



PROGETTO DEFINITIVO

Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica "Gualdo Tadino" con potenza di immissione in rete pari a 62 MW e relative opere connesse da realizzarsi nei comuni di Gualdo Tadino e Nocera Umbra (PG)

Titolo elaborato

Studio sugli effetti dello Shadow flickering

Codice elaborato

F0589AR05A

Scala

-

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Progettazione



F4 ingegneria srl

Via Di Giura - Centro direzionale, 85100 Potenza
Tel: +39 0971 1944797 - Fax: +39 0971 55452
www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore Tecnico
(ing. Giovanni Di Santo)



Gruppo di lavoro

Dott. For. Luigi ZUCCARO
Ing. Giuseppe MANZI
Ing. Alessandro Carmine DE PAOLA
Ing. Stefania CONTE
Ing. Mariagrazia PIETRAFESA
Ing. Federica COLANGELO
Arch. Gaia TELESCA



Società certificata secondo le norme UNI-EN ISO 9001:2015 e UNI-EN ISO 14001:2015 per l'erogazione di servizi di ingegneria nei settori: civile, idraulica, acustica, energia, ambiente (settore IAF: 34).

Committente



RENEXIA S.p.a.

Viale Abruzzo 410, 66010 Chieti

Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
Ottobre 2023	Prima emissione	FTR	GMA	GDS

File sorgente: F0589AR05A -Studio sugli effetti dello Shadow flickering.docx

Sommario

1	Premessa	3
2	Informazioni essenziali	4
3	Il fenomeno dello shadow flickering	5
4	Individuazione dei ricettori	8
5	Modello di calcolo	10
6	Risultati	12
7	Analisi dei risultati	15
7.1	Ricettore R01	16
7.2	Ricettore R02	17
7.3	Ricettore R07	18
7.4	Ricettore R08	19
7.5	Ricettore R10	20
7.6	Ricettore R12	21
7.7	Ricettore R13	22
7.8	Ricettore R16	23
7.9	Ricettore R17	24
7.1	Ricettore R22	25
7.2	Ricettore R25	26

1 Premessa

La presente relazione riporta i criteri di valutazione ed i risultati relativi allo studio del fenomeno dello shadow flickering, per la realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato "Gualdo Tadino", da realizzarsi nel territorio comunale di Gualdo Tadino nella provincia di Perugia, presentato dalla **società Renexia s.p.a.** con sede in viale Abruzzo 410, 66010 Chieti, in qualità di proponente.

Il progetto in esame prevede l'installazione di 10 aerogeneratori di potenza unitaria massima pari a 6,2 MW, per una potenza complessiva massima di 62 MW.

Il tipo di aerogeneratore previsto per l'impianto in oggetto è un aerogeneratore ad asse orizzontale con rotore tripala, le cui caratteristiche principali sono di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro max pari a 170 m, posto sopravvento alla torre di sostegno, costituito da 3 pale generalmente in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro e da mozzo rigido in acciaio;
- navicella in carpenteria metallica con carenatura in vetroresina e lamiera, in cui sono collocati il generatore elettrico, il moltiplicatore di giri, il convertitore elettronico di potenza, il trasformatore BT/AT e le apparecchiature idrauliche ed elettriche di comando e controllo;
- torre di sostegno tubolare troncoconica in acciaio, avente altezza fino all'asse del rotore pari a max 115 m;
- altezza complessiva massima fuori terra dell'aerogeneratore circa pari a 200 m;
- area spazzata: $\approx 22698 \text{ m}^2$.

In generale, i principali componenti dell'impianto risultano essere, quindi:

- i generatori eolici;
- le linee elettriche AT (a 36 kV) in cavo interrato, che collegano gli aerogeneratori tra loro e, successivamente, con la RTN;

Caratteristiche della fonte utilizzata

Nell'ambito del processo di progettazione di un impianto eolico e più in generale nelle fasi dello sviluppo del sito è necessario conoscere con una buona affidabilità la consistenza della risorsa eolica disponibile e quindi della sua produzione attesa. Ciò è garantito da idonee rilevazioni in sito delle grandezze di velocità e di direzione del vento per un periodo di alcuni anni.

Il parco eolico è costituito da 7 aerogeneratori di potenza unitaria pari a 6.6 MW, in accordo con la potenza di immissione da STMG. L'impianto è collegato in antenna 36kV, mediante elettrodotto interrato su un ampliamento della Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione della RTN 132/36 Kv, come da soluzione tecnica minima generale STMG, codice pratica del preventivo di connessione 202200206.

Le valutazioni di producibilità sono state effettuate considerando il modello Siemens Gamesa AG 170 Hh115m, hTot 200m o altro modello simile. Si può affermare che i risultati delle misurazioni della ventosità, pur considerando le tipiche incertezze di misura proprie delle apparecchiature utilizzate, che sono state opportunamente e cautelativamente stimate, indicano che l'entità della risorsa disponibile rientra tra quelle di interesse per la realizzazione di un impianto eolico.

2 Informazioni essenziali

Potenza nominale aerogeneratore	6.2 MW
Diametro rotore	170 m
Altezza hub	115 m
Altezza totale	200 m
Area spazzata	22698 m ²
Direzione rotazione	Senso orario
Numero di pale	3

Il soggetto proponente dell'iniziativa è il gruppo Renexia, società che opera nel settore della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Nata nel 2011, come naturale evoluzione della divisione "Energie Rinnovabili" della Toto S.p.A., Renexia è una Società per Azioni che si occupa dello sviluppo, della progettazione, della costruzione e della gestione di impianti per lo sfruttamento delle energie rinnovabili.

Un'organizzazione efficiente e flessibile, che modulata in due unità per aree di competenza, le consente di operare nel campo degli impianti ad energia rinnovabili quali fotovoltaico ed eolico. La lunga esperienza maturata dalle altre società del gruppo le permette un approccio da EPC Contractor, garantendole un controllo complessivo del ciclo di vita degli impianti, dalla progettazione alla gestione e manutenzione.

La società è focalizzata nello sviluppo di nuove iniziative nel campo della green economy e, attraverso la sua controllata Renexia Services, nella costruzione, di impianti di grandi dimensioni, facendo del business delle rinnovabili una attività di punta del Gruppo.

La strategia di diversificazione geografica consente di cogliere le migliori opportunità a livello globale, e con la gestione diretta degli asset persegue l'obiettivo strategico di creare valore per il Gruppo e per i suoi azionisti.

Infine, negli anni, la stessa Renexia Services ha maturato significative esperienze nella realizzazione di Opere di Rete, rendendo definitivamente il Gruppo Renexia un operatore integrato in grado di coprire tutte le fasi relative ad un progetto per la produzione di energia pulita.

3 Il fenomeno dello shadow flickering

Gli aerogeneratori, al pari di tutte le altre strutture fortemente sviluppate in altezza, proiettano un'ombra sulle aree circostanti in presenza di irraggiamento solare diretto.

Lo shadow flickering (letteralmente ombreggiamento intermittente) è l'espressione comunemente impiegata per descrivere una fluttuazione periodica dell'intensità luminosa osservata. Tale effetto (stroboscopico) è causato dalla proiezione, su una generica superficie, dell'ombra indotta da oggetti in movimento. Nel caso specifico di un impianto eolico il fenomeno è generato dalla proiezione, al suolo o su un ricettore (abitazione), dell'ombra prodotta dalle pale degli aerogeneratori in rotazione allorché il sole si trova alle loro spalle (cfr. figura successiva).

Il fenomeno, dal punto di vista di un potenziale ricettore, si traduce in una variazione alternata e ciclica di intensità luminosa che, a lungo andare, può provocare fastidio agli occupanti delle abitazioni le cui finestre risultano esposte al fenomeno stesso. Il fenomeno, ovviamente, risulta assente sia quando il sole è oscurato da nuvole o dalla nebbia, sia quando, in assenza di vento, le pale dell'aerogeneratore non sono in rotazione.

In particolare, le frequenze che possono provocare un senso di fastidio sono comprese tra i 2,5 ed i 20 Hz (Verkuijlen and Westra, 1984), e, l'effetto sugli individui è simile a quello che si sperimenterebbe in seguito alle variazioni di intensità luminosa di una lampada ad incandescenza a causa di continui sbalzi della tensione della rete di alimentazione elettrica.

I più recenti aerogeneratori tripala operano ad una velocità di rotazione di molto inferiore ai 35 giri al minuto, corrispondente ad una frequenza di passaggio delle pale sulla verticale inferiore a 1,75 Hz, minore, quindi, della frequenza critica di 2,5 Hz riportata in letteratura. Inoltre, i generatori di grande potenza (dal MW in su) raramente superano la velocità di rotazione di 15 giri al minuto, corrispondente a frequenze di passaggio delle pale ampiamente minori di quelle ritenute fastidiose per la maggioranza degli individui.

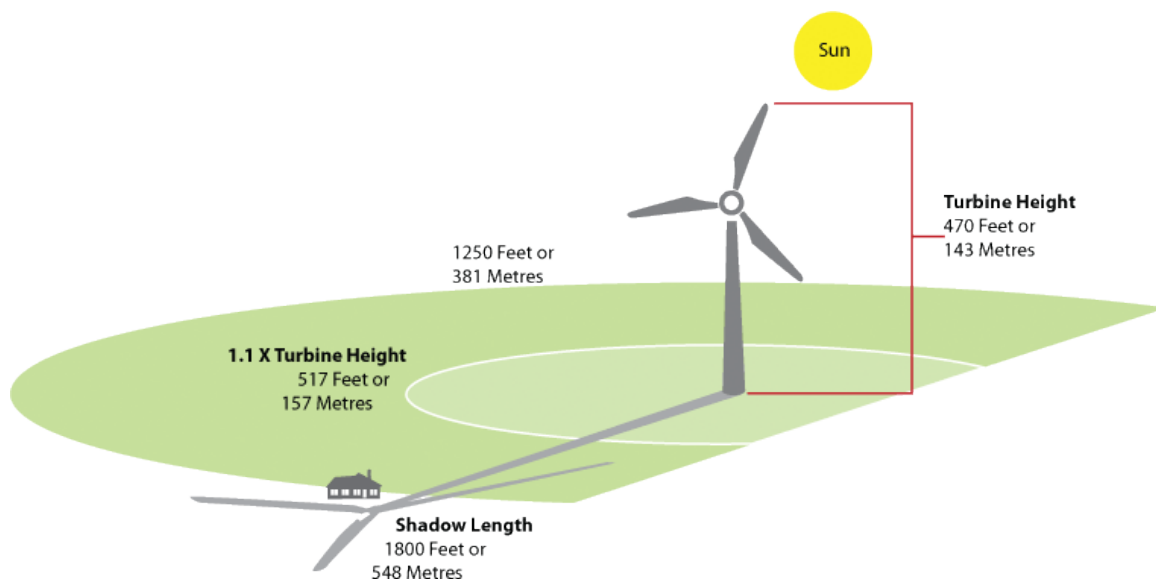


Figura 1: Rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flickering

Tale fenomeno, se sperimentato da un ricettore per periodi di tempo prolungati, può generare un disturbo, nelle seguenti condizioni:

- presenza di un livello sufficiente di intensità luminosa, ovvero in condizioni di cielo sereno sgombro da nubi ed in assenza di nebbia e con sole alto rispetto all'orizzonte;
- assenza di ostacoli sulla congiungente ricevitore - aerogeneratore: la presenza di vegetazione e/o edifici interposti all'ombra generata da questi ultimi annullerebbe il fenomeno. Quindi, condizione favorevole affinché il fenomeno in esame si verifichi, è quella rappresentata dall'orientamento perpendicolare delle finestre di un'abitazione rispetto alla linea congiungente il ricevitore all'aerogeneratore in assenza di ostacoli fisici (alberi, altri edifici ecc...);
- orientamento perpendicolare del rotore rispetto alla congiungente sole - ricevitore: infatti, quando il piano del rotore è perpendicolare alla linea sole-ricevitore, l'ombra proiettata dalle pale risulta muoversi all'interno di un "disco" che induce un effetto non trascurabile di shadow flickering; viceversa, nel caso in cui il piano del rotore risulti essere in linea con il sole, l'ombra proiettata risulterebbe molto assottigliata e di bassa intensità per cui l'effetto di shadow flickering sarebbe del tutto trascurabile.

Inoltre, affinché lo shadow flickering, abbia un'intensità non trascurabile è necessario che:

- le pale del rotore siano ovviamente in rotazione;
- l'aerogeneratore ed il potenziale ricevitore non siano troppo distanti: infatti, le ombre proiettate in prossimità dell'aerogeneratore risultano di maggiore intensità rispetto a quelle proiettate ad una distanza crescente. Tale condizione deriva dal fatto che in presenza di un ricevitore molto prossimo all'aerogeneratore, una porzione ampia di pala copre il disco solare così come osservato dal punto di vista del ricevitore stesso, e, quindi, l'intensità del flicker risulta maggiormente percepibile. All'aumentare della distanza tra aerogeneratore e ricevitore, le pale, durante il loro moto di rotazione, andranno a coprire una porzione sempre più piccola del disco solare, inducendo un effetto di flicker di minore intensità.

Alla luce di quanto sopra esposto, le relazioni spaziali tra un aerogeneratore ed un ricevitore (abitazione), così come la direzione del vento risultano essere fattori chiave per la durata del fenomeno di shadow flicker. Per distanze dell'ordine dei 400-500 m, il fenomeno in esame potrebbe verificarsi all'alba oppure al tramonto, ovvero in quelle ore in cui le ombre risultano molto lunghe e la radiazione diretta è di minore intensità per effetto della piccola elevazione solare. Al di là di una certa distanza l'ombra smette di essere un problema perché il rapporto tra lo spessore della pala ed il diametro apparente del sole diventa molto piccolo. Quindi, come è facile immaginare, la condizione più penalizzante corrisponde al caso in cui il piano del rotore risulti ortogonale alla congiungente ricevitore – sole; infatti, in tali condizioni, l'ombra proiettata darà origine ad un cerchio di diametro pari a quello del rotore del generatore eolico.

Sebbene il fenomeno possa essere percepito anche all'esterno, esso risulta evidente e fastidioso in quegli ambienti con finestrate rivolte verso le ombre. In generale, l'area soggetta a shadow flicker non si estende oltre i 500÷1000 m dall'aerogeneratore e le zone a maggiore impatto ricadono entro i 500 m di distanza dalle macchine con durata del fenomeno dell'ordine delle 200 ore all'anno; il flickering, se presente, non supera in genere i 30/40 minuti di durata potenziale nell'arco di una giornata.

L'intensità del fenomeno è definita come la differenza di luminosità che si percepisce in presenza ed in assenza di flickering in una data posizione. In definitiva, si può affermare che:

- avendo le pale una forma rastremata con lo spessore che cresce verso il mozzo; il fenomeno risulterà tanto più intenso quanto maggiore sarà la porzione di disco solare coperta dalla pala stessa e quanto minore la distanza dal ricevitore;

- l'intensità del flickering sarà minima quando l'ombra prodotta è generata all'estremità delle pale;
- maggiori distanze tra generatore e ricevitore determinano ombre meno nette; in tal caso l'effetto flickering risulterà meno intenso e distinto.

La presente relazione ha lo scopo di stimare le aree potenzialmente interessate dal fenomeno in relazione agli aerogeneratori che costituiscono il parco eolico in oggetto.

Nello specifico, quando si valuta l'impatto da shadow flickering, lo stesso può essere realizzato attraverso l'analisi di due casi specifici:

- il **worst case**, in cui viene valutata la massima durata del fenomeno, ovvero quella astronomica, che corrisponde alle condizioni di cielo sempre sgombro da nubi, di rotore in movimento continuo e di perpendicolarità tra quest'ultimo ed il potenziale ricevitore;
- il **real case**, in cui viene valutata la durata realistica del fenomeno, tenendo conto del soleggiamento effettivo dell'area e delle specifiche condizioni anemologiche che determinano la reale operabilità degli aerogeneratori.

In Italia, dove questo fenomeno è meno importante rispetto alle latitudini più settentrionali (come ad esempio Danimarca, Germania, Olanda e Svezia), non esiste alcuna normativa regolamentare che regoli questo aspetto a livello nazionale.

La maggior parte dei paesi che hanno adottato specifiche linee guida o regolamenti in materia si sono basati sulle norme di riferimento tedesche e sui limiti di accettabilità da esse introdotti. In assenza di una specifica normativa o linea guida, nazioni quali Austria, Brasile, Canada, India, Giappone e Polonia, impiegano, come buona pratica, le indicazioni contenute nelle linee guida tedesche.

Nello specifico, tali linee guida sono state introdotte nel 2002 dal comitato statale per il controllo dell'inquinamento e, da allora, sono state adottate dalla maggior parte dei Länder e sono comunemente considerate buone pratiche nella valutazione dell'impatto prodotto da un parco eolico. In particolare, tali linee guida, stabiliscono che lo shadow flickering deve essere valutato:

- fino ad una distanza tale che il rotore copra il 20% del disco solare; a distanze superiori il fenomeno è considerato troppo diffuso da poter produrre fastidio;
- per angoli del sole sull'orizzonte superiori a 3 gradi; per angoli inferiori il fenomeno si ritiene schermato dalla presenza di edifici e/o vegetazione;
- ad un'altezza di 2 metri dal suolo;

I valori limite di accettabilità stabiliti dalle suddette linee guida sono un massimo di:

- 30 minuti al giorno;
- 30 ore all'anno.

4 Individuazione dei ricettori

Allo scopo di valutare l'impatto indotto sugli edifici da parte dell'impianto eolico in progetto, sono stati presi in considerazione gli stessi ricettori analizzati all'interno dell'elaborato 'F0589AR03A - Studio previsionale di impatto acustico'.

Sebbene il fenomeno possa essere percepito anche all'esterno degli edifici, esso risulta evidente e potenzialmente fastidioso in quegli ambienti con finestre localizzate lungo la direttrice sole-aerogeneratore e, per tale ragione, si è considerato nella simulazione la presenza di finestre di altezza pari a 1,0 metri e larghezza pari ad 1 metro, il cui centro è posizionato ad una quota dal suolo di 1,5 metri e disposte su tutte le facciate degli edifici considerati, in direzione dei quattro punti cardinali (N-E-S-W).

Di seguito sono riportati i riferimenti geografici dei potenziali ricettori individuati.

Tabella 1: Riepilogo dei ricettori

Ricettore	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		Comune	Descrizione
	Est	Nord		
R01	315882	4781379	Nocera Umbra	Edificio residenziale (disabitato)
R02	317112	4781398	Nocera Umbra	Struttura ricettiva
R05	316618	4780865	Nocera Umbra	Edificio residenziale
R06	316828	4781682	Nocera Umbra	Edificio residenziale
R07	317790	4783700	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R08	317970	4783462	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R09	317484	4783212	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R10	316780	4783853	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R11	316493	4783930	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R12	316252	4783467	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R13	317150	4784315	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R14	317237	4784132	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R15	317493	4783953	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R16	318349	4784898	Gualdo Tadino	Struttura ricettiva
R17	318557	4784515	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R18	318037	4785073	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R19	317573	4785308	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R20	317744	4785761	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R22	317284	4786127	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R23	317151	4786224	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R25	317146	4787799	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R26	317863	4781835	Gualdo Tadino	Edificio residenziale
R27	317794	4780950	Nocera Umbra	Edificio residenziale
R28	317615	4787548	Gualdo Tadino	Edificio residenziale

Di seguito si riportano le coordinate degli aerogeneratori di progetto e le specifiche tecniche.

Tabella 2: Riepilogo degli aerogeneratori

WTG	Coordinate UTM-WGS84 fuso 33		Coordinate Gauss Boaga fuso ovest	
	E	N	x	y
WTG01	316147	4781263	2336152	4781276
WTG02	317546	4781483	2337551	4781496
WTG03	317583	4783527	2337588	4783540
WTG04	316589	4783559	2336594	4783572
WTG05	317512	4784320	2337517	4784332
WTG06	318294	4784604	2338298	4784617
WTG07	318073	4785412	2338078	4785425
WTG08	317618	4786049	2337623	4786062
WTG09	317333	4786685	2337338	4786698
WTG10	317062	4787511	2337067	4787524

5 Modello di calcolo

L'analisi dell'impatto da shadow flickering prodotto da un parco eolico è realizzata, generalmente, attraverso l'impiego di specifici applicativi che modellano il fenomeno in esame. I pacchetti software impiegati comunemente per la progettazione di impianti eolici contengono moduli specifici per il calcolo e l'analisi del fenomeno di flickering.

L'analisi si basa necessariamente sull'impiego di un modello digitale del terreno dell'area oggetto di progettazione, sulle posizioni (E, N, quota) degli aerogeneratori e dei potenziali ricettori sensibili, nonché sui dati che correlano la posizione del sole nell'arco dell'anno con le condizioni operative delle turbine nello stesso arco di tempo.

Al fine di calcolare la posizione relativa del sole nell'arco di un anno rispetto al parco eolico ed ai ricettori è necessario definire la longitudine, la latitudine ed il fuso orario dell'area interessata dal progetto (coordinate baricentriche del dominio di calcolo).

Nello specifico, nel presente studio, è stato impiegato il modulo shadow flickering del software WindFarm 5.0.1.2 (ReSoft Limited©). Esso consente di analizzare la posizione del sole nell'arco di un anno allo scopo di identificare i tempi in cui ogni aerogeneratore può proiettare ombre sulle finestre delle abitazioni vicine. In particolare, il modello permette di:

- calcolare il potenziale per le ombre intermittenti alle finestre delle abitazioni;
- mostrare un calendario grafico degli eventi di flickering;
- mostrare un elenco dettagliato di ciascun evento di ombreggiamento (ora di inizio, di fine, durata del fenomeno, aerogeneratore/i coinvolti ecc...);
- creare mappe di impatto potenziale che mostrano le ore d'ombra intermittente per l'intero parco eolico o per le singole macchine (curve di isodurata) nell'arco dell'anno.

Al di là di una certa distanza, come già osservato, l'ombra smette di essere un problema perché il rapporto tra lo spessore della pala e il diametro apparente del disco solare diventa piccolo. Poiché non vi è un valore generalmente accettato per questa distanza massima, WindFarm permette di specificare il limite in metri o multipli del diametro o dell'altezza complessiva del generatore eolico.

Nel caso in esame, per quanto concerne le simulazioni effettuate, si è assunta una distanza massima di influenza del fenomeno in esame pari a 10 volte il diametro dell'aerogeneratore di progetto (1700 m) ed un angolo minimo di altezza del sole sull'orizzonte pari a 3°.

Tali assunzioni di input al modello risultano molto conservative in relazione a quanto espresso sopra in termini teorici in riferimento al fenomeno di shadow flickering.

In particolare, il modello numerico utilizzato, al pari degli altri presenti sul mercato, produce in output una mappa di impatto nel caso più penalizzante, il così detto "WORST CASE", corrispondente alle ore in cui il sole permane al di sopra dell'orizzonte nell'arco dell'anno (ore di luce, ca. 4380 h/a), indipendentemente dalla presenza o meno di nubi, le quali inficerebbero il fenomeno stesso dello shadow flickering per l'impossibilità che si generino ombre.

Nello specifico, il worst case è caratterizzato dalle seguenti ipotesi:

- assenza di qualsiasi ostacolo naturale o artificiale (alberature, muri di cinta, edifici, ecc...), ad eccezione dell'orografia dell'area, frapposto tra i ricettori e gli aerogeneratori, tale da limitare o eliminare completamente il fenomeno dello shadow flickering;
- aerogeneratori sempre operativi;
- presenza di sole durante tutto il periodo diurno dell'anno (assenza di nubi);
- perpendicolarità tra il piano del rotore e la congiungente sole-ricettore (worst case wind direction), ovvero l'aerogeneratore insegue il sole;

Ciò considerato si evince che i risultati ai quali si perverrà risultano estremamente cautelativi, trattandosi di una stima puramente teorica.

Quindi, allo scopo di pervenire a valori più realistici di impatto, prossimi al caso reale (**REAL CASE**), si dovrebbe considerare il valore di eliofania locale, ovvero il numero di ore di cielo libero da nubi durante il giorno, e quello delle ore stimate di funzionamento dell'impianto eolico nell'arco dell'anno. Per l'area in esame il valore medio di eliofania corrisponde a circa $2400 \text{ h/a}^{1,2}$, quindi, i risultati del calcolo possono, ragionevolmente, essere abbattuti del 45.21%, pari al complemento a 1 del rapporto $2400/4380 = 54.79\%$.

In altri termini, rispetto al **WORST CASE**, la probabilità di occorrenza del fenomeno di shadow flickering si riduce realisticamente, per l'area in esame, al 45.21% del valore calcolato dal modello impiegato e che corrisponde proprio alla probabilità che il disco solare risulti libero da nubi.

Inoltre, dal momento che il fenomeno in esame è prodotto dalla contemporanea presenza di sole libero da nubi (potenzialità di generare ombre) e di velocità del vento superiori a quella di cut-in (rotore in moto), i valori calcolati dal modello (considerando la condizione più penalizzante di rotore permanentemente in moto) possono essere ulteriormente abbattuti di una percentuale corrispondente alle ore annue di effettivo funzionamento macchina rispetto al totale delle ore in un anno (8760 h).

Per il parco eolico in esame le ore macchina sono state stimate pari al 70.33³%, delle ore anno, ovvero 6161 ore; in altri termini, la probabilità che il rotore di un aerogeneratore risulti in rotazione è appunto dell'ordine del 70.33% (pari appunto al rapporto $6161/8760$).

In definitiva, i valori calcolati dal modello numerico (ore di ombreggiamento intermittente all'anno presso i diversi ricettori individuati) possono, realisticamente, essere ridotti di un fattore pari al complemento a 1 del prodotto $54.79\% \times 70.33\% = 38.54\%$, ovvero 61.46%, corrispondente alla probabilità composta di avere contemporaneamente l'occorrenza di rotore in rotazione (vento) e sole libero da nubi (ombre), fenomeni, questi ultimi, stocasticamente indipendenti per cui la probabilità composta risulta pari al prodotto delle singole probabilità.

¹ Pinna M. (1985). L'eliofania in Italia. Mem. Soc. Geogr. It., 39: pag. 23-58.

² Lavagnini A., Martorelli S., Coretti C. (1987). Radiazione solare in Italia. Mappe mensili della radiazione globale giornaliera. Roma, CNR, Ist. Fis. Atm.

³ Considerando il report anemologico disponibile ed il fatto che la wtg prevista in progetto è caratterizzata da una velocità di cut-in dell'ordine di 3 m/s, le ore macchina dovrebbero essere dell'ordine del 72.50% di quelle annuali. Tenendo conto dei valori di disponibilità dell'impianto e della rete rispettivamente pari a 98% e 99%, l'assunzione del 70.33% sembra molto ragionevole.

6 Risultati

Al fine di verificare la presenza e l'intensità del fenomeno dello shadow flickering indotto dal parco eolico in progetto sono state effettuate una serie di simulazioni con software dedicato che hanno tenuto conto:

- della latitudine locale, allo scopo di considerare il corretto diagramma solare;
- della geometria effettiva delle macchine previste, ed in particolare dell'altezza complessiva di macchina, intesa come somma tra l'altezza del mozzo ed il raggio del rotore;
- dell'orientamento del rotore rispetto al ricettore;
- della posizione del sole e quindi della proiezione dell'ombra rispetto ai recettori;
- dell'orografia locale, tramite un modello digitale del terreno (DTM) dell'area di installazione del parco;
- della posizione dei possibili ricettori (abitazioni), nonché degli aerogeneratori (layout di progetto).

Come sopra accennato, le simulazioni effettuate sono state condotte in condizioni conservative, assumendo il cielo completamente sgombro da nubi, foschia, ecc. e nessun ostacolo interposto tra i ricettori individuati e gli aerogeneratori previsti in progetto.

Il programma effettua il calcolo delle ore del giorno in cui si potrebbe avere l'effetto del flickering sul ricettore considerato, facendo la somma dei minuti in cui il fenomeno risulta presente. Effettua poi la somma teorica dei minuti di ciascun mese (worst case) che poi può essere ridotta in considerazione delle giornate soleggiate, dell'operatività effettiva dell'impianto eolico, della direzione del vento ecc... Inoltre, avendo calcolato geometricamente l'evoluzione delle ombre durante la giornata, è possibile identificare l'area in cui avviene il fenomeno dello shadow flickering per ciascun aerogeneratore. Si ottengono così i dati sinteticamente riportati nella seguente tabella.

La frequenza dello shadow flickering è correlata alla velocità di rotazione del rotore; le frequenze tipiche per le macchine considerate nel presente progetto sono dell'ordine di 0,55-0,75 Hz (corrispondenti a 11 - 15 rpm, circa un passaggio ogni 1,8-1,3 secondi). In termini di impatto sulla popolazione, tali frequenze sono innocue; basti pensare che le lampade stroboscopiche, largamente impiegate nelle discoteche, producono frequenze comprese tra 5 e 10 Hz.

La tabella seguente riassume i risultati dell'analisi eseguita secondo la metodologia di calcolo descritta nelle sezioni precedenti. Nello specifico, la tabella seguente riporta il numero di giorni e di ore in cui è fisicamente possibile che il fenomeno si presenti (caso peggiore) e il valore realistico atteso di ore nell'arco dell'anno in cui il fenomeno potrebbe presentarsi. A tal proposito è importante sottolineare che anche il caso realistico, valutato tenendo conto dell'eliofania locale nonché delle ore di funzionamento dell'impianto (rotore in rotazione), rappresenta comunque un valore cautelativo in quanto nella stima non si è tenuto conto degli effetti mitigativi dovuti al fatto che il piano di rotazione delle pale non sempre risulta ortogonale alla direttrice sole-ricettore e all'eventuale presenza di ostacoli e/o vegetazione interposti tra il sole ed il singolo ricettore analizzato. In aggiunta, sempre per un'ipotesi a vantaggio di sicurezza, non si è tenuto conto della stagionalità del fenomeno.

Infatti, se si considera il grafico della frequenza relativa alla direzione di provenienza del vento (figura successiva) per la torre anemometrica del parco eolico in oggetto si evince che i risultati possono essere ridotti di almeno un ulteriore 49.32%, dal momento che il vento spirava in direzione E-W per un totale della frequenza pari a 50.68%. Alla luce di ciò, le ore del fenomeno subiscono un ulteriore abbattimento, che le porta ad essere circa il 19.53% di quelle calcolate dal modello nell'ipotesi WORST CASE.

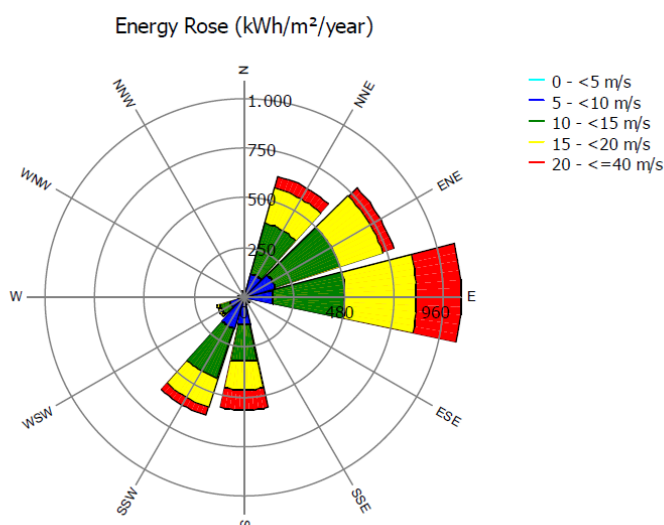


Figura 2: Rosa dei venti

Tabella 3: Tabella riepilogativa

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R01	178	294,19	57,5	99,2	Edificio residenziale (disabitato)
R02	200	161,5	31,5	9,5	Struttura ricettiva
R05	45	14,55	2,8	3,8	Edificio residenziale
R06	112	69,88	13,6	7,3	Edificio residenziale
R07	219	341,78	66,8	18,3	Edificio residenziale
R08	175	219,51	42,9	14,7	Edificio residenziale
R09	84	11,37	2,2	1,6	Edificio residenziale
R10	150	161,34	31,5	12,6	Edificio residenziale
R11	73	37,66	7,4	6,0	Edificio residenziale
R12	158	179,9	35,1	13,3	Edificio residenziale
R13	199	196,08	38,3	11,5	Edificio residenziale
R14	104	47,68	9,3	5,4	Edificio residenziale
R15	120	79,64	15,6	7,8	Edificio residenziale
R16	124	263,54	51,5	24,9	Struttura ricettiva
R17	194	281,94	55,1	17,0	Edificio residenziale
R18	86	84,75	16,6	11,5	Edificio residenziale
R19	197	101,29	19,8	6,0	Edificio residenziale
R20	128	142,42	27,8	13,0	Edificio residenziale
R22	216	178,8	34,9	9,7	Edificio residenziale

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R23	138	44,52	8,7	3,8	Edificio residenziale
R25	162	274,55	53,6	19,9	Edificio residenziale
R26	119	140,5	27,4	13,8	Edificio residenziale
R27	21	2,07	0,4	1,2	Edificio residenziale
R28	93	81	15,8	10,2	Edificio residenziale

È comunque utile sottolineare che, a vantaggio di sicurezza, le simulazioni effettuate sono state eseguite in condizioni non realistiche, ipotizzando che si verificano contemporaneamente le condizioni più sfavorevoli per un determinato ricettore potenzialmente soggetto a shadow flickering, ovvero in concomitanza dei seguenti fattori: assenza di nuvole o nebbia, rotore frontale ai ricettori, rotore in movimento continuo, assenza di ostacoli, luce diretta.

Tutta via si evidenzia come l'analisi condotta non ha tenuto conto della presenza di "zone di esclusione" naturali o artificiali che hanno la facoltà di inibire (parzialmente o totalmente) il fenomeno di Shadow Flicker sui ricettori individuati (es.: presenza di alberatura, tendaggi, infissi, ecc.), poiché il calcolo si è basato esclusivamente sui dati orografici e geografici de sito in esame.

7 Analisi dei risultati

Dai risultati sopra citati (cfr. Tabella 3: Tabella riepilogativa) si evince che alcuni dei ricettori presi in considerazione superano il limite annuo pari a 30 ore/anno. Di seguito si riportano gli edifici maggiormente esposti al fenomeno

Tabella 4: Riepilogo dei ricettori maggiormente esposti

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R01	178	294,19	57,5	99,2	Edificio residenziale (disabitato)
R02	200	161,5	31,5	9,5	Struttura ricettiva
R07	219	341,78	66,8	18,3	Edificio residenziale
R08	175	219,51	42,9	14,7	Edificio residenziale
R10	150	161,34	31,5	12,6	Edificio residenziale
R12	158	179,9	35,1	13,3	Edificio residenziale
R13	199	196,08	38,3	11,5	Edificio residenziale
R16	124	263,54	51,5	24,9	Struttura ricettiva
R17	194	281,94	55,1	17,0	Edificio residenziale
R22	216	178,8	34,9	9,7	Edificio residenziale
R25	162	274,55	53,6	19,9	Edificio residenziale

Nei paragrafi seguenti si analizzeranno i ricettori singolarmente individuando possibili misure di mitigazione.

7.1 Ricettore R01

Il ricettore **R01** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore nel real case pari a 57.5 ore/anno 99.2minuti/giorno.

Entrambe le soglie limite vengono superate, ma va tenuto conto che l'edificio in questione risulta essere disabitato, di conseguenza il fenomeno, seppur presente, non è percepibile.



Figura 3: Ricettore R01

7.2 Ricettore R02

Il ricettore **R02** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 31.5 ore/anno. Nello specifico, il risultato del modello del real case supera di sole 1.5 ore/anno il limite di esposizione considerato. Difatti considerando che le simulazioni fatte, nonostante le approssimazioni prese in considerazione, rappresentano delle valutazioni cautelative che sovrastimano il reale effetto l'impatto, seppur presente, sarà difficilmente percepibile. Inoltre si deve tener conto che il fenomeno sarà localizzato per lo più in corrispondenza delle prime ore del mattino e al calar del sole, proiettando delle ombre flebili e difficilmente percepibili.



Figura 4: Ricettore R02

7.3 Ricettore R07

Il ricettore **R07** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 66.8 ore/anno. È da tener presente che il modello di calcolo non ha tenuto conto di eventuali ostacoli verticali, come ad esempio la vegetazione. Di conseguenza il fenomeno dello shadow flickering risulterebbe minore rispetto a quello calcolato. Nel caso specifico il ricettore **R07** presenta della vegetazione già esistente lungo la congiungente ricettore-aerogeneratore, di conseguenza il fenomeno dello shadow flickering potrebbe risultare minore e più difficilmente percepibile. Inoltre possono essere implementati i filari di alberi già esistenti abbattendo notevolmente il valore di esposizione.



Figura 5: Ricettore R07



Figura 6: Inquadramento ricettore R07 su ortofoto

7.4 Ricettore R08

Il ricettore **R08** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 42.9 ore/anno. Al fine di ridurre il valore di esposizione, si potranno implementare delle misure di mitigazione utili ad abbattere il valore di calcolo. Nello specifico potrebbero essere implementati dei filari di alberi compatibili con testo paesaggistico in cui si inseriscono e opportunamente posizionati, al fine di ridurre il fenomeno.



Figura 7 Ricettore R08



Figura 8: Inquadramento ricettore R08 su ortofoto

7.5 Ricettore R10

Il ricettore **R10** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 31.5 ore/anno. Nello specifico, il risultato del modello del real case supera di sole 1.5 ore/anno il limite di esposizione considerato. Difatti considerando che le simulazioni fatte, nonostante le approssimazioni prese in considerazione, rappresentano delle valutazioni cautelative che sovrastimano il reale effetto l'impatto, seppur presente, sarà difficilmente percepibile. Inoltre si deve tener conto che il fenomeno sarà localizzato per lo più in corrispondenza delle prime ore del mattino e al calar del sole, proiettando delle ombre flebili e difficilmente percepibili.



Figura 9: Ricettore R10

7.6 Ricettore R12

Il ricettore **R12** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 35.1 ore/anno. Nello specifico, il risultato del modello del real case supera di sole 5.1 ore/anno il limite di esposizione considerato. Difatti considerando che le simulazioni fatte, nonostante le approssimazioni prese in considerazione, rappresentano delle valutazioni cautelative che sovrastimano il reale effetto l'impatto, seppur presente, sarà difficilmente percepibile. Inoltre si deve tener conto che il fenomeno sarà localizzato per lo più in corrispondenza delle prime ore del mattino e al calar del sole, proiettando delle ombre flebili e difficilmente percepibili.



Figura 10: Ricettore R12

7.7 Ricettore R13

Il ricettore **R13** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 38.3 ore/anno. Nello specifico, il risultato del modello del real case supera di sole 8.3 ore/anno il limite di esposizione considerato. Difatti considerando che le simulazioni fatte, nonostante le approssimazioni prese in considerazione, rappresentano delle valutazioni cautelative che sovrastimano il reale effetto l'impatto, seppur presente, sarà difficilmente percepibile. Inoltre si deve tener conto che il fenomeno sarà localizzato per lo più in corrispondenza delle prime ore del mattino e al calar del sole, proiettando delle ombre flebili e difficilmente percepibili.



Figura 11: Ricettore R13

7.8 Ricettore R16

Il ricettore **R16** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 51.5 ore/anno. Al fine di ridurre il valore di esposizione, si potranno implementare delle misure di mitigazione utili ad abbattere il valore di calcolo. Nello specifico potrebbero essere implementati dei filari di alberi compatibili con testo paesaggistico in cui si inseriscono e opportunamente posizionati, al fine di ridurre il fenomeno.



Figura 12: Ricettore R16

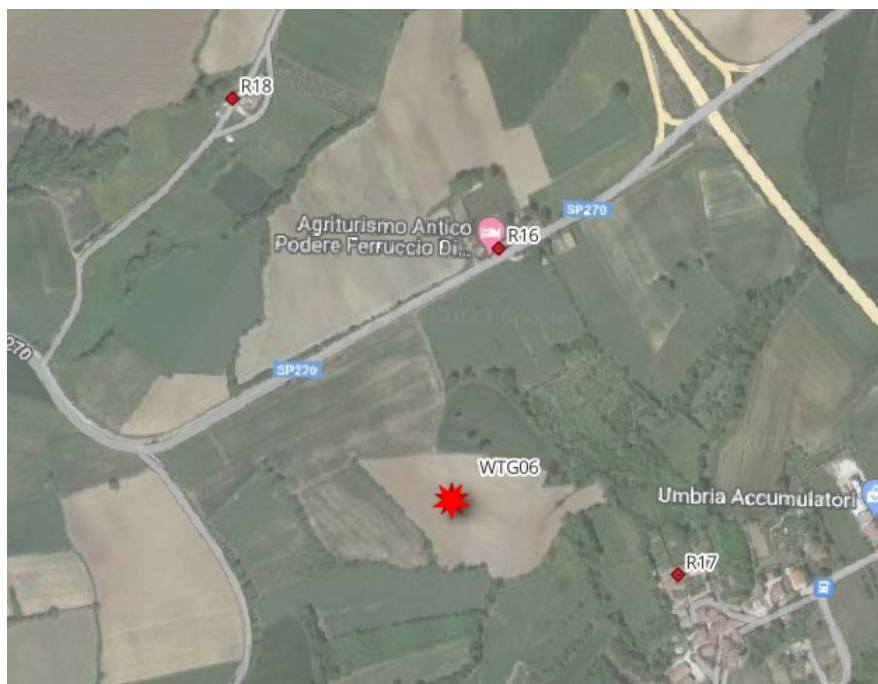


Figura 13 Inquadramento su ortofoto R16

7.9 Ricettore R17

Il ricettore **R17** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 55.1 ore/anno. È da tener presente che il modello di calcolo non ha tenuto conto di eventuali ostacoli verticali, come ad esempio la vegetazione. Di conseguenza il fenomeno dello shadow flickering risulterebbe minore rispetto a quello calcolato. Nel caso specifico il ricettore **R17** presenta della vegetazione già esistente lungo la congiungente ricettore-aerogeneratore, di conseguenza il fenomeno dello shadow flickering potrebbe risultare minore e più difficilmente percepibile. Inoltre possono essere implementati i filari di alberi già esistenti abbattendo notevolmente il valore di esposizione.



Figura 14 Ricettore R17



Figura 15: Inquadramento su ortofoto R17

7.1 Ricettore R22

Il ricettore **R22** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 34.9 ore/anno. Nello specifico, il risultato del modello del real case supera di sole 4.9 ore/anno il limite di esposizione considerato. Difatti considerando che le simulazioni fatte, nonostante le approssimazioni prese in considerazione, rappresentano delle valutazioni cautelative che sovrastimano il reale effetto l'impatto, seppur presente, sarà difficilmente percepibile. Inoltre si deve tener conto che il fenomeno sarà localizzato per lo più in corrispondenza delle prime ore del mattino e al calar del sole, proiettando delle ombre flebili e difficilmente percepibili.



Figura 16: Ricettore R22

7.2 Ricettore R25

Il ricettore **R16** risulta esposto al fenomeno dello shadow flickering per un totale di ore pari a 53.6 ore/anno. Al fine di ridurre il valore di esposizione, si potranno implementare delle misure di mitigazione utili ad abbattere il valore di calcolo. Nello specifico potrebbero essere implementati dei filari di alberi compatibili con testo paesaggistico in cui si inseriscono e opportunamente posizionati, al fine di ridurre il fenomeno.



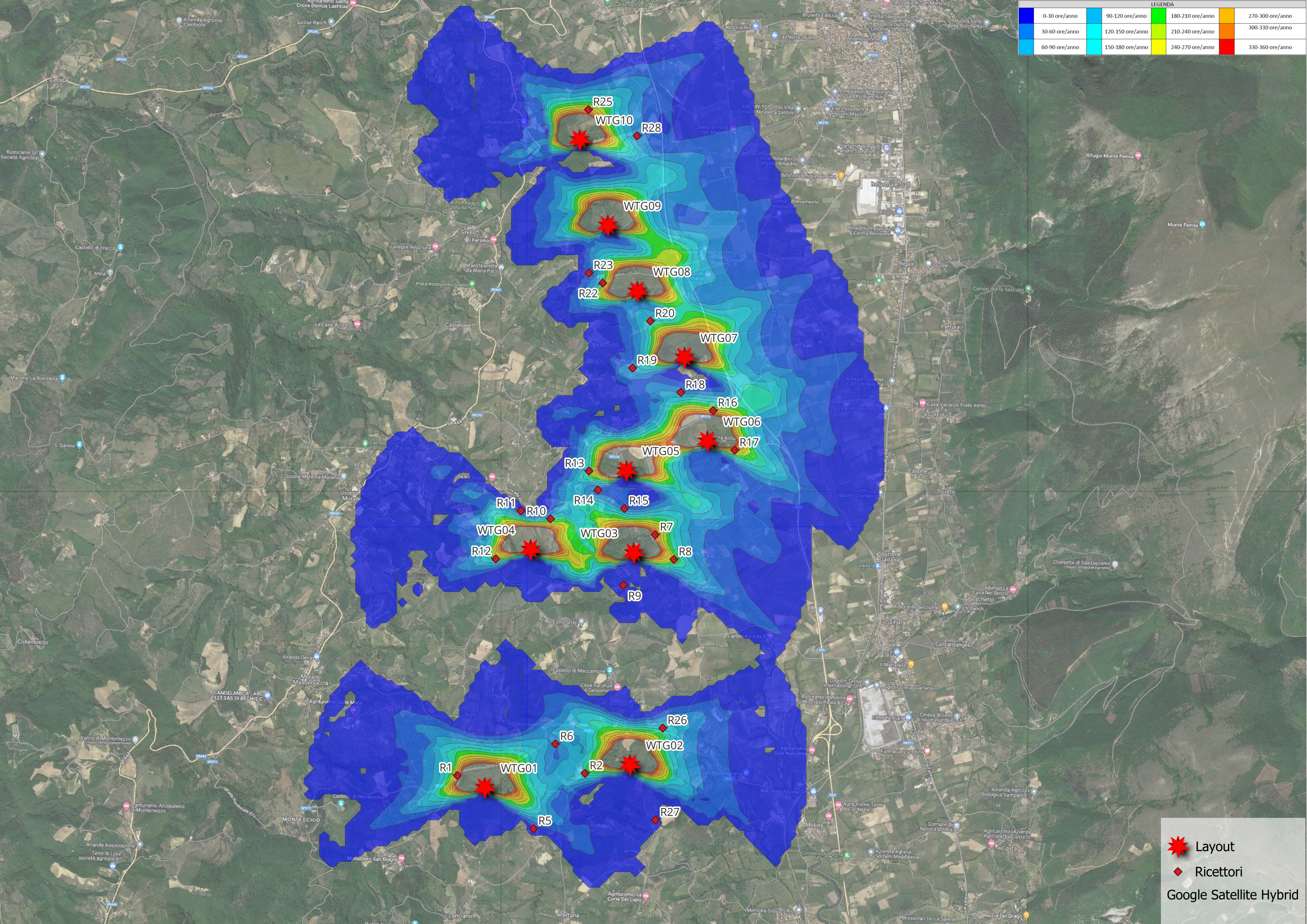
Figura 17: Ricettore R25





Figura 18: Inquadramento su ortofoto R25

8 Allegato

LEGENDA			
0-30 ore/anno	90-120 ore/anno	180-210 ore/anno	270-300 ore/anno
30-60 ore/anno	120-150 ore/anno	210-240 ore/anno	300-330 ore/anno
60-90 ore/anno	150-180 ore/anno	240-270 ore/anno	330-360 ore/anno



 Layout

 Ricettori

Google Satellite Hybrid