

REGIONE CAMPANIA
PROVINCIA DI AVELLINO

COMUNE DI FRIGENTO
COMUNE DI GUARDIA LOMBARDI
COMUNE DI ROCCA SAN FELICE
COMUNE DI STURNO
COMUNE DI BISACCIA



AUTORIZZAZIONE UNICA
ex d.lgs. 387/2003

Costruzione ed esercizio di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato "Taverna del Principe" da realizzarsi nel comune di FRIGENTO (AV) e delle opere ed infrastrutture connesse da realizzarsi nei comuni di FRIGENTO (AV), GUARDIA LOMBARDI (AV), ROCCA SAN FELICE (AV), STURNO (AV) e BISACCIA (AV), avente potenza nominale pari a 39,6 MW

Titolo elaborato

Studio sugli effetti dello shadow flickering

Codice elaborato

COMMESSA	FASE	ELABORATO	REV.
F0474	A	R07	A

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Scala

—

Gennaio 2022	Prima emissione	FTR	GDS	GMA
DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

Proponente

Camelia Rinnovabili s.r.l.

Largo Augusto 3
20122 Milano



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)



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

La presente relazione ha l'obiettivo di illustrare il fenomeno dello "shadow flickering" e di valutare il suo effetto nell'area circostante determinato dalla realizzazione dell'impianto "Taverna del Principe", da realizzarsi nel territorio comunale di Frigento, in provincia di Avellino, da parte della società **Camelia Rinnovabili Srl**, con sede legale in Largo Augusto 3 20122 Milano, in qualità di proponente.

Il gruppo BayWa r.e. GmbH rappresenta un'azienda globale leader nel settore dell'energia rinnovabile che si occupa di sviluppo di progetti, fornitura di servizi, distribuzione di materiale ed erogazione di soluzioni energetiche. Ad oggi ha portato in rete più di 3.5 GW di energia a livello globale e gestisce oltre 8.5 GW di impianti. Collabora con imprese di tutto il mondo per ridurre il loro impatto ambientale e diminuire i loro costi energetici. BayWa r.e. è uno dei principali fornitori nel mercato della distribuzione di materiale per l'energia solare ed è il partner preferito da migliaia di installatori. In Germania, dispone di un'attività di trading di energia in rapida crescita e fornisce decine di migliaia di clienti. BayWa r.e. fa parte del Gruppo BayWa da 17.1 miliardi di € di fatturato. Da oltre 90 anni BayWa fornisce soluzioni leader nel mercato nei settori agricolo, energetico ed edile. BayWa r.e. Italia S.r.l. possiede aziende che sviluppano progetti, forniscono servizi di investimento e gestione per progetti di energia eolica e fotovoltaica efficaci e sostenibili. Le competenze del management, basate su più di 15 anni di esperienza nell'industria dell'energia eolica, comprendono l'identificazione, lo sviluppo di progetti, la gestione delle pratiche autorizzative, il finanziamento, l'approvvigionamento, la costruzione e la gestione di parchi eolici e fotovoltaici.

Il parco in oggetto sarà costituito da 6 aerogeneratori di potenza unitaria pari a 6.6 MW, per una potenza complessiva di 39.6 MW.

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 (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.

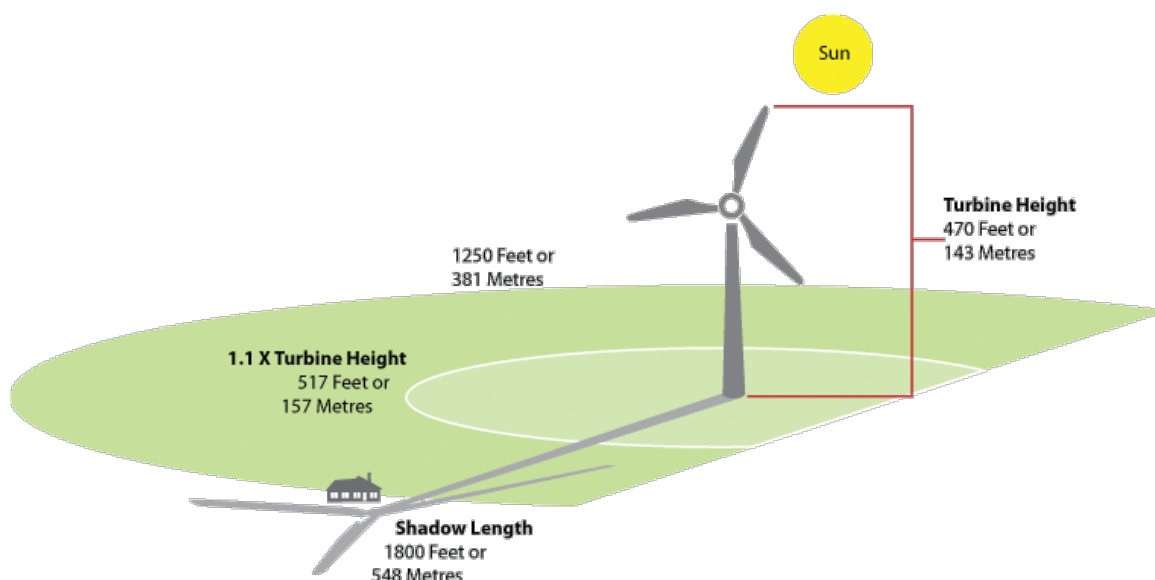


Figura 1: rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flicker

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:

- 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 finestrature 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 recettori potenzialmente sensibili presenti in un'areale 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 recettori individuati nel buffer sopra specificato.

Ricettori	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		Categoria Catastale	Comune
	Est	Nord		
R1	512485	4539931	A/3	Sturno
R2	512627	4539830	A/3	Sturno
R3	512639	4539831	A/4 - C/2	Sturno
R4	513406	4539747	A/4	Frigento
R5	513687	4539898	A/4	Frigento
R6	512547	4539393	A/3 - C/6	Sturno
R7	513442	4539074	A/4	Frigento
R8	513231	4538853	A/4	Frigento
R9	513598	4538859	A/4	Frigento
R10	513389	4536762	A/4 - C/2	Frigento
R11	513269	4536705	A/4	Frigento
R12	513281	4536679	A4-C2-F3	Frigento
R13	513363	4536566	A/2	RSFelice
R14	513391	4536514	A/4 - C/2	RSFelice
R15	513463	4536354	A/4 - C/2	RSFelice
R16	513866	4536396	A/4 - C/2	RSFelice



Ricettori	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		Categoria Catastale	Comune
	Est	Nord		
R17	514341	4536804	A/2 - C/6	RSFelice
R18	514279	4536909	A/4 - C/2	RSFelice
R19	512509	4540221	A/4	RSFelice
R20	512649	4540135	A/2	RSFelice
R21	512711	4540166	A/4 - C/2-6	RSFelice
R22	512508	4540035	A/4 - C/2-6	RSFelice
R23	512509	4539994	A/2	RSFelice
R24	512189	4539949	A/2	RSFelice
R25	512221	4539852	A/4	Sturno
R26	512280	4539748	A/3	Sturno
R27	512232	4539676	A/4	Sturno
R28	512146	4538073	A/3	Sturno
R29	512150	4538049	A/3 - C/2	Sturno
R30	512149	4537927	A/3	Sturno
R31	512105	4537822	A/3	Sturno
R32	514568	4536505	A/4	Sturno
R33	514519	4536584	D/10	Sturno
R34	514563	4536649	A/4	Sturno
R35	514568	4536669	A/3	Sturno
R36	514621	4536718	A/3 - C/6	Sturno
R37	514600	4536723	A/3-C/2	Sturno
R38	514605	4536729	A/2	Frigento
R39	512604	4540437	A/2	Frigento
R40	512249	4540251	A/4	Frigento
R41	511733	4540393	A/4	Frigento
R42	511679	4540369	A/4 - C/2	Rocca San Felice
R43	512091	4540052	A/2 - C/2	Rocca San Felice
R44	515171	4539896	A/4	Rocca San Felice
R45	515164	4539892	A/4 - C/6	Rocca San Felice
R46	515159	4539890	A/2 - C/2	Rocca San Felice
R47	515104	4539867	A/4 - C/2	Rocca San Felice
R48	511559	4539379	A/4 - C/2	Rocca San Felice
R49	511600	4539091	A/4	Sturno
R50	511550	4539070	A/4	Sturno
R51	511493	4539057	A/3	Sturno
R52	511472	4539078	A/4 - C/6	Sturno
R53	511451	4539073	A/4 - C/6	Sturno
R54	511557	4538969	A/4	Frigento
R55	511643	4538949	A/4	Frigento
R56	511572	4538920	A/4 - C/2	Frigento
R57	511563	4538890	A/4	Frigento



Ricettori	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		Categoria Catastale	Comune
	Est	Nord		
R58	511539	4538889	A/4	Frigento
R59	511994	4538167	A/4 - C/2	Frigento
R60	511566	4537881	A/2 - C/6	Frigento
R61	511644	4537777	A/4	Frigento
R62	511614	4537774	A/2 - C/6	Frigento
R63	511473	4537691	A/2 - C/2	Frigento
R64	511527	4537630	A/4	Frigento
R65	511576	4537724	A/4	Frigento
R66	511578	4537673	C/2 - A/2	Frigento
R67	511454	4537604	C/2 - A/2	Frigento
R68	511487	4537591	A/4	Frigento
R69	511617	4537548	A/4	Frigento
R70	512306	4536726	A/4 - C/2	Frigento
R71	512265	4536565	A/2-C1-2-3	Frigento
R72	512289	4536535	A/2	Frigento
R73	512326	4536541	A/4	Frigento
R74	512386	4536798	A/2-C/1-6	Frigento
R75	512698	4536571	A/4	Frigento
R76	512664	4536537	C/2 - A/2	Frigento
R77	512733	4536500	A/4	Frigento
R78	512227	4536312	C/2 - A/4	Frigento
R79	514462	4535727	C/2 - A/2	Frigento
R80	514796	4536497	A/4-C/2-6	Rocca San Felice
R81	514772	4536932	A/4 - C/6	Rocca San Felice
R82	514976	4536767	A/2 - C/2	Rocca San Felice
R83	514999	4536747	A/2	Rocca San Felice
R84	515013	4536772	A/4 - C/6	Rocca San Felice
R85	515010	4536798	A/4	Rocca San Felice
R86	514874	4537088	A/2 - C/2	Rocca San Felice
R87	514936	4537188	A/4-C/2-6	Rocca San Felice
R88	514887	4537190	A/4	Rocca San Felice
R89	514890	4537202	A/4	Rocca San Felice
R90	514846	4537176	A/4 - C/2	Rocca San Felice
R91	514899	4537249	D/10 - C/3	Guardia Lombardi
R92	514994	4537231	A/4	Guardia Lombardi
R93	515282	4537294	A/4	Guardia Lombardi
R94	515174	4537348	A/4	Guardia Lombardi
R95	515007	4537411	A/4	Guardia Lombardi
R96	515062	4537465	A/2 - C/2	Guardia Lombardi
R97	515183	4537397	A/4 - C/2	Guardia Lombardi
R98	515254	4537511	A/4	Guardia Lombardi



Ricettori	Coordinate UTM-WGS 84 fuso 33		Categoria Catastale	Comune
	Est	Nord		
R99	511380	4537653	A/4 - C/6	Guardia Lombardi
R100	511389	4537636	A/4 - C/6	Guardia Lombardi
R101	511414	4538936	A/2 - C/6	Guardia Lombardi
R102	511411	4538969	A/4 - C/2	Guardia Lombardi
R103	511423	4538883	A/4	Guardia Lombardi
R104	511336	4539664	A/4	Guardia Lombardi
R105	515330	4536339	A/4 - C/2-6	Guardia Lombardi
R106	515062	4537465	A/2 - C/2	Guardia Lombardi
R107	515183	4537397	A/2	Guardia Lombardi
R108	515254	4537511	A/4 - C/6	Guardia Lombardi
R109	511380	4537653	C/2 - A/4	Frigento
R110	511389	4537636	C/2 - A/4	Frigento
R111	511414	4538936	A/4	Frigento
R112	511411	4538969	A/4-C/6	Frigento
R113	511423	4538883	A/4-C/6	Frigento
R114	511336	4539664	A/4	Frigento
R115	515330	4536339	A/4	Guardia Lombardi

Tabella 1: ricettori considerati nella presente analisi

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-WGS84 fuso 33	
	Est	Nord
F01	513704.0	4539469.0
F02	513015.4	4539500.3
F03	513527.4	4538307.5
F04	513077.2	4537699.2
F05	513497.0	4537532.0
F06	513760.3	4536859.1

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 2400 h/a^{1, 2}, quindi, i risultati del calcolo possono, ragionevolmente, essere abbattuti del 49.77 %, 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 71.04%³ delle ore anno, ovvero 6223 ore; in altri termini, la probabilità che il rotore di un aerogeneratore risulti in rotazione è appunto dell'ordine del 71.04 % (pari appunto al rapporto 6223/8760).

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 $71.04\% \times 54.79\% = 38.92 \%$, ovvero **61.8 %**, 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 73.22% di quelle annuali. Tenendo conto dei valori di disponibilità dell'impianto e della rete rispettivamente pari a 98% e 99%, l'assunzione del 71.04% 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 0.55-0.75 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.

Tabella 3: risultati del calcolo

Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"	Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	
R1	153	104.8	16.8	A/3
R2	167	157.3	25.2	A/3
R3	167	164.9	26.5	A/4 - C/2
R4	166	335.9	53.9	A/4
R5	132	147.1	23.6	A/4
R6	186	169.8	27.2	A/3 - C/6
R7	0	0	0.0	A/4



Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"	Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	
R8	48	27.8	4.5	A/4
R9	0	0	0.0	A/4
R10	155	148.5	23.8	A/4 - C/2
R11	130	70.1	11.2	A/4
R12	117	58.4	9.4	A4-C2-F3
R13	0	0	0.0	A/2
R14	0	0	0.0	A/4 - C/2
R15	0	0	0.0	A/4 - C/2
R16	0	0	0.0	A/4 - C/2
R17	106	80.5	12.9	A/2 - C/6
R18	101	90.7	14.6	A/4 - C/2
R19	97	38.8	6.2	A/4
R20	103	45	7.2	A/2
R21	70	28.3	4.5	A/4 - C/2-6
R22	137	95.3	15.3	A/4 - C/2-6
R23	143	105.2	16.9	A/2
R24	78	45.5	7.3	A/2
R25	71	47.7	7.7	A/4
R26	67	53.6	8.6	A/3
R27	64	44.2	7.1	A/4
R28	87	28.9	4.6	A/3
R29	85	28.6	4.6	A/3 - C/2
R30	86	25.2	4.0	A/3
R31	57	17.6	2.8	A/3
R32	80	23.1	3.7	A/4
R33	104	46.7	7.5	D/10
R34	84	33.5	5.4	A/4
R35	78	31.5	5.1	A/3
R36	65	24.5	3.9	A/3 - C/6
R37	66	26.2	4.2	A/3-C/2
R38	66	25.9	4.2	A/2
R39	70	27.8	4.5	A/2
R40	118	54.7	8.8	A/4
R41	56	17.4	2.8	A/4
R42	49	14.5	2.3	A/4 - C/2
R43	60	30.2	4.8	A/2 - C/2
R44	36	12.8	2.1	A/4
R45	35	12.8	2.1	A/4 - C/6
R46	35	12.9	2.1	A/2 - C/2
R47	36	13.6	2.2	A/4 - C/2
R48	30	4.7	0.8	A/4 - C/2
R49	32	3.3	0.5	A/4



Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"	Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	
R50	26	1.5	0.2	A/4
R51	15	0.2	0.0	A/3
R52	11	0.1	0.0	A/4 - C/6
R53	0	0	0.0	A/4 - C/6
R54	24	0.8	0.1	A/4
R55	54	4.6	0.7	A/4
R56	32	0.9	0.1	A/4 - C/2
R57	29	0.5	0.1	A/4
R58	8	0	0.0	A/4
R59	70	18.8	3.0	A/4 - C/2
R60	19	1.1	0.2	A/2 - C/6
R61	16	0.7	0.1	A/4
R62	14	0.4	0.1	A/2 - C/6
R63	0	0	0.0	A/2 - C/2
R64	0	0	0.0	A/4
R65	0	0	0.0	A/4
R66	0	0	0.0	C/2 - A/2
R67	0	0	0.0	C/2 - A/2
R68	0	0	0.0	A/4
R69	0	0	0.0	A/4
R70	0	0	0.0	A/4 - C/2
R71	9	0.3	0.0	A/2-C1-2-3
R72	8	0.5	0.1	A/2
R73	4	0.2	0.0	A/4
R74	0	0	0.0	A/2-C/1-6
R75	31	4	0.6	A/4
R76	34	3.6	0.6	C/2 - A/2
R77	46	9.6	1.5	A/4
R78	16	1.6	0.3	C/2 - A/4
R79	0	0	0.0	C/2 - A/2
R80	72	18.9	3.0	A/4-C/2-6
R81	97	20.6	3.3	A/4 - C/6
R82	28	9.7	1.6	A/2 - C/2
R83	29	9.4	1.5	A/2
R84	28	9.1	1.5	A/4 - C/6
R85	29	9.4	1.5	A/4
R86	83	19	3.0	A/2 - C/2
R87	76	17.2	2.8	A/4-C/2-6
R88	78	18.7	3.0	A/4
R89	79	18.7	3.0	A/4
R90	84	20.7	3.3	A/4 - C/2
R91	77	18.9	3.0	D/10 - C/3



Ricettore	Worst case (caso peggiore)		Caso "realistico"	Categoria catastale
	giorni/anno	ore/anno	[ore/anno]	
R92	70	15.3	2.5	A/4
R93	22	6.3	1.0	A/4
R94	59	11.4	1.8	A/4
R95	74	18.1	2.9	A/4
R96	71	17.1	2.7	A/2 - C/2
R97	59	11.1	1.8	A/4 - C/2
R98	33	7.3	1.2	A/4
R99	0	0	0.0	A/4 - C/6
R100	0	0	0.0	A/4 - C/6
R101	0	0	0.0	A/2 - C/6
R102	0	0	0.0	A/4 - C/2
R103	0	0	0.0	A/4
R104	22	2.4	0.4	A/4
R105	30	2.3	0.4	A/4 - C/2-6
R106	0	0	0.0	A/2 - C/2
R107	0	0	0.0	A/2
R108	0	0	0.0	A/4 - C/6
R109	0	0	0.0	C/2 - A/4
R110	0	0	0.0	C/2 - A/4
R111	0	0	0.0	A/4
R112	0	0	0.0	A/4-C/6
R113	0	0	0.0	A/4-C/6
R114	0	0	0.0	A/4
R115	0	0	0.0	A/4

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 un fabbricato, 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 40.0 %, dal momento che le direzioni prevalenti del vento risultano essere: NNE-SSO. Alla luce di ciò, le ore del fenomeno subiscono un ulteriore abbattimento, che le porta ad essere circa il 16.04% di quelle calcolate dal modello nell'ipotesi WORST CASE.

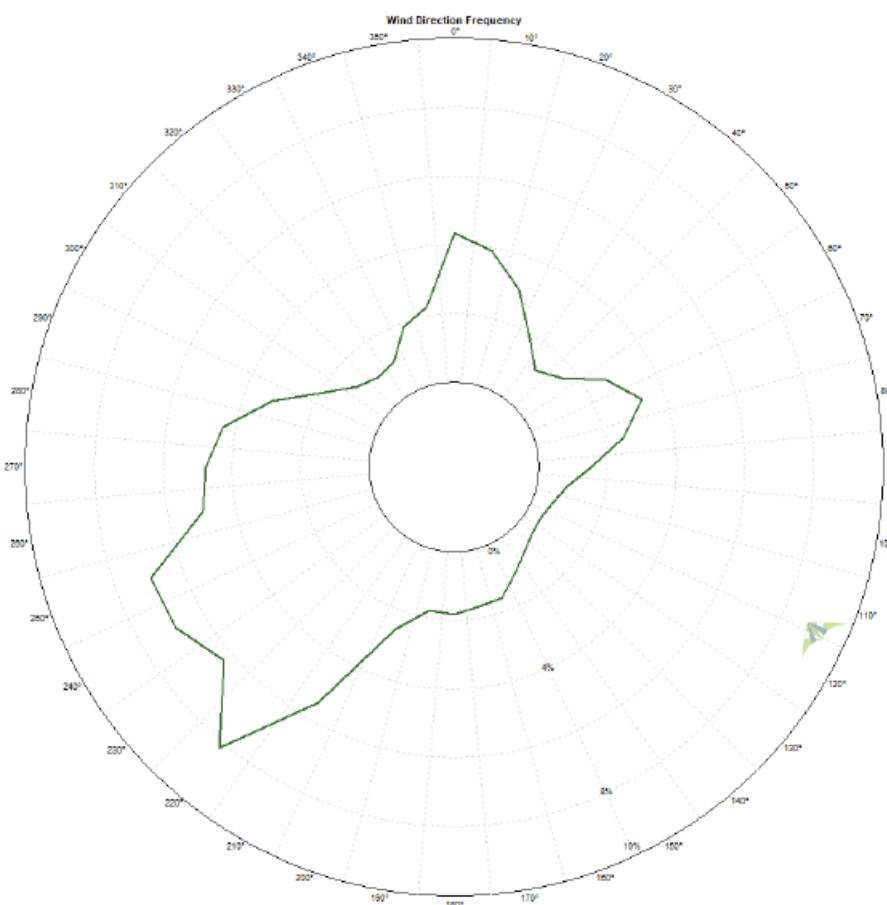


Figura 2: frequenza della direzione di provenienza del vento per la torre anemometrica di riferimento

Inoltre si rappresenta che si tratta di fenomeni:

- limitati nello spazio, in quanto relativi solo a tre 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 11 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.