

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA DI BARI
COMUNE DI GRAVINA IN PUGLIA



AUTORIZZAZIONE UNICA EX D.LGS. 387/2003

Progetto Definitivo
Parco eolico "Monte Marano" e opere connesse

TITOLO ELABORATO

Studio sugli effetti dello shadow flickering

CODICE ELABORATO

COMMESSA	FASE	ELABORATO	REV.
F0433	A	R12	A

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione

SCALA

—

DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
luglio 2021	prima emissione	GMA	GDS	CGU

PROPONENTE

FRI-EL

FRI-EL S.p.A.

Piazza della Rotonda 2
00186 Roma (RM)
fri-elspa@legalmail.it
P. Iva 01652230218
Cod. Fisc. 07321020153

PROGETTAZIONE



F4 ingegneria srl

via Di Giura - Centro Direzionale, 85100 Potenza
Tel: +39 0971 1 944 797 - Fax: +39 0971 5 54 52
www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore Tecnico
(ing. Giuseppe Manzi)



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





Sommario

1	Introduzione	2
2	Il fenomeno dello shadow flickering	3
3	Individuazione dei ricettori	6
4	Modello di calcolo	10
5	Risultati	12





1 Introduzione

F4 ingegneria Srl, in qualità di Consulente, è stata incaricata dalla società proponente FRI-EL SpA di redigere il progetto definitivo per la costruzione di un nuovo parco eolico denominato "Monte Marano" e relative opere di connessione alla RTN, localizzato nel Comune di Gravina in Puglia (BA).

Il progetto proposto prevede l'installazione di 12 nuovi generatori eolici ciascuno di potenza nominale fino a 6.2 MW, in linea con i più elevati standard tecnici presenti sul mercato, per una potenza installata complessiva pari a 74.4 MW.

L'energia prodotta dagli aerogeneratori, attraverso la rete di cavidotti interrati in media tensione, verrà convogliata alla sottostazione elettrica di trasformazione, localizzata anch'essa nel territorio comunale di Gravina in Puglia, in adiacenza ad una futura Stazione Elettrica (SE) a 380/150 kV della RTN da inserire in entra – esce alla linea 150 kV "Genzano 380 – Matera 380".

La presente relazione ha l'obiettivo di illustrare il fenomeno dello "shadow flickering" e di valutare il suo effetto nell'area circostante l'impianto eolico in progetto.



2 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 (Verkuijden 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.

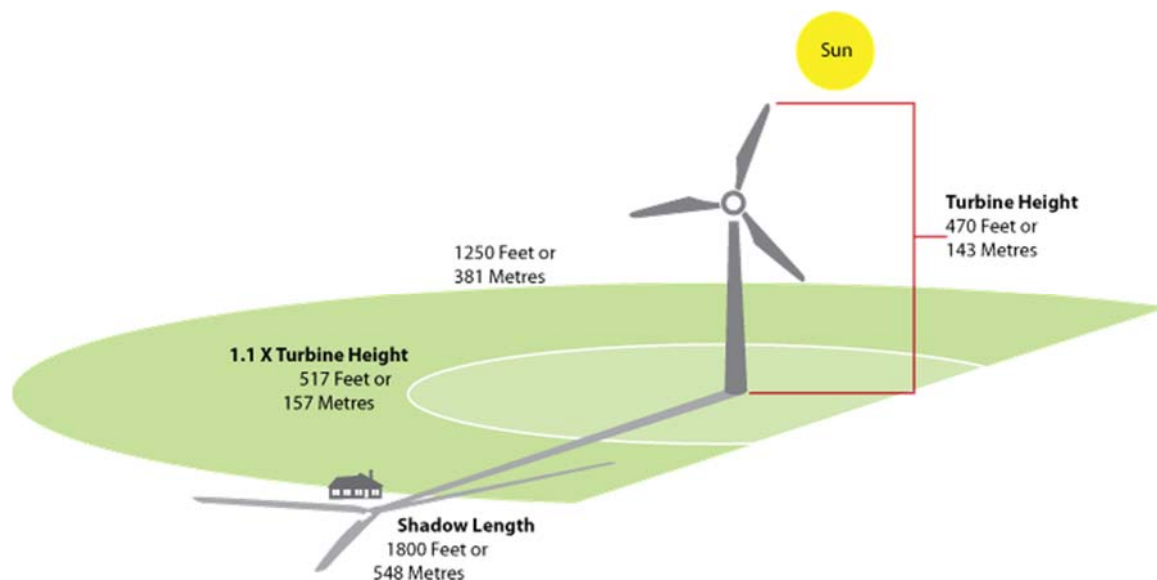


Figura 1: rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flicker

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:
- la posizione del sole sia tale da produrre una luminosità sufficiente; tale condizione corrisponde, per la latitudine di progetto, in un'altezza del sole sull'orizzonte dell'ordine di almeno 10 gradi;
 - 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 ricettore 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 ricettore;
- 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.





3 Individuazione dei ricettori

Allo scopo di valutare l'impatto indotto sugli edifici da parte dell'impianto eolico in progetto, sono stati individuati i ricettori potenzialmente sensibili presenti in un'area corrispondente all'involuppo delle aree buffer circolari di raggio pari a 10 volte il diametro del rotore (nel caso in esame 1700 m) del modello di aerogeneratore previsto in progetto (D pari a 170 m al massimo), con centro coincidente con le postazioni delle WTG in oggetto; 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 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 nel buffer sopra specificato.

Tabella 1: ricettori considerati

Ricettore	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		Categoria catastale	Distanza WTG più prossima (m)	Comune
	Est	Nord			
R01	606566	4525073	A/3_D/10	974	Gravina in Puglia
R02	608027	4525301	A/3_D/10	808	Gravina in Puglia
R03	608969	4524180	A/3_D/10	541	Gravina in Puglia
R04	608512	4523386	A/3_D/10	537	Gravina in Puglia
R05	609517	4523855	A/7	842	Gravina in Puglia
R06	609655	4523724	A/3	843	Gravina in Puglia
R07	609721	4523723	A/7_C/6	894	Gravina in Puglia
R08	609766	4523769	A/7	958	Gravina in Puglia
R09	609786	4523790	A/3_F/3	987	Gravina in Puglia
R10	609788	4523650	A/7	908	Gravina in Puglia
R11	609859	4523706	A/7_C/6	998	Gravina in Puglia
R12	609815	4523608	A/7_F/3	912	Gravina in Puglia
R13	609793	4523538	A/3_D/10	861	Gravina in Puglia
R14	609845	4523536	A/7	908	Gravina in Puglia
R15	609869	4523549	A/7	935	Gravina in Puglia
R16	609818	4523487	A/7	864	Gravina in Puglia
R17	609980	4523420	A/7	999	Gravina in Puglia
R18	609958	4523381	A/7	970	Gravina in Puglia
R19	609928	4523354	A/7_C/2	935	Gravina in Puglia
R20	609953	4523322	A/7	954	Gravina in Puglia
R21	609981	4523350	D/10	986	Gravina in Puglia
R22	612442	4522980	A/3_C/2	809	Gravina in Puglia
R23	613094	4522690	A/3_D/10	746	Gravina in Puglia
R24	613100	4522615	A/3_C/2_F/3	701	Gravina in Puglia
R25	613187	4522540	A/7_C/2_F/1	731	Gravina in Puglia
R26	613273	4522474	A/3	780	Gravina in Puglia
R27	613300	4522503	A/3	816	Gravina in Puglia
R28	613312	4522445	A/3	806	Gravina in Puglia



R29	613405	4522379	A/3	877	Gravina in Puglia
R30	613357	4521832	A/3_A/4_D/10	878	Gravina in Puglia
R31	613372	4521787	A/3_A/4_D/10	910	Gravina in Puglia
R32	614066	4521994	A/3_C/2	885	Gravina in Puglia
R33	614056	4521949	A/3_D/10	841	Gravina in Puglia
R34	614094	4521913	A/3_D/10	803	Gravina in Puglia
R35	611933	4520475	D/10	571	Gravina in Puglia
R36	613115	4519307	A/4	809	Gravina in Puglia
R37	613166	4519294	A/4	826	Gravina in Puglia
R38	613190	4519288	A/3_C/2_F/3	835	Gravina in Puglia
R39	610400	4522475	A/2_D/10	1561	Gravina in Puglia
R40	610427	4522481	A/2_D/10	1583	Gravina in Puglia
R41	610421	4522438	A/2_D/10	1597	Gravina in Puglia
R42	610552	4522696	A/7	1618	Gravina in Puglia
R43	610522	4522724	A/7	1581	Gravina in Puglia
R44	610598	4522686	A/4	1665	Gravina in Puglia
R45	610611	4522699	A/4	1674	Gravina in Puglia
R46	610569	4522694	A/7	1635	Gravina in Puglia
R47	610257	4522996	A/7_C/2	1262	Gravina in Puglia
R48	610239	4523003	A/7_C/2	1244	Gravina in Puglia
R49	610198	4523056	A/7_C/2	1196	Gravina in Puglia
R50	610118	4523095	A/7_C/2	1113	Gravina in Puglia
R51	610096	4523126	A/3	1089	Gravina in Puglia
R52	610153	4522865	A/3_C/2_F/1	1187	Gravina in Puglia
R53	610182	4522832	A/3_C/2_F/1	1225	Gravina in Puglia
R54	606465	4525085	A/2_D/10	1072	Gravina in Puglia
R55	606458	4525134	A/2_D/10	1096	Gravina in Puglia
R56	606471	4525157	A/2_D/10	1094	Gravina in Puglia
R57	606492	4525050	A/2_D/10	1035	Gravina in Puglia
R58	606493	4525092	A/2_D/10	1048	Gravina in Puglia
R59	609843	4523843	A/7_C/2	1064	Gravina in Puglia
R60	609788	4523848	A/7_C/2_F/1	1025	Gravina in Puglia
R61	609888	4523866	A/7_C/2	1114	Gravina in Puglia
R62	609964	4523886	A/7_F/3	1187	Gravina in Puglia
R63	609977	4523920	A/7_C/6_F/3	1217	Gravina in Puglia
R64	610013	4523925	A/7_C/6	1249	Gravina in Puglia
R65	610025	4523959	A/7_C/6_F/1	1279	Gravina in Puglia
R66	610061	4523963	A/7_F/3	1310	Gravina in Puglia
R67	610068	4524020	A/7	1350	Gravina in Puglia
R68	610027	4524040	A/3_C/2	1331	Gravina in Puglia
R69	609984	4524057	A/7_C/2	1310	Gravina in Puglia
R70	610059	4524002	A/7	1332	Gravina in Puglia
R71	609905	4524139	A/3	1311	Gravina in Puglia
R72	609834	4524102	A/7	1236	Gravina in Puglia
R73	609800	4524130	A/7	1234	Gravina in Puglia
R74	610232	4524121	A/7_C/2	1542	Gravina in Puglia
R75	610196	4524150	A/7_C/2	1531	Gravina in Puglia
R76	610175	4524143	A/7_C/2	1511	Gravina in Puglia
R77	610210	4524156	A/7_C/2	1546	Gravina in Puglia
R78	610224	4524133	A/7_C/2	1543	Gravina in Puglia
R79	610152	4524192	A/7_C/2	1525	Gravina in Puglia
R80	610169	4524200	A/7_C/2	1543	Gravina in Puglia
R81	610273	4524312	A/7_C/2	1695	Gravina in Puglia
R82	610238	4524331	A/4_D/10	1682	Gravina in Puglia
R83	610271	4524292	A/7_C/2	1680	Gravina in Puglia



R84	611217	4522988	A/3	1561	Gravina in Puglia
R85	610938	4522540	A/4	1540	Gravina in Puglia
R86	610920	4522537	A/7	1549	Gravina in Puglia
R87	613490	4523080	A/2_D/10	1302	Gravina in Puglia
R88	613512	4523110	A/2_D/10	1338	Gravina in Puglia
R89	613580	4523064	A/2_D/10	1358	Gravina in Puglia
R90	613405	4523038	A/7_C/2	1212	Gravina in Puglia
R91	613687	4522912	A/2_D/10_F/3	1353	Gravina in Puglia
R92	613691	4523007	A/2_D/10	1409	Gravina in Puglia
R93	613735	4523000	A/2_D/10	1441	Gravina in Puglia
R94	613757	4522980	A/2_D/10_F/3	1448	Gravina in Puglia
R95	613628	4523088	A/2_D/10	1410	Gravina in Puglia
R96	613611	4522855	A/7	1257	Gravina in Puglia
R97	613612	4523024	A/2_D/10	1357	Gravina in Puglia
R98	613783	4522933	A/2_D/10	1445	Gravina in Puglia
R99	613648	4523017	A/2_D/10	1381	Gravina in Puglia
R100	613631	4522993	A/4_D/10	1353	Gravina in Puglia
R101	613633	4523010	A/2_D/10	1364	Gravina in Puglia
R102	615082	4522058	A/3_C/2_F/3	1345	Gravina in Puglia
R103	615557	4521675	A/4	1539	Gravina in Puglia
R104	615473	4521758	A/2_C/2_F/1_F/3	1495	Gravina in Puglia
R105	615656	4521393	A/7	1556	Gravina in Puglia
R106	613570	4522256	A/3_D/10	1022	Gravina in Puglia
R107	613600	4522287	A/7_C/2	1054	Gravina in Puglia
R108	613584	4522236	A/3_D/10	1034	Gravina in Puglia
R109	613606	4522300	A/7_C/2	1062	Gravina in Puglia
R110	613640	4522177	A/3_A/4_C/2_D/10	1089	Gravina in Puglia
R111	613678	4522191	A/3_A/4_C/2_D/10	1128	Gravina in Puglia
R112	613728	4522218	A/3_C/2_F/3	1177	Gravina in Puglia
R113	613751	4522205	A/3_C/2_F/3	1157	Gravina in Puglia
R114	613707	4522141	A/3_A/4_C/2_D/10	1112	Gravina in Puglia
R115	613874	4522116	A/3_C/2_F/3	1037	Gravina in Puglia
R116	615492	4521802	A/2_C/2_F/1_F/3	1531	Gravina in Puglia
R117	615836	4521025	A/3_C/2_D/10_F/1	1712	Gravina in Puglia

La seguente tabella riporta le coordinate degli aerogeneratori previsti in progetto (D max 170 m, h Hub 115 m).

Tabella 2: coordinate aerogeneratori di progetto

WTG	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		D	hHub
	Est	Nord		
GIP1	605901	4523327	170	115
GIP2	606694	4522590	170	115
GIP3	607421	4522604	170	115
GIP4	608298	4522255	170	115
GIP5	607471	4524715	170	115
GIP6	608470	4523969	170	115
GIP7	609009	4523183	170	115
GIP8	611906	4521343	170	115
GIP9	612459	4520695	170	115
GIP10	613077	4520115	170	115
GIP11	612551	4522179	170	115



GIP12	614126	4521111	170	115
-------	--------	---------	-----	-----





4 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 (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 2300 h/a^{1,2}, quindi, i risultati del calcolo possono, ragionevolmente, essere abbattuti del 47.49 %, pari al complemento a 1 del rapporto $2300/4380 = 52.51$ %.

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 52.51 % 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 70.15%³ delle ore anno, ovvero 6145 ore; in altri termini, la probabilità che il rotore di un aerogeneratore risulti in rotazione è appunto dell'ordine del 70.15 % (pari appunto al rapporto 6145/8760).

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 $70.15 \% \times 52.51 \% = 36.83$ %, ovvero **63.17** %, 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., pag. 48.

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 72.30% di quelle annuali. Tenendo conto dei valori di disponibilità dell'impianto e della rete rispettivamente pari a 98% e 99%, l'assunzione del 70.15% sembra molto ragionevole.



5 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 0.6-0.75 Hz (corrispondenti a 12 - 15 rpm, circa un passaggio ogni 1.6-1.3 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.

Tabella 3: risultati del calcolo

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico" [ore/anno]	Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno		
R01	61	30.8	11.3	A/3_D/10
R02	47	23.3	8.6	A/3_D/10
R03	157	115.2	42.4	A/3_D/10
R04	176	125.3	46.2	A/3_D/10
R05	54	25.3	9.3	A/7
R06	119	63.9	23.5	A/3
R07	125	68.2	25.1	A/7_C/6
R08	114	57.0	21.0	A/7
R09	108	52.3	19.3	A/3_F/3
R10	151	72.0	26.5	A/7
R11	139	62.3	22.9	A/7_C/6
R12	141	60.4	22.2	A/7_F/3



R13	133	60.2	22.2	A/3_D/10
R14	122	52.4	19.3	A/7
R15	118	49.5	18.2	A/7
R16	125	56.1	20.7	A/7
R17	105	39.7	14.6	A/7
R18	109	42.4	15.6	A/7
R19	120	47.1	17.3	A/7_C/2
R20	123	46.3	17.1	A/7
R21	110	41.5	15.3	D/10
R22	0	0.0	0.0	A/3_C/2
R23	75	54.7	20.1	A/3_D/10
R24	102	84.4	31.1	A/3_C/2_F/3
R25	108	72.7	26.8	A/7_C/2_F/1
R26	76	51.5	19.0	A/3
R27	76	48.9	18.0	A/3
R28	71	45.9	16.9	A/3
R29	62	36.3	13.4	A/3
R30	187	102.7	37.8	A/3_A/4_D/10
R31	186	101.2	37.3	A/3_A/4_D/10
R32	38	12.2	4.5	A/3_C/2
R33	39	12.7	4.7	A/3_D/10
R34	39	12.1	4.5	A/3_D/10
R35	151	119.4	44.0	D/10
R36	0	0.0	0.0	A/4
R37	0	0.0	0.0	A/4
R38	0	0.0	0.0	A/3_C/2_F/3
R39	72	26.2	9.7	A/2_D/10
R40	74	26.8	9.9	A/2_D/10
R41	66	22.1	8.1	A/2_D/10
R42	44	11.8	4.3	A/7
R43	42	12.2	4.5	A/7
R44	41	10.9	4.0	A/4
R45	40	10.6	3.9	A/4
R46	42	11.5	4.2	A/7
R47	44	16.3	6.0	A/7_C/2
R48	45	16.8	6.2	A/7_C/2
R49	45	17.5	6.4	A/7_C/2
R50	48	20.2	7.4	A/7_C/2
R51	48	20.7	7.6	A/3
R52	55	22.5	8.3	A/3_C/2_F/1
R53	56	21.9	8.1	A/3_C/2_F/1
R54	54	24.5	9.0	A/2_D/10
R55	57	24.7	9.1	A/2_D/10
R56	58	25.8	9.5	A/2_D/10
R57	55	25.7	9.5	A/2_D/10
R58	56	26.2	9.7	A/2_D/10
R59	99	42.6	15.7	A/7_C/2
R60	90	35.5	13.1	A/7_C/2_F/1
R61	97	40.4	14.9	A/7_C/2
R62	99	41.0	15.1	A/7_F/3
R63	91	34.7	12.8	A/7_C/6_F/3
R64	92	36.1	13.3	A/7_C/6
R65	86	30.3	11.2	A/7_C/6_F/1
R66	89	32.2	11.9	A/7_F/3
R67	73	22.4	8.3	A/7



R68	57	14.1	5.2	A/3_C/2
R69	35	10.4	3.8	A/7_C/2
R70	77	24.8	9.1	A/7
R71	38	11.7	4.3	A/3
R72	40	13.1	4.8	A/7
R73	40	13.7	5.0	A/7
R74	35	11.0	4.1	A/7_C/2
R75	13	1.7	0.6	A/7_C/2
R76	9	0.8	0.3	A/7_C/2
R77	15	2.1	0.8	A/7_C/2
R78	30	8.0	2.9	A/7_C/2
R79	32	8.2	3.0	A/7_C/2
R80	0	0.0	0.0	A/7_C/2
R81	0	0.0	0.0	A/7_C/2
R82	0	0.0	0.0	A/4_D/10
R83	0	0.0	0.0	A/7_C/2
R84	65	18.9	7.0	A/3
R85	34	9.1	3.4	A/4
R86	32	8.9	3.3	A/7
R87	0	0.0	0.0	A/2_D/10
R88	0	0.0	0.0	A/2_D/10
R89	25	6.3	2.3	A/2_D/10
R90	0	0.0	0.0	A/7_C/2
R91	79	33.1	12.2	A/2_D/10_F/3
R92	60	25.0	9.2	A/2_D/10
R93	67	28.2	10.4	A/2_D/10
R94	73	29.9	11.0	A/2_D/10_F/3
R95	29	7.7	2.8	A/2_D/10
R96	84	36.9	13.6	A/7
R97	45	16.6	6.1	A/2_D/10
R98	84	24.3	9.0	A/2_D/10
R99	53	20.7	7.6	A/2_D/10
R100	56	23.3	8.6	A/4_D/10
R101	53	20.7	7.6	A/2_D/10
R102	0	0.0	0.0	A/3_C/2_F/3
R103	36	12.9	4.8	A/4
R104	42	14.9	5.5	A/2_C/2_F/1_F/3
R105	34	12.4	4.6	A/7
R106	52	26.3	9.7	A/3_D/10
R107	50	24.6	9.1	A/7_C/2
R108	52	25.7	9.5	A/3_D/10
R109	50	24.2	8.9	A/7_C/2
R110	49	23.6	8.7	A/3_A/4_C/2_D/10
R111	47	21.8	8.0	A/3_A/4_C/2_D/10
R112	46	19.9	7.3	A/3_C/2_F/3
R113	46	19.1	7.0	A/3_C/2_F/3
R114	47	21.2	7.8	A/3_A/4_C/2_D/10
R115	42	16.0	5.9	A/3_C/2_F/3
R116	42	14.9	5.5	A/2_C/2_F/1_F/3
R117	0	0.0	0.0	A/3_C/2_D/10_F/1

Nello specifico, la tabella precedente 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.

Dall'analisi della tabella si evince che, dei ricettori considerati nel buffer di 1700 m dagli aerogeneratori, solo cinque fabbricati, classificati come abitazione, risultano essere soggetti al fenomeno per un numero di ore superiore a 30 nel corso dell'anno. Inoltre, nessuna abitazione risulta soggetta ad una durata superiore a 30 minuti al giorno.

Il dettaglio dei fabbricati che potrebbero essere soggetti al fenomeno dello shadow flickering è riportato nella tavola grafica allegata alla presente relazione.

In linea generale, l'effetto si può considerare trascurabile per via della scarsa durata del fenomeno che si riduce, nel caso realistico, a poche ore l'anno.

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 sopra riportati possono essere ridotti di almeno un ulteriore 45.50 %, dal momento che le direzioni prevalenti del vento risultano essere: NO-SE (14.5% + 7.5%) e NNO-SSE (22.5% + 10%), per un totale del 54.50%. Alla luce di ciò, le ore del fenomeno subiscono un ulteriore abbattimento, che le porta ad essere circa il 20% di quelle calcolate dal modello WORST CASE.

Alla luce di ciò nessun ricettore continua ad essere soggetto al fenomeno dello shadow flickering per più di 30 ore all'anno.

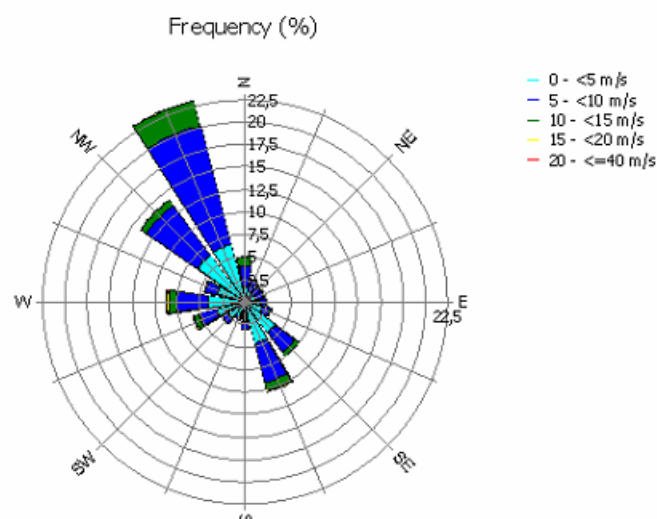


Figura 2: frequenza della direzione di provenienza del vento per la torre anemometrica di riferimento

A seguito di quanto descritto nelle sezioni precedenti si può concludere che, pur considerando una stima cautelativa in quanto non si è tenuto conto dell'eventuale presenza di ostacoli e/o vegetazione interposti tra il sole e i ricettori considerati, il fenomeno dello shadow flickering non si verifica per oltre 30 ore all'anno presso nessun ricettore sensibile.

Inoltre si rappresenta che si tratta di fenomeni:

- limitati nello spazio, in quanto relativi solo a due edifici molto prossimi;



- episodici durante l'anno e localizzati all'alba o al tramonto;
- di breve durata nel corso della giornata, in quanto ciascun edificio è interessato solo per un breve periodo;
- limitati come intensità, dal momento che la luce del sole, in condizioni di alba o tramonto, risulta di intensità modesta e, quindi, è modesta anche la variazione dovuta allo shadow flickering.

Va altresì sottolineato che:

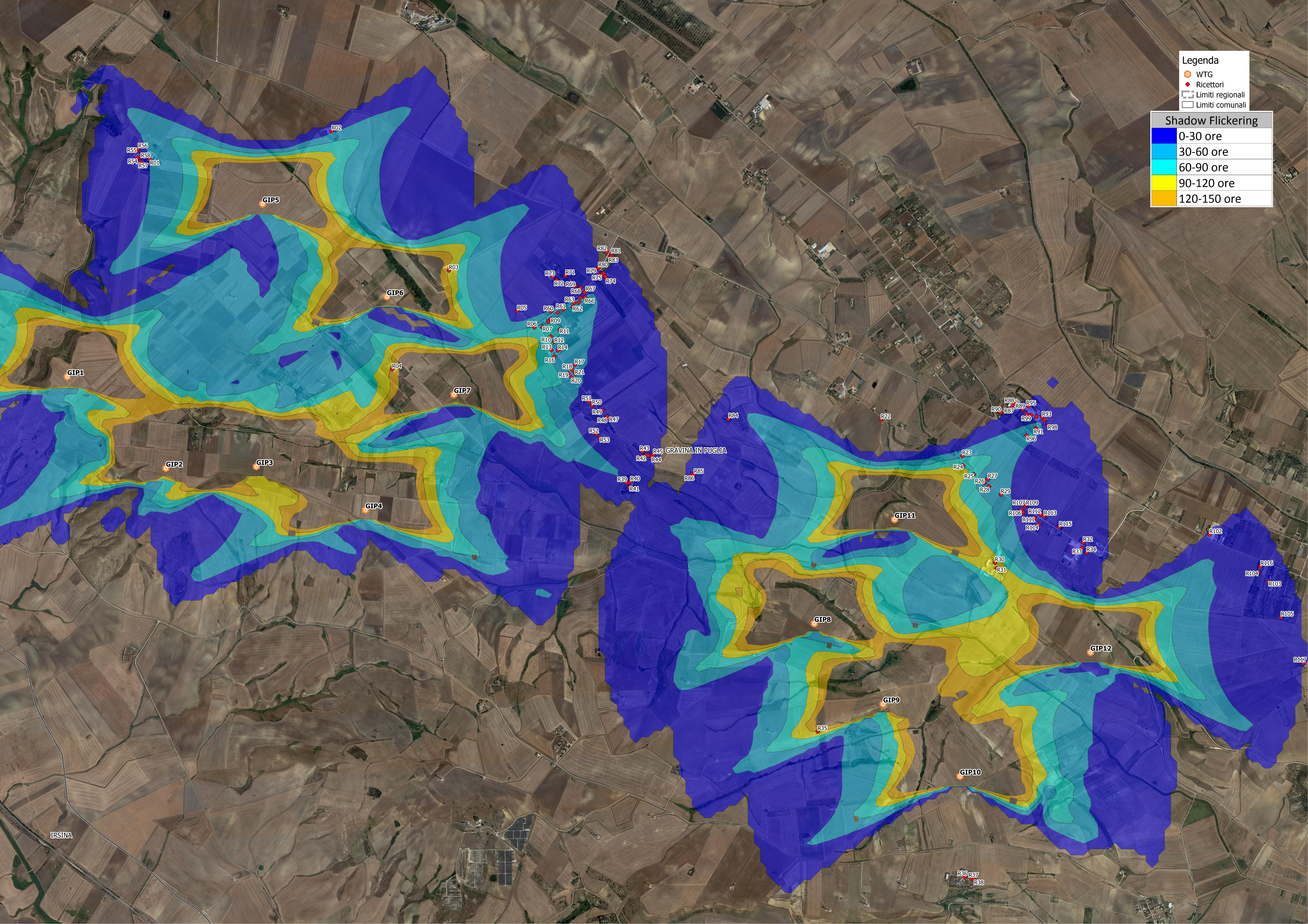
- la velocità di rotazione dell'aerogeneratore di progetto è dell'ordine di 10 rotazioni al minuto, quindi nettamente inferiore a 60 rpm, frequenza massima raccomandata al fine di ridurre al minimo i fastidi e soddisfare le condizioni di benessere;

Alla luce di quanto sopra esposto, al fine di ridurre e/o annullare completamente il fenomeno in oggetto e di eliminare completamente qualunque disturbo indotto sulle abitazioni interessate potrà essere prevista, di concerto con i proprietari dell'immobile, come intervento di mitigazione, la piantumazione di barriere sempreverdi (normali siepi di recinzione).

Le distanze reciproche tra generatori eolici e ricettori, le condizioni orografiche del sito considerato, determinano la pressoché totale assenza del fenomeno in esame. In aggiunta, il fenomeno si manifesta su un numero limitatissimo di ricettori esclusivamente quando il sole presenta un'altezza inferiore ai 15° sull'orizzonte, pertanto può ritenersi trascurabile, per l'elevata intensità della radiazione diffusa rispetto a quella diretta.

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 concomitanza dei seguenti fattori: assenza di nuvole o nebbia, rotore frontale ai ricettori, rotore in movimento continuo, assenza di ostacoli, luce diretta. Pertanto, si sottolinea che i risultati presentati rappresentano il caso peggiore in cui si verificano i fattori sopra esposti in concomitanza per cui è ragionevole ritenere che tale fenomeno possa essere difficilmente percepito nelle condizioni reali.

In allegato è riportata la mappa delle ore di ombreggiamento (shadow flickering) nel worst case così come elaborata dal modello impiegato.



- Legenda
- WTG
 - Ricettori
 - Limiti regionali
 - Limiti comunali

Shadow Flickering	
0-30 ore	Dark Blue
30-60 ore	Light Blue
60-90 ore	Cyan
90-120 ore	Yellow
120-150 ore	Orange

IRSTINA

GRAVINA IN PUGLIA

R117