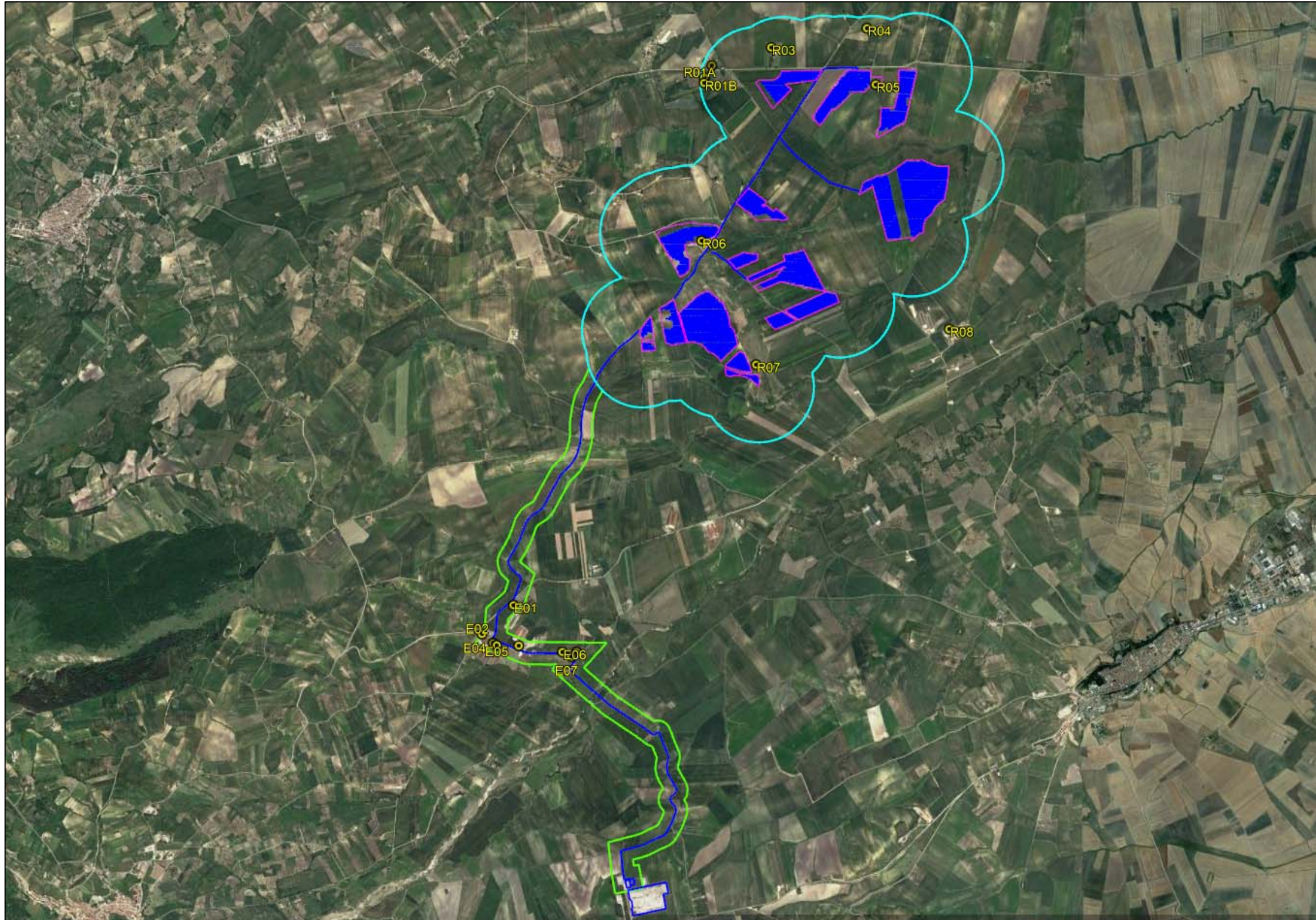


Figura 2: Inquadramento territoriale su ortofoto estratta da Google Earth dell'area di installazione dei moduli (pannellatura in blu), del relativo buffer di 500 m (in ciano), con evidenza dei recettori individuati (etichette gialle con sigle R2, R3, ed E01, E02...,etc), del tracciato del cavidotto (in blu) e del relativo buffer di 100 m. (in verde)

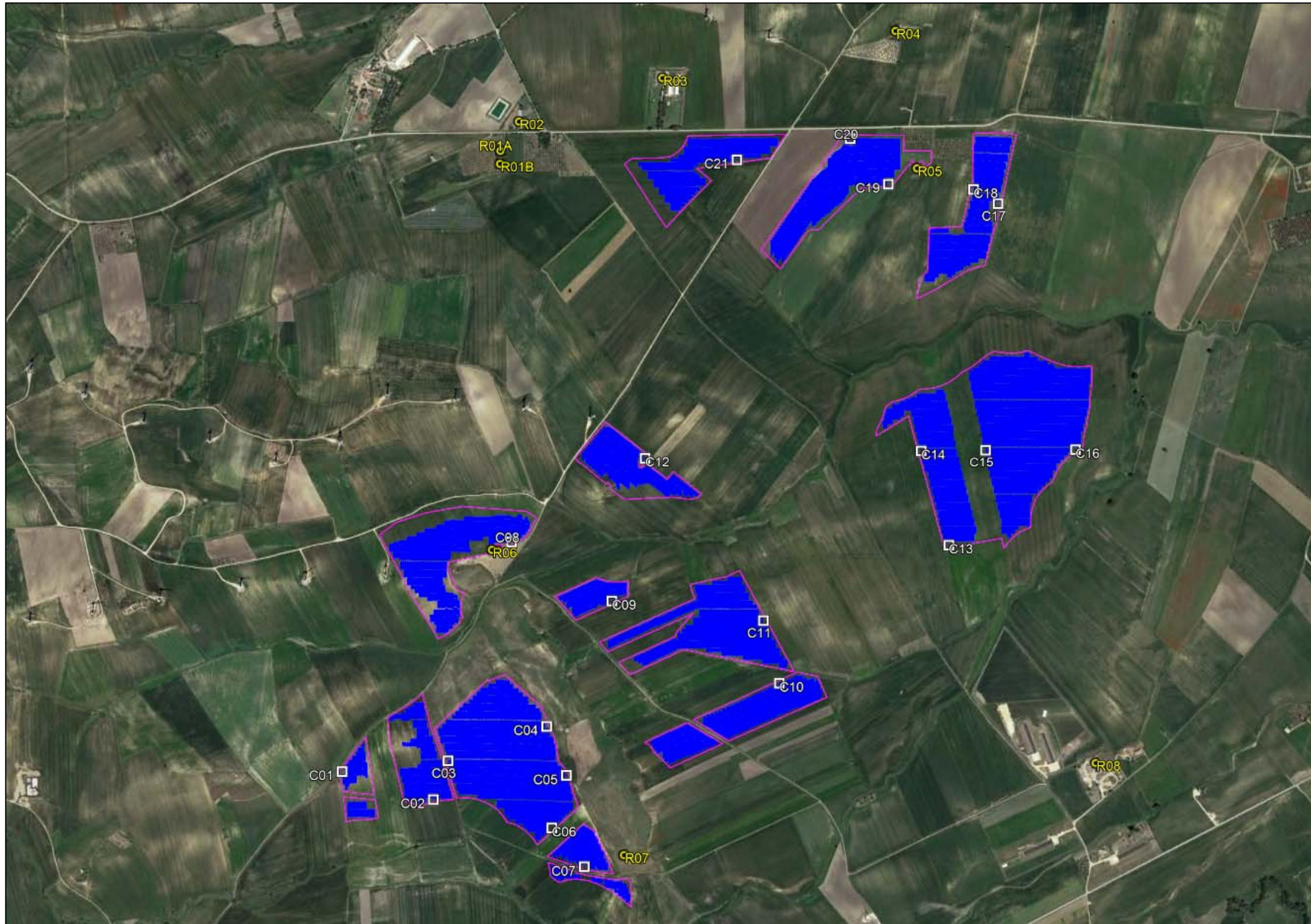


Figura 3: Inquadramento territoriale su ortofoto estratta da Google Earth dell'area di installazione dei moduli (pannellatura in blu), con evidenza dei recettori individuati per l'area campo FV (R), degli inverter e dei trasformatori alloggiati all'interno delle cabine di campo (quadrati in bianco con etichetta C).

2. CENNI TEORICI SULLE VIBRAZIONI

2.1. Definizioni e nozioni generali (fonte ISPRA)

Le vibrazioni sono oscillazioni meccaniche generate da onde di pressione che si trasmettono attraverso i corpi ovvero è definito vibrazione un fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido, liquido o gassoso. Una vibrazione è costituita da una fluttuazione rapida intorno ad una posizione di equilibrio; il movimento netto dell'elemento posto in vibrazione è quindi nullo.

L'oscillazione è il movimento che un punto mobile compie per ritornare alla posizione di partenza.

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

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

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

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

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

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

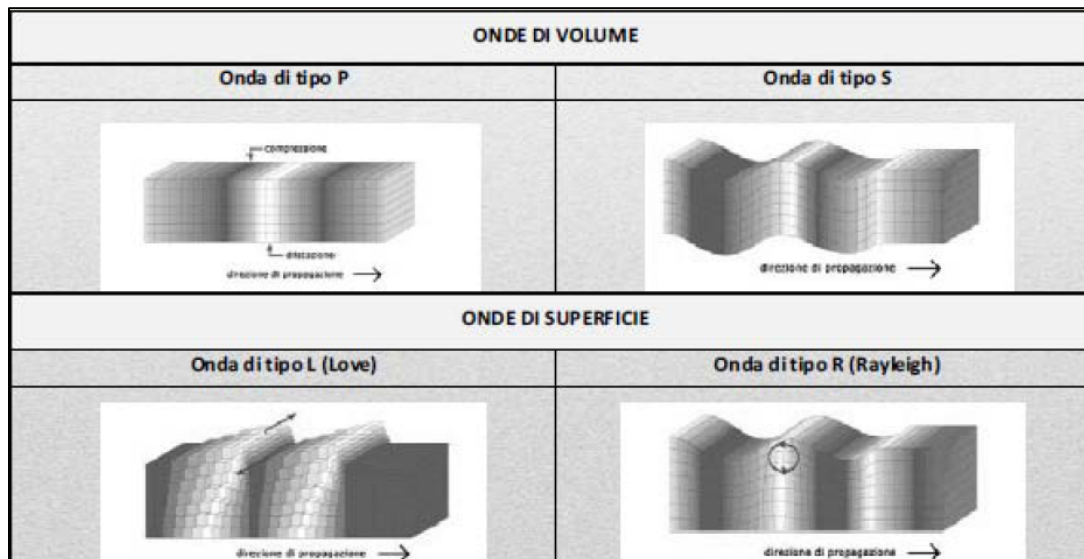


Figura 4: Differenti tipologie di Onde di Volume e Superficie

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

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

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

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

$$w_2(d, f) = w_1(d_0, f) \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \cdot e^{-\alpha f(d-d_0)}$$

dove: α è il coefficiente di attenuazione del materiale, c la velocità di propagazione in m/s, f la frequenza in Hz, d la distanza in m e d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

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

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

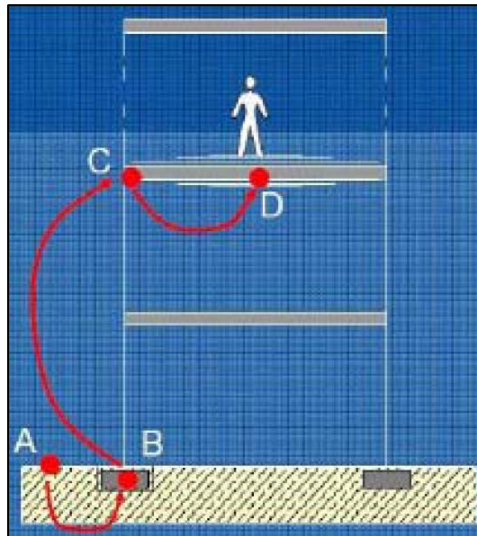


Figura 5: Schematizzazione semplificata della propagazione delle vibrazioni nel sistema terreno-edificio

Differenti tipologie di fondazioni forniscono diversi effetti di attenuazione o amplificazione del fenomeno vibratorio come evidenziato nelle immagini a seguire.

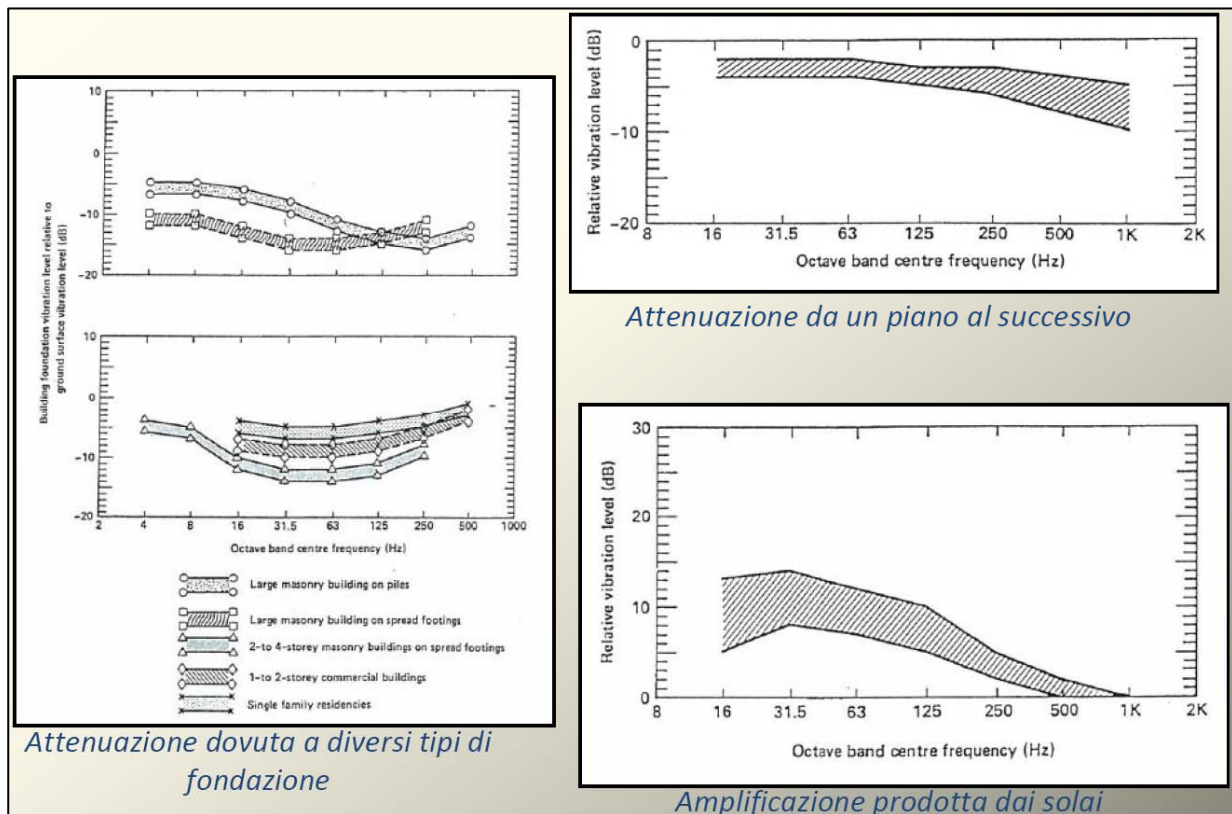



Figura 6: Esempi di Attenuazione/Amplificazione dei fenomeni vibratorii/oscillatori nei differenti elementi

	ID Documento Committente H004_FV_BGR_00125	Pagina 15 / 26
		Numero Revisione
		00

2.2. Normativa di riferimento

Allo stato attuale non esiste una norma a livello nazionale che stabilisca valori limite per l'esposizione alle vibrazioni; tuttavia esistono alcune norme tecniche nazionali ed internazionali cui si può far riferimento e che possono fungere da indicatori. Tali norme sono distintamente orientate e relative a:

Esposizione Umana:

- ISO 2631-2: Valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione del corpo intero – Vibrazione negli edifici.
- UNI 9614: Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo
- UNI 11048: Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo

Danni ad edifici:

- ISO 9916: Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici

Le aree di cantiere per la realizzazione di impianti eolici, e le tematiche ad esse relative oggetto di tale relazione, interessano solitamente suoli e zone a carattere quasi esclusivamente di tipo rurale localizzate e pertanto in luoghi ove la presenza di strutture ed edifici è solitamente scarsa, poco concentrata e costituita per lo più da fabbricati per il ricovero di mezzi agricoli o, in casi meno frequenti, da strutture abitative di altezza comunque contenuta (max 2-3 piani) e le cui distanze, anche nell'ottica del rispetto dei requisiti di impatto acustico per la realizzazione delle turbine, risulta quasi sempre non inferiore i 200-300 m in linea d'aria.

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

2.3. Caso studio e parametri di trasmissione delle vibrazioni

Le vibrazioni possono essere valutate in tre diverse modalità:

- in termini di spostamento (variazione della posizione di un corpo o di una particella, che è di solito misurata a partire dalla media delle posizioni assunte dal corpo o dalla particella stessa oppure dalla posizione di quiete);
- in termini di velocità (variazione dello spostamento rispetto al punto di riferimento, in un determinato intervallo di tempo):

Si utilizza o il valore di picco (PPV peak particle velocity) definito come il picco massimo istantaneo positivo o negativo del segnale di vibrazione: tale grandezza è utile per valutare i danni potenziali agli edifici ma non è adeguata per valutare la risposta umana.

La grandezza collegata alla risposta umana alle vibrazioni è il valore efficace della velocità (RMS), definito come la radice quadrata della media della velocità istantanea al quadrato.

Infine si utilizza, come per le grandezze acustiche, il livello associato al valore efficace della velocità L_V , che si misura in dB ed è definito a seguire attraverso l'equazione:

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

dove v è il valore efficace della velocità istantanea e v_0 è il valore di riferimento ($v_0 = 10^{-9}$ m/sec)
In termini di accelerazione: le grandezze impiegate sono le corrispondenti a quelle descritte per la velocità.

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

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

dove a è il valore efficace dell'accelerazione istantanea e a_0 è il valore di riferimento ($a_0 = 10^{-6}$ m/sec²)

I parametri fisici che influenzano le vibrazioni via terra si possono dividere in tre categorie:

- 1) Fattori legati a tipologie di sorgenti e modalità operative (Fase di Cantiere)**
- 2) Fattori Geologici**
- 3) Fattori Strutturali e caratteristiche dei recettori (Edifici-Strutture e Fabbricati)**

1. Sorgenti e modalità operative:

In questa categoria sono inclusi tutti i parametri collegati ai mezzi di escavazione e sbancamento del materiale. Le attività connesse alla fase di escavazione generano livelli vibratorii 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) che, però nel caso studio, non sono impiegati.

2. Fattori Geologici:

Le condizioni e la tipologia del suolo e del substrato influenzano fortemente i livelli vibratorii, in particolare assumono particolare rilievo la rigidità, lo smorzamento interno del terreno e la profondità del substrato

roccioso. Fattori quali la stratificazione del terreno e profondità delle falde acquifere possono avere effetti significativi sulla propagazione delle vibrazioni via terra.

3. Fattori Strutturali e caratteristiche dei recettori (Edifici-Strutture e Fabbricati):

I problemi legati alla vibrazione via terra si hanno quasi esclusivamente all'interno degli edifici. Quindi le caratteristiche dei recettori costituiscono una componente fondamentale nella valutazione delle vibrazioni. Le vibrazioni indotte da mezzi di escavazione possono essere percepite da persone che si trovano all'esterno, ma è raro che provochino lamenti. I livelli di vibrazione dentro un edificio dipendono dall'energia vibratoria che raggiunge le fondazioni, dall'accoppiamento tra le fondazioni ed il terreno e dalla propagazione della vibrazione attraverso la struttura dell'edificio. Come regola generale si può affermare che più è massivo l'edificio, minore è la sua risposta all'energia vibratoria incidente sul terreno. Le sorgenti di vibrazioni provocano effetti che si propagano attraverso il terreno e diminuiscono di intensità con la distanza.

Gli edifici subiscono effetti che si possono classificare in una scala da non percepibili (livelli di vibrazione bassi), a suoni a bassa frequenza e vibrazioni percepibili (livelli di vibrazione medi) fino a livelli tali da provocare danni alle strutture.

2.4. Modello previsionale

Tutte le fonti bibliografiche ai fini delle elaborazioni dei modelli previsionali indicano l'utilizzo di modelli semplificati globali in luogo alle stime afferenti all'utilizzo degli elementi finiti. Pertanto, anche in tale elaborato la valutazione previsionale viene elaborata attraverso l'utilizzo di un modello di propagazione classico la cui procedura per la stima delle vibrazioni indotte viene riportata a seguire:

1. si determinano le apparecchiature impiegate e i relativi livelli di vibrazione forniti, generalmente, a una distanza di riferimento; nel caso in oggetto è stato considerato il valore relativo all'utilizzo della ruspa cingolata [rif. A. Farina "Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali, Normativa, tecniche di misura e di calcolo", neo- Eubios n. 16 (2006)] misurato a distanza di 5 m dal centro della sorgente
2. si applica il modello di propagazione classico per la stima del livello di accelerazione prevista descritto dalla seguente equazione (Dong-Soo, Jin-Sun Lee):

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

dove, w_1 e w_2 rappresentano le ampiezze delle vibrazioni rispettivamente alla distanza r_1 e r_2 dalla sorgente; n è il coefficiente di smorzamento geometrico; α è il coefficiente di smorzamento del materiale.

Il coefficiente di smorzamento geometrico rappresenta l'attenuazione che si verifica a causa della diminuzione della densità di energia all'aumentare della distanza dalla sorgente e può

essere determinato conoscendo il tipo onda che si propaga, il tipo di sorgente e il luogo di emissione della vibrazione, che generalmente varia tra 0,5 e 2,0. Il coefficiente di smorzamento del materiale tiene conto della riduzione di energia delle vibrazioni a causa dell'attrito e della coesione tra le particelle di terreno, essendo quest'ultimo non perfettamente elastico. Questa attenuazione, dovuta allo smorzamento del materiale, è influenzata dal tipo di terreno e dalla frequenza delle vibrazioni: α può essere calcolato come:

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

dove:

η rappresenta il fattore di perdita del terreno,

c rappresenta la velocità di propagazione dell'onda [m/s].

Ne consegue pertanto che per substrati meno duri (più soffici, con minore presenza di componente rocciosa), il valore di attenuazione del mezzo di propagazione risulta più elevato del corrispondente valore per i substrati duri (rocciosi). Tanto più sarà compatta la roccia del substrato, tanto meno sarà attenuato il fenomeno di propagazione. Inoltre, l'attenuazione della propagazione risulta essere maggiore per le vibrazioni ad alte frequenze rispetto alle vibrazioni a basse frequenze. Risulta quindi che la maggiore propagazione delle vibrazioni si ottiene in presenza di substrati rigidi con trasmissioni a basse frequenze.

La tabella proposta a seguire evidenzia e sintetizza esempi di valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali in relazione ai differenti substrati litologici che si possono incontrare.

Tabella 4: Velocità di propagazione delle onde longitudinali, fattore di perdita e massa volumica per le differenti tipologie di substrato litologico

Tipologia di substrato	Velocità di propagazione onda longitudinale [m/s]	Fattore di perdita [η]	Massa volumica [kg/m ³]
Roccioso	3500	0,01	2650
Sabbioso	600	0,1	1600
Argilloso	1500	0,5	1700

- Il valore dell'accelerazione determinato al punto 2 permette di calcolare il livello ponderato di accelerazione da confrontare con i criteri di valutazione del disturbo o del danno degli edifici in base alla loro destinazione d'uso.

2.5. Rischio del danno a strutture ed edifici

Esplosioni, utilizzo ed operazioni effettuate da macchine battipalo, demolizioni, perforazioni, scavi in prossimità di strutture particolarmente sensibili rappresentano le principali attività che solitamente si valutano quando si parla di rischio per strutture derivanti da vibrazioni. I livelli di impulso e di vibrazione di grande ampiezza devono essere valutati con riferimento ai loro potenziali effetti sui fabbricati e sulle strutture. La definizione di un limite di sicurezza per la velocità di vibrazione non è univoca: una rassegna completa dei valori di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni, proprio in termini di velocità di picco puntuale (PPV) è riportata nella normativa di riferimento UNI 9916. Il criterio adottato in questa sede pone i seguenti limiti:

- 5 mm/s per edifici residenziali (vibrazioni durature);
- 2.5 mm/s per edifici storici estremamente fragili (vibrazioni durature);

Tali valori rappresentano i limiti più cautelativi noti in letteratura

Essi sono generalmente più elevati di quelli derivanti dal non disturbo alle persone. Solo in presenza di un fattore di cresta molto elevato, maggiore di 18 dB, potrebbe infatti verificarsi il caso di superamento del limite di danno strutturale senza che si verifichi il superamento del limite di disturbo alle persone.

Si definisce pertanto "fattore di cresta" la differenza fra il valore massimo di picco di una forma d'onda e il suo valore efficace.

Per una forma d'onda sinusoidale, il fattore di cresta risulta essere pari a 3 dB, per un segnale con più componenti e con forma d'onda molto "aspra", il fattore di cresta può facilmente essere superiore ai 10 dB, ed in alcuni casi (eventi impulsivi quali martellate, esplosioni, etc.) può anche superare i 20 dB.

La circostanza in oggetto risulta però altamente improbabile tanto che è possibile assumere che il rispetto dei limiti di non-disturbo alle persone, fornisce sufficienti garanzie (e quindi necessariamente implica) di non avere effetti dannosi per le strutture edilizie.

2.6. Rischio Esposizione Umana – Rischio Disturbo

Nelle strutture classificate come recettori, ed in generale in tutti i corpi di fabbrica o edifici il disturbo può essere percepito sia come vibrazione meccanica degli elementi edilizi (groundborne vibration), sia come rumore irraggiato nei locali dagli orizzontamenti, dalle pareti e dagli infissi (groundborne noise). Tali disturbi, in virtù dei differenti meccanismi dissipativi citati, diminuiscono con la distanza dalla sorgente in modo rapido. Come anticipato, l'entità dell'effetto disturbante legato alla vibrazione dipende da molti altri fattori oltre la distanza dalla sorgente. Tali fattori sono legati alle attenuazioni o amplificazioni nella struttura degli edifici, dovuti principalmente alla tipologia dei sistemi di fondazione.

La UNI 9614, norma di riferimento relativamente alla soglia di percezione delle vibrazioni individua il valore di riferimento pari a: $a_{soglia,z} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ corrispondenti a 74 dB (per $a_0 = 10^{-6} \text{ m/sec}^2$) per l'asse z e $a_{soglia, x/y} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ corrispondenti a 71 dB (per $a_0 = 10^{-6} \text{ m/sec}^2$) per gli assi x e y.

Nella tabella a seguire viene sintetizzata ed evidenziata la soglia dei valori limite utili ad evitare il disturbo in relazione alle destinazioni d'uso delle aree/strutture oggetto di analisi.

Devono essere infine assegnata una classificazione di sensibilità dei recettori adiacenti alle sorgenti. Le classi di sensibilità devono essere definite sulla base della destinazione d'uso dell'immobile, in conformità con 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. Nella tabella a seguire sono evidenziate le classi di sensibilità:

Tabella 5: Valutazione del disturbo UNI 9614 - Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza

VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIONI COMPLESSIVE PONDERATE IN FREQUENZA VALIDI PER GLI ASSI x E y			VALORI E LIVELLI LIMITE DELLE ACCELERAZIONI COMPLESSIVE PONDERATE IN FREQUENZA VALIDI PER L'ASSE z		
Destinazione d'uso	Accelerazione		Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s ²	dB		m/s ²	dB
Aree critiche	3,6 10 ⁻³	71	Aree critiche	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni notte	5,0 10 ⁻³	74	Abitazioni notte	7,0 10 ⁻³	77
Abitazioni giorno	7,0 10 ⁻³	77	Abitazioni giorno	10,0 10 ⁻³	80
Uffici	14,4 10 ⁻³	83	Uffici	20,0 10 ⁻³	86
Fabbriche	28,8 10 ⁻³	89	Fabbriche	40,0 10 ⁻³	92

Le aree critiche corrispondono alle aree archeologiche di importanza storico-monumentale, infrastrutture sanitarie, fabbricati scolastici di qualsiasi genere. Rientrano in tali classi aree anche le attività industriali che impiegano macchinari di precisione.

Per Fabbriche e affini devono essere inoltre applicati i valori limite sanciti nel D.Lgs 81/2008 per l'esposizione dei lavoratori a vibrazioni meccaniche

3. STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI ESERCIZIO

Gli impianti fotovoltaici sono costituiti da singoli moduli fotovoltaici collegati elettricamente tra di loro secondo schemi serie/parallelo. In particolare, il layout di impianto viene realizzato collegando i moduli in modo da costituire stringhe, queste a loro volta sono collegate in modo da formare gruppi di stringhe. I gruppi di stringhe, colpiti dalla luce solare, producono energia elettrica in corrente continua, che prima di poter essere immessa in rete deve preventivamente essere convertita in corrente alternata ed elevata a opportuni valori di tensione. Tali operazioni si realizzano mediante l'uso inverter e trasformatori, che generalmente vengono alloggiati in cabine poste all'interno del layout del campo fotovoltaico. Nel nostro caso, la conversione della corrente continua in alternata viene effettuata da opportuni inverter detti di stringa, posti alla base delle strutture di sostegno dei moduli fotovoltaici; la fase di adattamento della tensione ai livelli necessari alla distribuzione è a carico di trasformatori posti all'interno di cabine di campo. Le cabine di campo sono a loro volta collegate a un'unica cabina di raccolta dalla quale poi si sviluppa una linea MT interrata per il trasferimento dell'energia alla rete elettrica pubblica.

Nel complesso, per tale tipologia di impianti, le apparecchiature elettriche utilizzate possibili fonte di rumore e vibrazioni sono dunque:

- Moduli fotovoltaici;
- Inverter;
- Trasformatori;

I moduli fotovoltaici sono apparecchiature statiche che non comportano né emissioni acustiche, né la trasmissione di vibrazioni al terreno per cui possono essere escluse dallo studio in esame.

Inverter e trasformatori sono generalmente i dispositivi responsabili di emissioni acustiche a causa dell'esigenza di raffreddamento dei componenti elettronici di cui sono costituiti mediante l'utilizzo di ventole di raffreddamento in numero e dimensioni variabili in funzione della tipologia e della potenza.

Tuttavia, per quanto riguarda le vibrazioni emesse da tali dispositivi, queste hanno intensità estremamente contenute, tali da risultare efficacemente smorzate dal terreno già a distanze di pochi metri (1-2 m). Per cui si ritiene che le vibrazioni prodotte dalle apparecchiature elettriche oggetto di studio risultino sostanzialmente non rilevabili/impercettibili a distanza di pochi metri.

Dunque si può concludere che l'apporto in termini di effetti o sensazioni di vibrazione nei confronti di specifici recettori e/o strutture e fabbricati di qualsiasi natura, durante la fase di esercizio si attesta su livelli di vibrazione con valori inferiori la soglia di percezione umana e pertanto il loro contributo può essere considerato trascurabile e/o nullo.

4. STIMA PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE

Per quanto concerne le fasi di cantiere per la costruzione delle opere elettriche descritte, non è in generale previsto l'impiego di esplosivi durante i lavori di demolizione o scavo, e pertanto risulta assolutamente improbabile che vi possano essere danni alle strutture ed edifici nel corso delle escavazioni, anche per quei recettori posti a distanze relativamente più vicine.

Nell'applicazione del modello previsionale al fine di valutare il potenziale possibile disturbo, sono stati ipotizzati i seguenti parametri come di seguito esplicitati:

1. In funzione della tipologia di substrato litologico si assumono i seguenti valori:
 - $\eta = 0.1$ (fattore di perdita del substrato nell'ipotesi peggiore possibile nell'ottica della valutazione a maggior carattere cautelativo nei confronti dei recettori);
 - c (velocità di propagazione dell'onda di Rayleigh VR) = 119.6 m/s (valore coerente con i dati di letteratura per macro categorie di sottosuolo come evidenziato nella tabella a seguire)

Tabella 6: Valori tipici di velocità di propagazione delle onde per differenti tipologie di sottosuolo

Sottosuolo di tipo A	roccia o altra formazione geologica caratterizzata da una velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s pari almeno a 800 m/s, includendo al massimo uno strato superficiale di materiale a più debole consistenza di 5 m.
Sottosuolo di tipo B	depositi profondi di sabbie mediamente addensate, ghiaia e argille mediamente rigide con spessori che vanno dalle diverse decine di metri alle molte centinaia, caratterizzati da valori minimi della V_s che vanno da 200 m/s ad una profondità di 10 m, fino a 350 m/s a 50 m.
Sottosuolo di tipo C	depositi privi di coesione con o senza qualche morbido strato coesivo, caratterizzati da valori di V_s sotto ai 200 m/s nei primi 20 m e depositi di terreni coesivi caratterizzati da rigidità basse/medie e con valori di V_s sotto ai 200 m/s nei primi 20 m.

Classi di suolo ($V_r=0.92 V_s$)

2. Livelli di riferimento per il mezzo meccanico impiegato in cantiere:
L'immagine a seguire riporta lo spettro emissivo ed il calcolo del livello di accelerazione ponderata in frequenza a diverse distanze dalla sorgente emissiva ipotizzata (escavatore cingolato con spettro misurato a 10 m di distanza) per il tipo di substrato ipotizzato (in ottica altamente cautelativa per i recettori) per un'area di intervento "tipo".
3. Livelli di riferimento – valore soglia limite di disturbo:
Il valore soglia di livello ponderato di accelerazione è stato considerato essere pari a 77 VdB .
Ciò in virtù del fatto che le attività di cantiere (e quindi anche di escavazione) sono concentrate esclusivamente nel periodo di riferimento diurno e che pertanto il potenziale disturbo non può essere associato al periodo di riferimento notturno e quindi non può incidere nelle ore dedicate

al riposo e al sonno.

4. Attenuazioni o Amplificazioni nella struttura degli edifici:

Potenziali fenomeni di attenuazione o amplificazione relativi alle tipologie di fondazioni cui sono dotati i recettori non sono stati tenuti in conto.

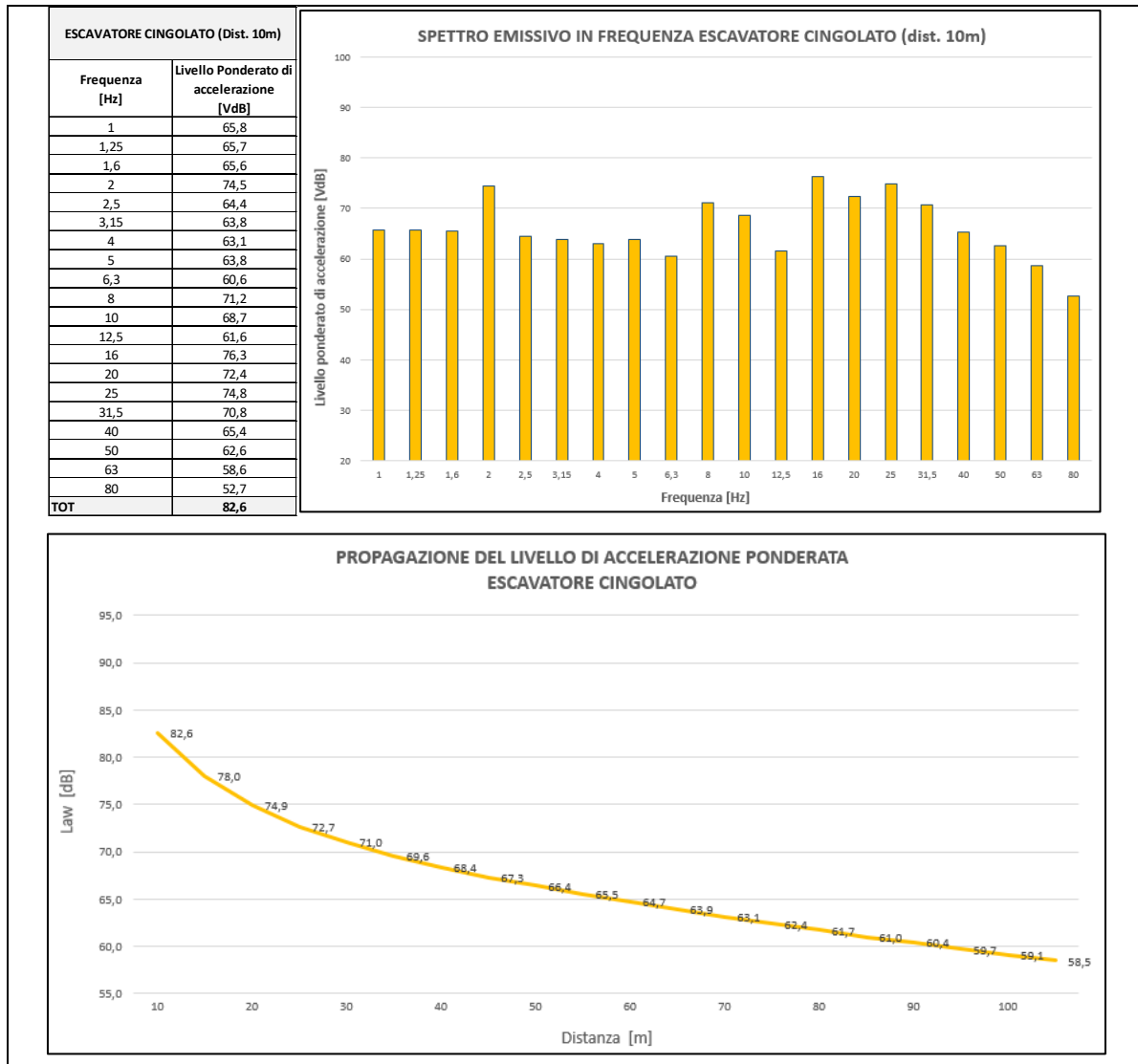




Figura 7: Spettro emissivo in frequenza e andamento grafico della propagazione in funzione della distanza del livello di accelerazione ponderata delle sollecitazioni prodotte da un escavatore cingolato in fase di cantiere.

L'immagine appena proposta evidenzia che già a distanze leggermente superiori i 15 metri dalla sorgente considerata ($d < 20$ m), i valori di accelerazione ponderata in frequenza totale (ottenuta sommando i contributi per tutte le bande di terzo di ottava) scendono al di sotto della soglia di disturbo (fissata a 77 VdB) pur considerando le caratteristiche più cautelative possibili per quanto concerne il

	<p>ID Documento Committente</p> <p>H004_FV_BGR_00125</p>	Pagina 24 / 26
		Numero Revisione
		00


substrato litologico e la relativa propagazione delle sollecitazioni nel mezzo. Le stesse considerazioni sono valide anche per le attività relative alla messa in opera del cavidotto esterno di collegamento alla stazione elettrica di trasformazione, per le quali, sebbene i recettori si trovino a distanze piuttosto ravvicinate al tracciato stradale, si ha che le lavorazioni in estrema prossimità degli edifici sono limitate a periodi di tempo molto ristretti, della durata massima di alcune ore, in quanto le lavorazioni sono realizzate avanzando lungo il percorso del cavidotto.

	ID Documento Committente H004_FV_BGR_00125	Pagina 25 / 26
		Numero Revisione
		00

5. CONCLUSIONI

Per un impianto fotovoltaico in fase di esercizio si può concludere che, per quanto attiene l'emissione di vibrazioni da parte delle apparecchiature elettriche, l'apporto in termini di effetti o sensazioni di vibrazione nei confronti di specifici recettori e/o strutture e fabbricati di qualsiasi tipologia, durante l'attività produttiva si attesta su livelli inferiori la soglia di percezione umana e pertanto il loro contributo può essere considerato trascurabile e/o nullo.

Allo stesso modo il dato previsionale ottenuto per la fase di cantiere conferma che l'impatto causato dalle vibrazioni durante la realizzazione dell'impianto fotovoltaico in oggetto sia assolutamente trascurabile e che nessun recettore riceve un fenomeno vibrazionale tale da ingenerare disturbo. Le stesse conclusioni valgono per la fase di realizzazione del cavidotto esterno per la quale solo lievi disturbi possono verificarsi per i recettori posti più in prossimità del tracciato stradale, essendo le lavorazioni in prossimità degli edifici ma concentrate in periodi di tempo estremamente ridotti.

	ID Documento Committente H004_FV_BGR_00125	Pagina 26 / 26
		Numero Revisione
		00

Bibliografia

- ISO 2631 - Guida per la valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni su tutto il corpo.
- [UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo", 1990.
- UNI 9916:2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", 2014.
- Anderson, J.S.; Solving problems in vibrations; London, Longman Scientific & Technical, 1987
- Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 2000
- Di Colin H. Hansen, Con J. Doolan, Kristy L. Hansen; Wind Farm Noise: Measurement, Assessment, and Control.
- Styles P, England R, Stimpson I, Toon S, Bowers D and Hayes M 2005a A detailed study of the propagation and modelling of the effects of low frequency seismic vibration and infrasound from wind turbines. First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control, Berlin, Germany
- Richart Jr. FE, Hall Jr. JR, Woods RD. Vibrations of soils and foundations. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1970