



REGIONE
TOSCANA



COMUNE DI
ORBETELLO



PROVINCIA DI
GROSSETO

PROGETTO DEFINITIVO

Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica "Orbetello" di potenza in immissione massima pari a 61,2 MW e relative opere connesse da realizzarsi nel comune di Orbetello (Gr)

Titolo elaborato

Studio sugli effetti dello shadow flickering

Codice elaborato

F0544AR05A

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. Monica COIRO
Ing. Federica COLANGELO
Ing. Gerardo Giuseppe SCAVONE
Ing. jr. Flavio Gerardo TRIANI
Arch. Gaia TELESCA
Ing. Manuela NARDOZZA



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).

Consulenze specialistiche

Committente

Apollo Wind s.r.l.

Via della Stazione,7
39100 – Bolzano (Bz)

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

Sommario

1	Informazioni essenziali	3
2	Premessa	4
3	Il fenomeno dello shadow flickering	5
4	Individuazione dei ricettori	8
5	Modello di calcolo	13
6	Risultati	15
7	Analisi dei risultati	22

1 Informazioni essenziali

Proponente	Apollo Wind s.r.l.
Potenza nominale complessiva	59.4 MW
Potenza di immissione in rete	59.4 MW
Potenza nominale massima singola WTG	6.6 MW
Numero aerogeneratori	9
Altezza hub	115 m
Diametro rotore	170 m
Altezza totale	200 m
Lunghezza pala	85 m
Area poligono impianto	698.9 ha
Coordinate WTG	Cfr Tabella 1: Coordinate aerogeneratori

2 Premessa

L'intervento proposto consiste nella realizzazione di un nuovo parco eolico, denominato "Orbetello", localizzato nel territorio comunale di Orbetello, in provincia di Grosseto. L'impianto sarà composto da n. 9 aerogeneratori della potenza nominale di 6.6 MW ciascuno, con la potenza complessiva in immissione di 59.4 MW, in accordo con quanto previsto nella STMG Terna ID 202200206. Le relative opere di connessione saranno ubicate nel Comune di Orbetello (Gr).

La presente relazione ha l'obiettivo di illustrare il fenomeno dello 'shadow flickering' e di valutarne gli effetti nell'area che circonda il parco in oggetto.

Il modello di macchina preso in considerazione è Siemens Gamesa SG170, Hhub 115m o altro modello simile.

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.

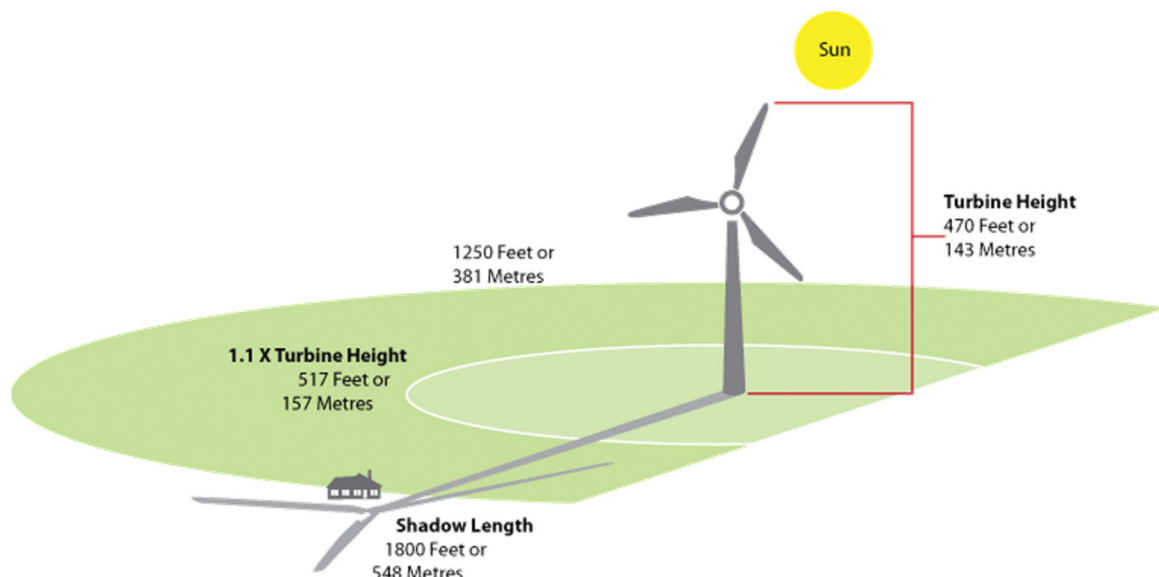


Figura 1: Rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flickering

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 ricettore - 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 ricettore all'aerogeneratore in assenza di ostacoli fisici (alberi, altri edifici ecc...);
- orientamento perpendicolare del rotore rispetto alla congiungente sole - ricettore: infatti, quando il piano del rotore è perpendicolare alla linea sole-ricettore, 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 ricettore 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 ricettore molto prossimo all'aerogeneratore, una porzione ampia di pala copre il disco solare così come osservato dal punto di vista del ricettore stesso, e, quindi, l'intensità del flicker risulta maggiormente percepibile. All'aumentare della distanza tra aerogeneratore e ricettore, 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 ricettore (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 ricettore – 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 ricettore;

- 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 dovuto all'inserimento del parco in esame, sono stati individuati i ricettori potenzialmente sensibili presenti nell'area. Nello specifico si è considerata un'area d'indagine pari a 10 volte le dimensioni del diametro, ovvero a partire dalla posizione degli aerogeneratori si è considerato un buffer di 1700m; ciò in accordo con quanto stabilito dalla "National Policy Statement for Renewable Energy Infrastructure (EN-3)" (UK, 2011) (PPS22 per l'Inghilterra, TAN8 per il Galles), secondo la quale è improbabile che si verifichi un impatto significativo da shadow flickering a distanze superiori a dieci volte il diametro del rotore. Sebbene il fenomeno possa essere percepito anche all'esterno degli edifici, esso risulta evidente e potenzialmente fastidioso in quegli ambienti con finestrate localizzate lungo la direttrice sole-aerogeneratore e, per tale ragione, si è considerato nella simulazione la presenza di finestre di altezza pari a 1,5 metri e larghezza pari ad 1 metro, posizionate ad una quota dal suolo di 2,0 metri e disposte su tutte le facciate degli edifici considerati, in direzione dei quattro punti cardinali (N-E-S-W).

Di seguito si riportano le posizioni degli aerogeneratori e i ricettori sensibili individuati.

Tabella 1: Coordinate aerogeneratori

WTG	Coordinate UTM-WGS84 fuso 32		Coordinate Gauss Boaga fuso ovest	
	E	N	X	Y
T01	684310	4714639	1684340	4714652
T02	682625	4714076	1682655	4714089
T03	682550	4713457	1682580	4713470
T04	682876	4712909	1682906	4712922
T05	682685	4712289	1682715	4712302
T06	681751	4711197	1681781	4711210
T07	681259	4710587	1681289	4710600
T08	680663	4711227	1680693	4711240
T09	682603	4710434	1682633	4710447

Tabella 2: Ricettori sensibili individuati

Nome	Coordinate UTM-WGS84 fuso 32		Categoria
	E	N	
R001	681678	4713956	A01/C01/02
R002	682901	4714499	A02
R003	684855	4714436	A02
R004	684155	4713366	A02
R005	680949	4712440	A02
R006	681031	4711750	A02
R007	683091	4709647	A02
R008	683518	4709330	A02
R009	683227	4710496	A02
R010	681311	4712521	A02
R011	682199	4712660	A02
R012	683489	4712639	A02/04
R013	683742	4714052	A02/07/C06

Nome	Coordinate UTM-WGS84 fuso 32		Categoria
	E	N	
R014	683250	4711350	A02/07/D10
R015	683228	4713742	A02/08/C06
R016	680550	4709910	A02/C02
R017	683510	4709293	A02/C02
R018	683290	4712334	A02/C02
R019	681153	4712986	A02/C02
R020	683773	4714937	A02/C02
R021	682212	4714413	A02/C02/03
R022	681194	4711818	A02/C06
R023	683905	4710845	A02/C06
R024	685278	4715151	A02/D10
R025	684858	4714723	A02/D10
R026	684181	4713315	A02/D10
R027	684717	4713353	A02/D10
R028	682022	4709441	A02/D10
R029	683124	4709766	A02/D10
R030	683840	4709630	A02/D10
R031	683582	4710871	A02/D10
R032	683042	4711905	A02/D10
R033	683797	4712288	A02/D10
R034	683945	4712711	A02/D10
R035	683944	4713171	A02/D10
R036	683952	4713155	A02/D10
R037	684251	4712996	A02/D10
R038	684813	4713935	A02/D10
R039	685104	4714014	A02/D10/01
R040	683899	4709619	A02/E07
R041	684724	4714091	A02/F01
R042	682146	4714482	A02/F02
R043	679749	4711320	A03
R044	685419	4714624	A03
R045	683843	4713190	A03
R046	683929	4709655	A03
R047	683972	4713941	A03
R048	682888	4709559	A03/02/D10
R049	685015	4715637	A03/07/D10
R050	685445	4714482	A03/C02
R051	684636	4713233	A03/C02
R052	685001	4713489	A03/C02
R053	683254	4710580	A03/C02/06
R054	683837	4712582	A03/C06
R055	681322	4712617	A03/C06
R056	683949	4713960	A03/C06
R057	683157	4715617	A03/D1
R058	682600	4715397	A03/D10
R059	685460	4714966	A03/D10
R060	685508	4714877	A03/D10
R061	685169	4714018	A03/D10
R062	681214	4712003	A03/D10

Nome	Coordinate UTM-WGS84 fuso 32		Categoria
	E	N	
R063	681162	4712088	A03/D10
R064	681102	4712242	A03/D10
R065	682443	4709203	A03/D10
R066	682577	4709333	A03/D10
R067	683117	4709685	A03/D10
R068	683380	4709975	A03/D10
R069	683599	4710282	A03/D10
R070	683797	4710277	A03/D10
R071	683205	4710515	A03/D10
R072	682382	4710965	A03/D10
R073	682082	4711723	A03/D10
R074	683443	4711154	A03/D10
R075	683336	4711133	A03/D10
R076	682580	4711489	A03/D10
R077	683153	4711891	A03/D10
R078	683628	4712570	A03/D10
R079	683817	4712554	A03/D10
R080	684182	4712858	A03/D10
R081	681873	4712392	A03/D10
R082	681065	4713292	A03/D10
R083	682219	4714514	A03/D10
R084	683022	4713746	A03/D10
R085	685680	4714198	A03/D10
R086	681361	4712516	A03/D10/07
R087	682175	4714535	A03/F01
R088	680300	4710353	A04
R089	683580	4714485	A04
R090	683899	4714063	A04
R091	680917	4712512	A04
R092	681062	4712192	A04
R093	681975	4709417	A04
R094	682047	4709985	A04
R095	681796	4712322	A04
R096	681277	4712598	A04
R097	681185	4712910	A04
R098	682033	4710003	A04/C02
R099	682720	4709433	A04/C02
R100	683999	4710870	A04/C02
R101	682376	4711856	A04/C02/06
R102	683363	4714645	A04/C02/06
R103	683988	4714115	A04/C06
R104	681651	4709847	A04/C06
R105	681805	4713733	A04/C06
R106	683043	4711578	A04/D10
R107	683715	4712598	A04/F01
R108	681562	4714098	A07
R109	684353	4715543	A07
R110	684863	4715122	A07
R111	683248	4711506	A07

Nome	Coordinate UTM-WGS84 fuso 32		Categoria
	E	N	
R112	682016	4713509	A07
R113	681574	4714057	A07
R114	682224	4714592	A07
R115	681171	4714174	A07/D10
R116	683870	4714065	B05
R117	684113	4713995	B05/C01/02
R118	682525	4710909	B07/C02
R119	685055	4715153	D01
R120	679343	4711468	D01
R121	681175	4711961	D01
R122	683838	4710278	D01
R123	682551	4710953	D01
R124	681303	4714175	D01
R125	682186	4714442	D01
R126	684019	4713994	D01
R127	679420	4711235	D02
R128	679484	4711112	D02
R129	679658	4710768	D02
R130	679893	4710046	D02
R131	679996	4710019	D02
R132	682497	4710960	D03/C01
R133	682525	4710870	D06
R134	682557	4710832	D06
R135	685200	4715752	D07
R136	679393	4711322	D08
R137	679545	4710931	D08
R138	679730	4710610	D08
R139	679816	4710345	D08
R140	679994	4709909	D08
R141	679321	4711477	D08
R142	679276	4711559	D08
R143	679231	4711646	D08
R144	681054	4711683	D10
R145	683898	4713705	D10
R146	685066	4713942	D10
R147	685042	4713864	D10
R148	685620	4714074	D10
R149	685499	4713948	D10
R150	682933	4710341	D10
R151	681167	4710815	D10
R152	681130	4710841	D10
R153	679995	4712543	D10
R154	680850	4712484	D10
R155	682074	4710030	D10
R156	682009	4709952	D10
R157	682859	4709574	D10
R158	682876	4709578	D10
R159	682884	4709586	D10
R160	683872	4709649	D10

Nome	Coordinate UTM-WGS84 fuso 32		Categoria
	E	N	
R161	683802	4709644	D10
R162	683635	4710298	D10
R163	683413	4712377	D10
R164	683764	4712562	D10
R165	684153	4712904	D10
R166	681778	4712297	D10
R167	681289	4713989	D10
R168	681218	4714049	D10
R169	681137	4714101	D10
R170	681232	4714171	D10
R171	681185	4714247	D10
R172	681429	4714155	D10
R173	682139	4714511	D10
R174	682069	4714481	D10
R175	682098	4714550	D10
R176	682152	4714569	D10
R177	682183	4714574	D10
R178	682238	4714634	D10
R179	684196	4713314	D10
R180	683201	4715662	D10
R181	685441	4714940	D10
R182	685486	4714953	D10
R183	684277	4715793	D10/A7
R184	683862	4709627	D10/C01/02
R185	682882	4709564	D10/C06
R186	683884	4714068	E07

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.

Come accennato sopra, 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 pari a 1700m 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 2600 h/a^{1 2}, quindi, i risultati del calcolo possono, ragionevolmente, essere abbattuti del 40.64%, pari al complemento a 1 del rapporto $2600/4380 = 59.36\%$.

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 59.36% 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 68.40³%, delle ore anno, ovvero 5992 ore; in altri termini, la probabilità che il rotore di un aerogeneratore risulti in rotazione è appunto dell'ordine del 68.40 % (pari appunto al rapporto 5992/8760).

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 $59.36\% \times 68.40\% = 40.60\%$, ovvero 59.40%, 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 70.50% di quelle annuali. Tenendo conto dei valori di disponibilità dell'impianto e della rete rispettivamente pari a 98% e 99%, l'assunzione del 68.40% 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 ricettori;
- 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 52%, dal momento che la direzione prevalenti del vento risulta essere la congiungente EENE-WWSW. Alla luce di ciò, le ore del fenomeno subiscono un ulteriore abbattimento, che le porta ad essere circa il 19.49% di quelle calcolate dal modello nell'ipotesi WORST CASE.

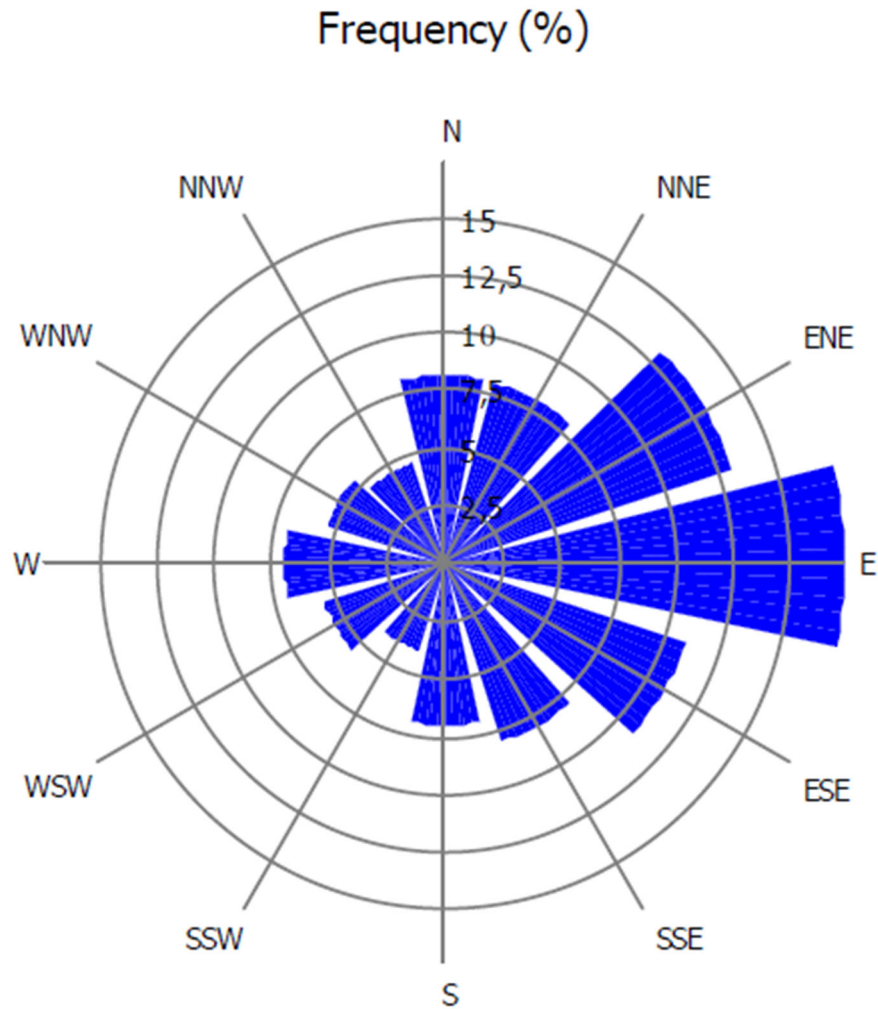


Figura 2: Rosa dei venti

Tabella 3: Risultati della simulazione

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R001	182	90,6	17,7	5,8	A01/C01/02
R002	121	91,6	17,9	8,9	A02
R003	120	123,1	24,0	12,0	A02
R004	139	43,1	8,4	3,6	A02
R005	0	0	0,0	0,0	A02
R006	102	88,4	17,2	10,1	A02
R007	0	0	0,0	0,0	A02
R008	0	0	0,0	0,0	A02
R009	153	89,7	17,5	6,9	A02
R010	82	27,4	5,3	3,9	A02

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R011	232	198,2	38,6	10,0	A02
R012	178	137,6	26,8	9,0	A02/04
R013	108	40,6	7,9	4,4	A02/07/C06
R014	36	11,1	2,2	3,6	A02/07/D10
R015	161	120,7	23,5	8,8	A02/08/C06
R016	0	0	0,0	0,0	A02/C02
R017	0	0	0,0	0,0	A02/C02
R018	86	73,1	14,2	9,9	A02/C02
R019	100	32,5	6,3	3,8	A02/C02
R020	150	102,2	19,9	8,0	A02/C02
R021	140	141,7	27,6	11,8	A02/C02/03
R022	118	81,6	15,9	8,1	A02/C06
R023	43	15,6	3,0	4,2	A02/C06
R024	72	34,8	6,8	5,7	A02/D10
R025	93	85,6	16,7	10,8	A02/D10
R026	78	25,2	4,9	3,8	A02/D10
R027	0	0	0,0	0,0	A02/D10
R028	0	0	0,0	0,0	A02/D10
R029	0	0	0,0	0,0	A02/D10
R030	45	10	1,9	2,6	A02/D10
R031	62	30	5,8	5,7	A02/D10
R032	65	20	3,9	3,6	A02/D10
R033	81	30,7	6,0	4,4	A02/D10
R034	179	71,2	13,9	4,7	A02/D10
R035	180	63,8	12,4	4,1	A02/D10
R036	180	63,7	12,4	4,1	A02/D10
R037	40	13,7	2,7	4,0	A02/D10
R038	0	0	0,0	0,0	A02/D10
R039	0	0	0,0	0,0	A02/D10/01
R040	51	13,6	2,7	3,1	A02/E07
R041	0	0	0,0	0,0	A02/F01
R042	120	110,3	21,5	10,7	A02/F02
R043	97	43,8	8,5	5,3	A03
R044	48	22,8	4,4	5,6	A03
R045	146	61,1	11,9	4,9	A03
R046	65	22	4,3	4,0	A03
R047	81	25,6	5,0	3,7	A03
R048	0	0	0,0	0,0	A03/02/D10

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R049	0	0	0,0	0,0	A03/07/D10
R050	50	23,1	4,5	5,4	A03/C02
R051	0	0	0,0	0,0	A03/C02
R052	0	0	0,0	0,0	A03/C02
R053	129	77,1	15,0	7,0	A03/C02/06
R054	155	63,8	12,4	4,8	A03/C06
R055	82	26,6	5,2	3,8	A03/C06
R056	83	26,5	5,2	3,7	A03/C06
R057	60	24,1	4,7	4,7	A03/D1
R058	0	0	0,0	0,0	A03/D10
R059	48	20,5	4,0	5,0	A03/D10
R060	44	18,6	3,6	4,9	A03/D10
R061	0	0	0,0	0,0	A03/D10
R062	43	14,7	2,9	4,0	A03/D10
R063	39	12,8	2,5	3,8	A03/D10
R064	36	10,9	2,1	3,5	A03/D10
R065	0	0	0,0	0,0	A03/D10
R066	0	0	0,0	0,0	A03/D10
R067	0	0	0,0	0,0	A03/D10
R068	66	37,8	7,4	6,7	A03/D10
R069	57	29,6	5,8	6,1	A03/D10
R070	47	19,8	3,9	4,9	A03/D10
R071	155	93,8	18,3	7,1	A03/D10
R072	185	129,6	25,3	8,2	A03/D10
R073	71	24,8	4,8	4,1	A03/D10
R074	84	32,4	6,3	4,5	A03/D10
R075	76	27	5,3	4,2	A03/D10
R076	128	62,4	12,2	5,7	A03/D10
R077	51	14,9	2,9	3,4	A03/D10
R078	158	103,9	20,2	7,7	A03/D10
R079	142	69	13,4	5,7	A03/D10
R080	82	27,5	5,4	3,9	A03/D10
R081	119	64,9	12,6	6,4	A03/D10
R082	40	13,3	2,6	3,9	A03/D10
R083	102	98,4	19,2	11,3	A03/D10
R084	145	128,1	25,0	10,3	A03/D10
R085	48	17,7	3,4	4,3	A03/D10
R086	86	29,7	5,8	4,0	A03/D10/07

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R087	100	90,2	17,6	10,5	A03/F01
R088	101	44,1	8,6	5,1	A04
R089	182	109,4	21,3	7,0	A04
R090	91	29	5,7	3,7	A04
R091	0	0	0,0	0,0	A04
R092	35	10,4	2,0	3,5	A04
R093	0	0	0,0	0,0	A04
R094	0	0	0,0	0,0	A04
R095	105	50	9,7	5,6	A04
R096	78	25	4,9	3,7	A04
R097	161	54,7	10,7	4,0	A04
R098	0	0	0,0	0,0	A04/C02
R099	0	0	0,0	0,0	A04/C02
R100	40	13,4	2,6	3,9	A04/C02
R101	35	12,9	2,5	4,3	A04/C02/06
R102	139	85	16,6	7,2	A04/C02/06
R103	85	24,7	4,8	3,4	A04/C06
R104	0	0	0,0	0,0	A04/C06
R105	234	136,7	26,6	6,8	A04/C06
R106	43	15,4	3,0	4,2	A04/D10
R107	172	94	18,3	6,4	A04/F01
R108	124	56,8	11,1	5,4	A07
R109	0	0	0,0	0,0	A07
R110	89	69,8	13,6	9,2	A07
R111	36	11	2,1	3,6	A07
R112	205	140,9	27,5	8,0	A07
R113	120	57,5	11,2	5,6	A07
R114	75	59,8	11,7	9,3	A07
R115	83	27,8	5,4	3,9	A07/D10
R116	92	30,8	6,0	3,9	B05
R117	72	19,7	3,8	3,2	B05/C01/02
R118	181	100,2	19,5	6,5	B07/C02
R119	100	63,7	12,4	7,4	D01
R120	40	14,8	2,9	4,3	D01
R121	43	14,2	2,8	3,9	D01
R122	46	18,3	3,6	4,7	D01
R123	137	74,4	14,5	6,4	D01
R124	93	34,3	6,7	4,3	D01

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R125	130	126,7	24,7	11,4	D01
R126	79	23,4	4,6	3,5	D01
R127	44	18	3,5	4,8	D02
R128	49	21,5	4,2	5,1	D02
R129	109	51,5	10,0	5,5	D02
R130	92	33,1	6,5	4,2	D02
R131	77	33,9	6,6	5,1	D02
R132	159	90,8	17,7	6,7	D03/C01
R133	200	129,9	25,3	7,6	D06
R134	212	155,7	30,3	8,6	D06
R135	0	0	0,0	0,0	D07
R136	42	16,7	3,3	4,6	D08
R137	67	30,4	5,9	5,3	D08
R138	36	11,3	2,2	3,7	D08
R139	43	14,6	2,8	4,0	D08
R140	50	13,4	2,6	3,1	D08
R141	39	14,3	2,8	4,3	D08
R142	39	13,2	2,6	4,0	D08
R143	37	12,2	2,4	3,9	D08
R144	116	131,9	25,7	13,3	D10
R145	145	55,1	10,7	4,4	D10
R146	0	0	0,0	0,0	D10
R147	0	0	0,0	0,0	D10
R148	70	26	5,1	4,3	D10
R149	63	27,1	5,3	5,0	D10
R150	166	240,1	46,8	16,9	D10
R151	175	376,8	73,4	25,2	D10
R152	199	321,6	62,7	18,9	D10
R153	0	0	0,0	0,0	D10
R154	0	0	0,0	0,0	D10
R155	31	8,7	1,7	3,3	D10
R156	0	0	0,0	0,0	D10
R157	0	0	0,0	0,0	D10
R158	0	0	0,0	0,0	D10
R159	0	0	0,0	0,0	D10
R160	55	16,2	3,2	3,4	D10
R161	41	8,7	1,7	2,5	D10
R162	54	27	5,3	5,8	D10

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R163	71	50,3	9,8	8,3	D10
R164	165	86,7	16,9	6,1	D10
R165	127	40,3	7,9	3,7	D10
R166	98	45,1	8,8	5,4	D10
R167	87	32,7	6,4	4,4	D10
R168	82	29,2	5,7	4,2	D10
R169	77	26,2	5,1	4,0	D10
R170	86	30,4	5,9	4,1	D10
R171	84	28,8	5,6	4,0	D10
R172	107	44,1	8,6	4,8	D10
R173	112	99,2	19,3	10,4	D10
R174	128	93	18,1	8,5	D10
R175	105	88,1	17,2	9,8	D10
R176	92	77,7	15,1	9,9	D10
R177	86	72,7	14,2	9,9	D10
R178	58	37,8	7,4	7,6	D10
R179	77	24,7	4,8	3,8	D10
R180	46	16,3	3,2	4,1	D10
R181	48	21,1	4,1	5,1	D10
R182	46	19,4	3,8	4,9	D10
R183	0	0	0,0	0,0	D10/A7
R184	47	11,5	2,2	2,9	D10/C01/02
R185	0	0	0,0	0,0	D10/C06
R186	91	29,9	5,8	3,8	E07

7 Analisi dei risultati

Nonostante il parco eolico in oggetto si inserisce in un contesto paesaggistico caratterizzata da vari nuclei abitativi sparsi, il fenomeno dello shadow flickering risulta trascurabile per la maggior parte dei ricettori presi in esame. Difatti, facendo riferimenti al **REAL CASE**, i ricettori che risultano essere esposti per un limite di ore superiore alla soglia limite di 30ore/anno sono:

Tabella 4: Tabella riepilogativa

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"		Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	[minuti/giorno]	
R011	232	198,2	38,6	10,0	A02
R134	212	155,7	30,3	8,6	D06
R150	166	240,1	46,8	16,9	D10
R151	175	376,8	73,4	25,2	D10
R152	199	321,6	62,7	18,9	D10

Dalla tabella precedente si evince che:

- I ricettori **R011** e **R134**, accatastati rispettivamente come A02 e D06, superano il limite di 30 ore/anno di una quantità minima, tale da potersi considerare trascurabile;
- I ricettori **R150**, **R151** e **R152**, accatastati tutti come D10, risultano essere maggiormente esposti. Di questi, quelli etichettati come R151 e R152 risultano essere dei possibili depositi, mentre il ricettore R152 risulta essere potenzialmente disabitato. Di conseguenza il fenomeno, seppur presente, non produce impatti negativi.

In definitiva si porta all'attenzione come la modellazione precedentemente descritta per caratterizzare il fenomeno dello 'shadow flickering', nonostante tutte le approssimazioni fatte al fine di averne una quanto più vicina alla realtà, rappresenti ancora una stima cautelativa dei valori reali, difatti sovrastimando l'impatto effettivo. Inoltre a causa della natura stessa del fenomeno, lo 'shadow flickering' risulta essere collocato a livello temporale durante le prime ore del mattino e al calare del sole. In entrambi i casi il sole, essendo prossimo alla linea dell'orizzonte, proietta ombre flebili e allungate molto spesso anche difficili da percepire.

In conclusione, qualora si ritenga opportuna e in accordo con i proprietari dei fabbricati sopraccitati, si può ipotizzare un intervento di mitigazione del fenomeno. Nel caso specifico, si può ipotizzare la piantumazione di specie arboree ad accrescimento rapido e compatibili con il contesto in esame localizzate perimetralmente al fabbricato in corrispondenza della congiungente ricettore-aerogeneratore maggiormente impattante, al fine di eliminare completamente il fenomeno.



Figura 3: Ricettori R151 e R152



Figura 4: Ricettore R150

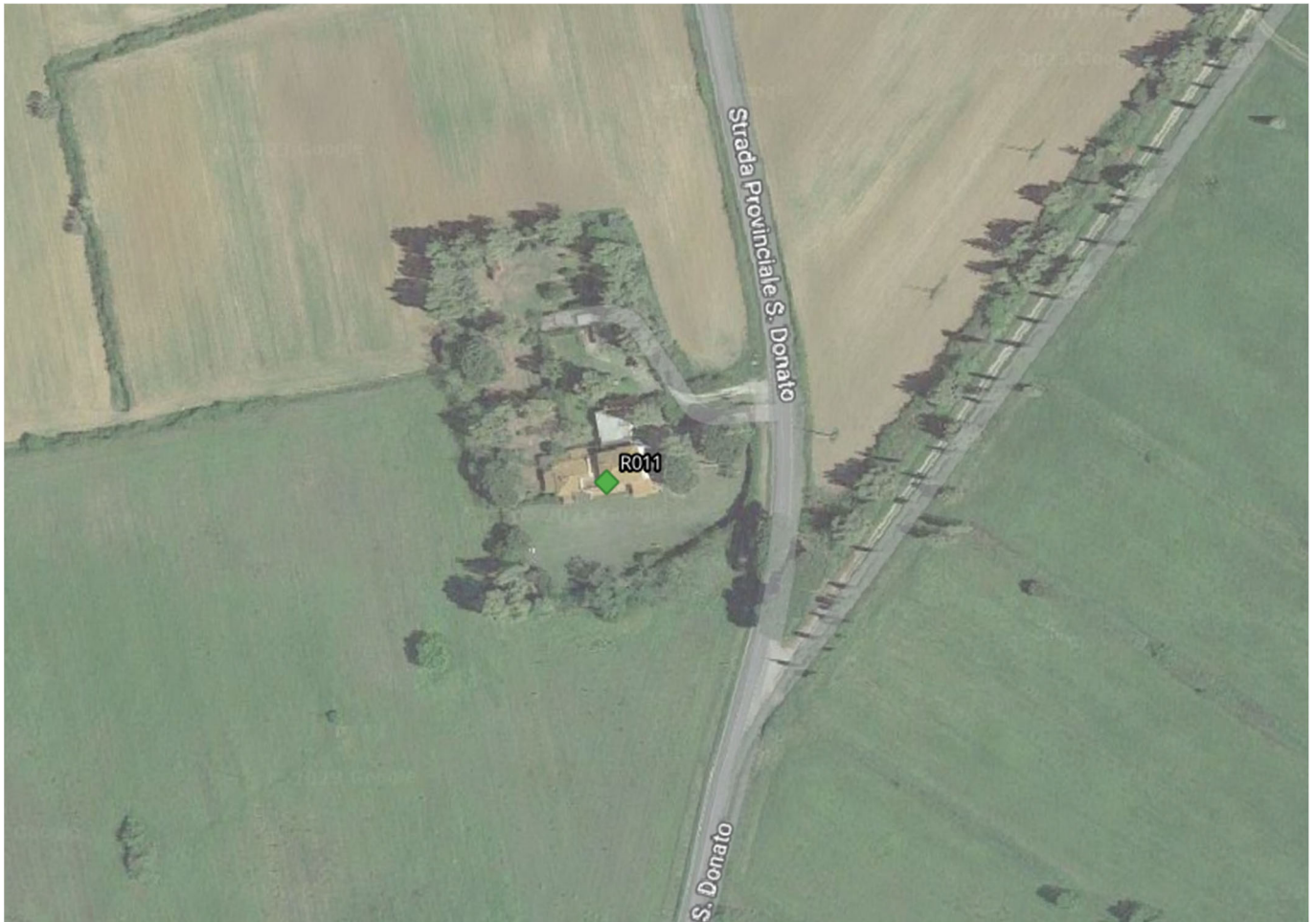
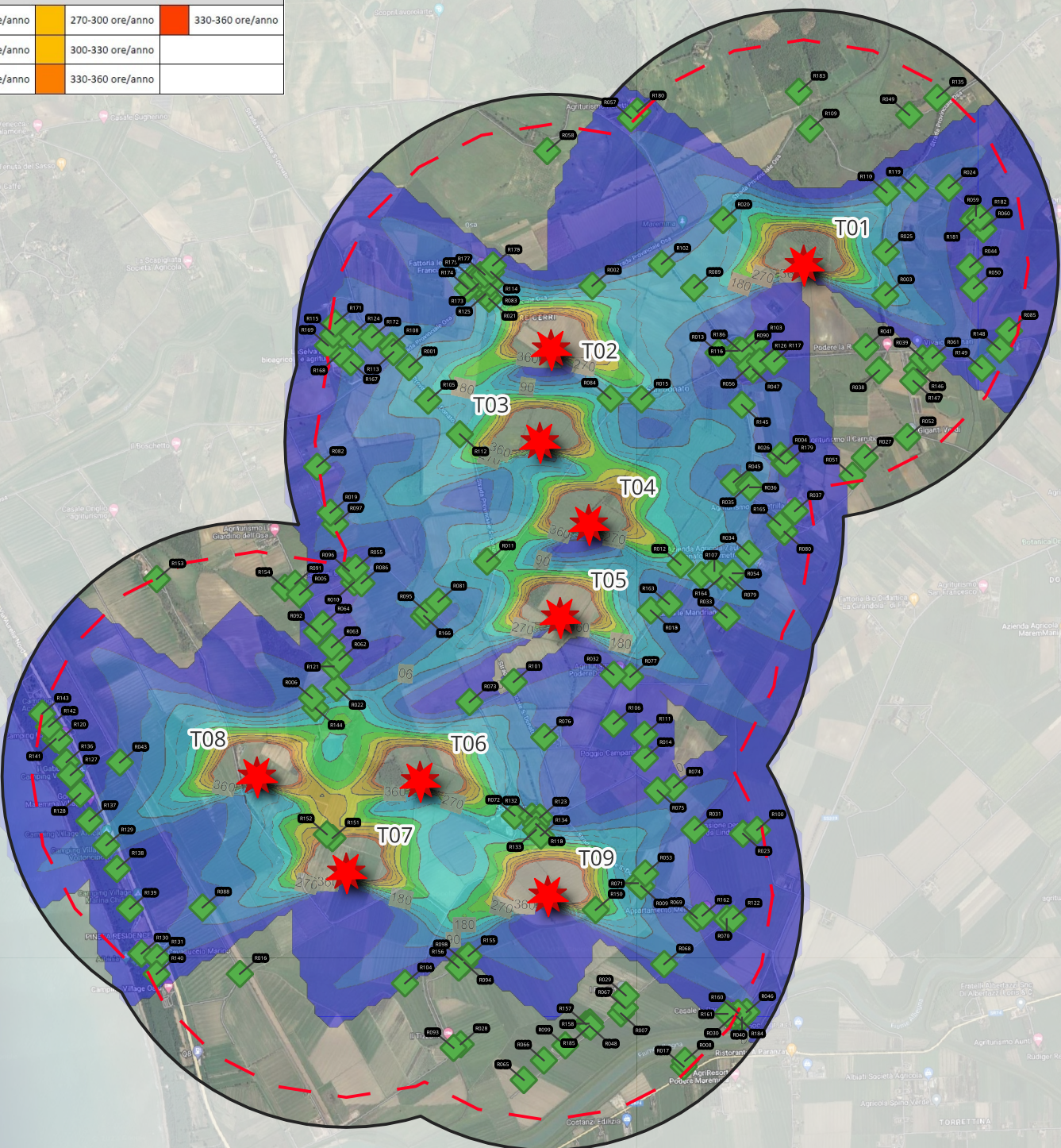


Figura 5: Ricettore R011







Figura 6: Ricettore R134

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



Legenda

-  Buffer 1700m
-  buffer 1500m
-  Ricettori
-  Layout