



Regione Emilia - Romagna
Provincia di Forlì - Cesena
Comuni di Verghereto, Bagno di Romagna e Sarsina



Impianto Eolico denominato “Monte Comero” ubicato nel comune di Verghereto (FC) costituito da 6 (sei) aerogeneratori di potenza nominale 5 MW, per un totale di 30 MW, con relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Verghereto (FC), Bagno di Romagna (FC) e Sarsina (FC)

Titolo:

RELAZIONE DI SHADOW FLICKERING

Numero documento:

Commessa

2 2 4 3 0 9

Fase

D

Tipo doc.

R

Prog. doc.

0 3 9 7

Rev.

0 0

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

PROGETTO DEFINITIVO

Progettazione:



PROGETTO ENERGIA S.r.l.

Via Cardito, 202 | 83031 | Ariano Irpino (AV)
+39 0825 891313 | info@progettoenergia.biz
www.progettoenergia.biz



SERVIZI DI INGEGNERIA INTEGRATA

ISO 9001 14001 45001
REGISTERED
CO 3156

Progettista:

Ing. Massimo Lo Russo



Sul presente documento sussiste il DIRITTO di PROPRIETA'. Qualsiasi utilizzo non preventivamente autorizzato sarà perseguito ai sensi della normativa vigente

REVISIONI	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
	00	28.04.2025	EMISSIONE PER AUTORIZZAZIONE	C. ELIA	G. LO RUSSO	M. LO RUSSO

INDICE

1.	SCOPO	3
2.	CENNI SUL FENOMENO DELLO SHADOW FLICKERING	3
3.	CALCOLO DELLO SHADOW FLICKERING	5
3.1	CONFIGURAZIONE D'IMPIANTO	5
3.2	INDIVIDUAZIONE DEI RICETTORI	5
3.3	METODOLOGIA DI CALCOLO	7
3.4	RISULTATI.....	8
4.	CONCLUSIONI.....	15
5.	ALLEGATI.....	15

1. SCOPO

Scopo del presente documento è la valutazione dell'eventuale impatto generato dallo shadow-flickering (letteralmente ombreggiamento intermittente), finalizzata all'ottenimento dei permessi necessari alla costruzione ed all'esercizio dell'impianto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica, "Monte Comero", costituito da n° 6 aerogeneratori, per una potenza massima complessiva di 30 MW, nel comune di Verghereto (FC), e relative opere di connessione ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Verghereto (FC), Bagno di Romagna (FC) e Sarsina (FC), collegato alla Rete di A.T. di E-Distribuzione (C.P. Quarto di Sarsina) con uno stallo a 132 kV, ubicata nel comune di Sarsina.

Il tipo di aerogeneratore previsto per l'impianto in oggetto (aerogeneratore di progetto) è ad asse orizzontale con rotore tripala e una potenza massima di 5,0 MW, avente le caratteristiche principali di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro pari a 166 m, posto sopravvento alla torre di sostegno, costituito da 3 pale generalmente in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro e da mozzo rigido in acciaio;
- navicella in carpenteria metallica con carenatura in vetroresina e lamiera, in cui sono collocati il generatore elettrico, il moltiplicatore di giri, il convertitore elettronico di potenza, il trasformatore BT/MT e le apparecchiature idrauliche ed elettriche di comando e controllo;
- torre di sostegno tubolare troncoconica in acciaio;
- altezza complessiva fuori terra dell'aerogeneratore pari a 200,00 m;
- area spazzata: 21.643 m².

Nello specifico, il modello di aerogeneratore considerato è il seguente:

- MySe 5.0-166.

2. CENNI SUL FENOMENO DELLO SHADOW FLICKERING

Lo shadow-flickering (letteralmente ombreggiamento intermittente) è l'espressione comunemente impiegata per descrivere una variazione 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 tale fenomeno è generato dalla proiezione, al suolo o su un ricevitore (abitazione), dell'ombra prodotta dalle pale in rotazione degli aerogeneratori allorquando il sole si trova alle loro spalle (cfr. figura successiva).

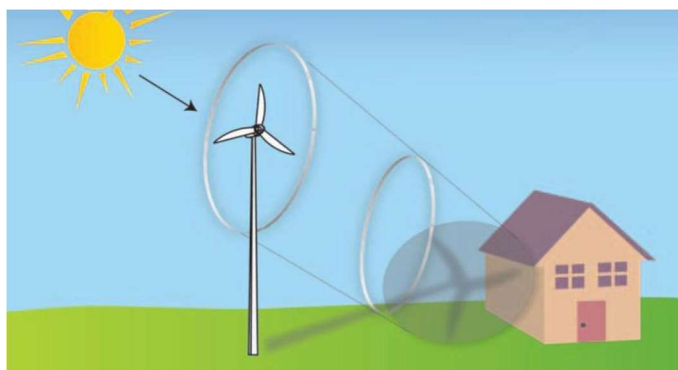


Figura 1 - Rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flicker

Il fenomeno, dal punto di vista di un potenziale ricevitore, 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 Westra1984), 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 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. Inoltre, i generatori di grande potenza (dal MW in su) raramente superano la velocità di rotazione di 20 giri al minuto, corrispondente a frequenze di passaggio delle pale ampiamente minori di quelle ritenute fastidiose per la maggioranza degli individui.

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 l'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 ed il, 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÷15 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 300-400 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 risulta 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 m dall'aerogeneratore e le zone a maggiore impatto ricadono entro i 300 - 400 m di distanza dalle macchine; 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.

3. CALCOLO DELLO SHADOW FLICKERING

3.1 CONFIGURAZIONE D'IMPIANTO

Il Progetto prevede l'installazione di n. 6 aerogeneratori per una potenza massima di 30 MW. La disposizione prevista per le turbine è riportata nella tabella 1.

Aerogeneratore	UTM - WGS84 – FUSO 33		Altitudine [m]
	Long. E [m]	Lat. N [m]	
WTG 01	262.276,0	4.855.173,0	1.179,00
WTG 02	261.721,0	4.855.363,0	1.160,00
WTG 03	261.225,0	4.855.621,0	1.148,70
WTG 04	262.024,0	4.854.547,0	1.197,50
WTG 05	262.299,0	4.854.070,0	1.179,50
WTG 06	262.756,0	4.853.773,0	1.170,50

Tabella 1: Coordinate UTM - WGS84 – fuso 33 degli aerogeneratori

La tabella 2 riporta la scheda riassuntiva delle principali caratteristiche della turbina tipo MySe 5.0-166.

Potenza nominale	5.000 kW
Velocità di accensione:	3 m / s
Velocità nominale del vento	11 m / s
Velocità di spegnimento:	25 m / s
ROTORE	
Diametro del rotore	166 m
Area spazzata	21.643 m ²
Numero pale	3
TORRE	
Altezza del mozzo	117 m

Tabella 2: Estratto delle specifiche tecniche turbina MySe 5.0-166

3.2 INDIVIDUAZIONE DEI RICETTORI

Ai fini della previsione degli impatti indotti sulle abitazioni dall'impianto eolico in progetto sono stati individuati i ricettori presenti nei pressi degli aerogeneratori.

Nella presente valutazione si è posto come discriminante di abitabilità dei ricettori la relativa categoria catastale compatibile con la presenza di persone per lunghi periodi e la condizione di edificio finito ovvero non diruto e/o incompleto anche senza viabilità di accesso. Alcuni fabbricati individuati nell'area sono edifici abbandonati in pessime condizioni, per lo più diruti o semidiruti, altri sono depositi connessi ad attività agricole utilizzati come ricovero per mezzi e materiali, questi fabbricati non verranno considerati nello studio che segue, in quanto la presenza di persone è solo saltuaria e per brevi periodi; inoltre, non vi sono ricettori di classe I, oggetto di particolare tutela (scuole, ospedali, case di cura e di riposo, ecc.).

Sebbene il fenomeno possa essere percepito anche all'esterno, esso risulta evidente e fastidioso in quegli ambienti con finestrature che si trovano sul prolungamento della direttrice sole-turbina, per questo motivo, si è considerato nella simulazione la presenza di finestre di altezza 1 metro e larghezza 1 metro posizionate ad altezza dal suolo di 2 metri e disposte su tutte le facciate degli edifici.

Pertanto, di seguito sono riportati i riferimenti geografici dei soli fabbricati oggetto di studio e l'orientamento delle finestre ipotizzate:

RICETTORI							Numero finestre e orientamento
Ricettore	Comune	Foglio	Particella	Destinazione d'uso	UTM - WGS84		
					Long. E [m]	Lat. N [m]	
1	VERGHERETO (FC)	42	60 - 332	A03 - F02	260646,1	4855824,8	4 (82° , 172° , 262° , 352°)
2	VERGHERETO (FC)	44	1	A02 - E07	262740,4	4855940,6	4 (47° , 137° , 227° , 317°)
3A	VERGHERETO (FC)	44	2	D10	262790,0	4855971,9	4 (4° , 94° , 184° , 274°)
3B				A3	262798,1	4855934,8	4 (5° , 95° , 185° , 275°)
4	VERGHERETO (FC)	44	106	D10	262781,1	4855911,8	4 (29° , 119° , 209° , 299°)
5	VERGHERETO (FC)	41	140	A03 - D10 - C06 - C02	260083,7	4855563,4	4 (43° , 133° , 223° , 313°)
6	VERGHERETO (FC)	41	135	D10	260095,4	4855481,0	4 (35° , 125° , 215° , 305°)
7A	VERGHERETO (FC)	41	134	A03	260062,4	4855386,6	4 (53° , 143° , 233° , 323°)
7B				D10	260090,6	4855385,7	4 (56° , 146° , 236° , 326°)
8	VERGHERETO (FC)	41	86	A03 – C06	260101,0	4855335,0	4 (26° , 116° , 206° , 296°)
9	VERGHERETO (FC)	41	132	D10	260131,2	4855324,9	4 (31° , 121° , 211° , 301°)
10	VERGHERETO (FC)	42	324	C02	261080,7	4855435,1	4 (54° , 144° , 234° , 324°)
11A	VERGHERETO (FC)	42	331	F02	261175,6	4855221,6	4 (78° , 168° , 258° , 348°)
11B					261207,9	4855194,5	4 (64° , 154° , 244° , 334°)
12A	VERGHERETO (FC)	52	28	A04	260571,1	4854913,0	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
12B				D01 - C06	260590,2	4854892,8	4 (88° , 178° , 268° , 358°)
13	VERGHERETO (FC)	53	128	C06	261967,0	4854933,0	4 (35° , 125° , 215° , 305°)
14	VERGHERETO (FC)	53	132	F02	261879,2	4854694,7	4 (75° , 165° , 255° , 345°)
15A	VERGHERETO (FC)	44	104	A03	262862,4	4854824,4	4 (28° , 118° , 208° , 298°)
15B				D10	262838,0	4854801,8	4 (23° , 113° , 203° , 293°)
16	VERGHERETO (FC)	44	103	D10	262848,1	4854764,1	4 (12° , 102° , 192° , 282°)
17	VERGHERETO (FC)	44	94	D10	262880,2	4854765,8	4 (22° , 112° , 202° , 292°)
18	VERGHERETO (FC)	45	126	C02	263229,3	4855011,3	4 (77° , 167° , 257° , 347°)
19	VERGHERETO (FC)	45	109	D02	263330,6	4854873,5	4 (5° , 95° , 185° , 275°)
20	VERGHERETO (FC)	45	127	E09	263383,2	4854903,1	4 (2° , 92° , 182° , 272°)
21	VERGHERETO (FC)	54	135	C06 - A04	262690,8	4854555,8	4 (78° , 168° , 258° , 348°)
22	VERGHERETO (FC)	54	137	C06 - A04	263162,6	4854297,7	4 (4° , 94° , 184° , 274°)
23	VERGHERETO (FC)	54	136	C06 - A03	263203,6	4854216,3	4 (16° , 106° , 196° , 286°)
24	VERGHERETO (FC)	45	124	F02	263415,3	4854290,2	4 (83° , 173° , 263° , 353°)
25	VERGHERETO (FC)	54	141	A03	262510,8	4853759,9	4 (70° , 160° , 250° , 340°)
26	VERGHERETO (FC)	70	135	C06 - A03	263142,8	4852965,3	4 (49° , 139° , 229° , 319°)

Tabella 3: Coordinate UTM - WGS84 – fuso 33 puntuali dei ricettori

3.3 METODOLOGIA 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 per la progettazione di impianti eolici contengono moduli specifici per il calcolo e l'analisi del fenomeno di flickering.

L'analisi si basa 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.

Nello specifico è stato impiegato il modulo shadow flickering del software WindFarm (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 della turbina o dell'altezza complessiva del generatore eolico.

Nello specifico, nel caso in esame, per quanto concerne le simulazioni effettuate, si è assunta una distanza massima di influenza del fenomeno in esame pari a circa 8 volte l'altezza dell'aerogeneratore di progetto ed un angolo minimo di altezza del sole sull'orizzonte pari a 2°. 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.

Il software utilizza una serie di dati di input caratterizzanti quali:

- l'altimetria della zona simulata;
- la disposizione geografica delle turbine e dimensione geometrica dei loro componenti (torre e pale);
- la disposizione geografica dei "ricettori sensibili" (abitazioni e relative finestre);
- la latitudine e longitudine dell'area interessata.

Sulla base di questi dati il software calcola il numero di ore annue di esposizione allo shadow flickering per ciascun nodo del grigliato che copre l'intera area, nonché il numero di ore di esposizione per gli ambienti abitativi attraverso le finestre.

Per l'esecuzione della simulazione sono stati fissati i seguenti parametri:

- coordinate baricentriche (UTM-WGS84-FUSO 33): 261990E, 4854697N
- coordinate UTM-WGS84-FUSO 33 delle turbine considerate (vedi tabella 1)
- coordinate UTM-WGS84-FUSO 33 dei ricettori considerati e disposizione delle finestre (vedi tabella 3)
- raggio d'influenza massimo: 1,5 km dal punto di installazione dell'aerogeneratore
- altezza del punto di vista dell'osservatore: 2 m
- parametri turbina tipo MySe 5.0-166:
 - diametro rotore: 166 m,
 - altezza torre: 200 m,
 - larghezza media della pala: 3 m

Il calcolo viene effettuato dal software nella condizione più sfavorevole possibile (caso peggiore), in quanto si considera che:

- il sole splenda per tutta la giornata, dall'alba al tramonto (cioè si è sempre in assenza di copertura nuvolosa);
- il piano di rotazione delle pale sia sempre perpendicolare alla direttrice sole-aerogeneratore (l'aerogeneratore "insegue" il sole);

- gli aerogeneratori siano sempre operativi;
- non siano presenti alberi o altri ostacoli che, intercettando l'ombra degli aerogeneratori, riducano o annullino il fastidio del 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 (WORST CASE), corrispondente alle ore in cui il sole permane al di sopra dell'orizzonte nell'arco dell'anno (ore di luce, circa 4465h/a), indipendentemente dalla presenza o meno di nubi, le quali inficerebbero il fenomeno stesso dello shadow flickering per l'impossibilità che si generino ombre.

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. Per l'area in esame tale valore corrisponde a circa 2040 h/a come riscontrato presso la *Stazione meteorologica di Bologna Borgo Panigale* e verificato (*Riferimento Pinna M. (1985). L'eliofania in Italia. Mem. Soc. Geogr. It., e Lavagnini A., Martorelli S., Coretti C. (1987). Radiazione solare in Italia. Mappe mensili della radiazione globale giornaliera. Roma, CNR, Ist. Fis. Atm.,*), quindi, i risultati del calcolo possono, ragionevolmente, essere abbattuti del 54,3, pari al complemento a 1 del rapporto $2040/4465 = 45,7 \%$.

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 45,7 % 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 l'impianto in esame le ore macchina si stimano all'incirca pari all'85% delle ore anno, ovvero 7446 ore, quindi la probabilità che il rotore di un aerogeneratore risulti in movimento è appunto dell'ordine dell'85 % (pari al rapporto $7446/8760$).

In definitiva, i valori calcolati dal modello numerico (ore di ombreggiamento intermittente all'anno) possono, realisticamente, essere ridotti di un fattore pari al complemento a 1 del prodotto $85 \% \times 45,7 \% = 38,8 \%$, ovvero del 61,2 %, corrispondente alla probabilità composta di avere contemporaneamente l'occorrenza di rotore in moto (vento) e sole libero da nubi (ombre), fenomeni, questi ultimi, stocasticamente indipendenti per cui la probabilità composta risulta pari al prodotto delle singole probabilità.

3.4 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 tiene 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);
- 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 nelle seguenti figure.

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 $0,7 \div 1,5$ Hz (circa un passaggio al secondo). 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.

Le distanze reciproche tra generatori eolici e ricettori, le condizioni orografiche del sito considerato, determinano la pressoché totale assenza del fenomeno in esame. 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 ecc.

Si riporta di seguito Mappa d'impatto potenziale shadow flickering per singolo aerogeneratore, nel caso più penalizzante (WORST CASE):

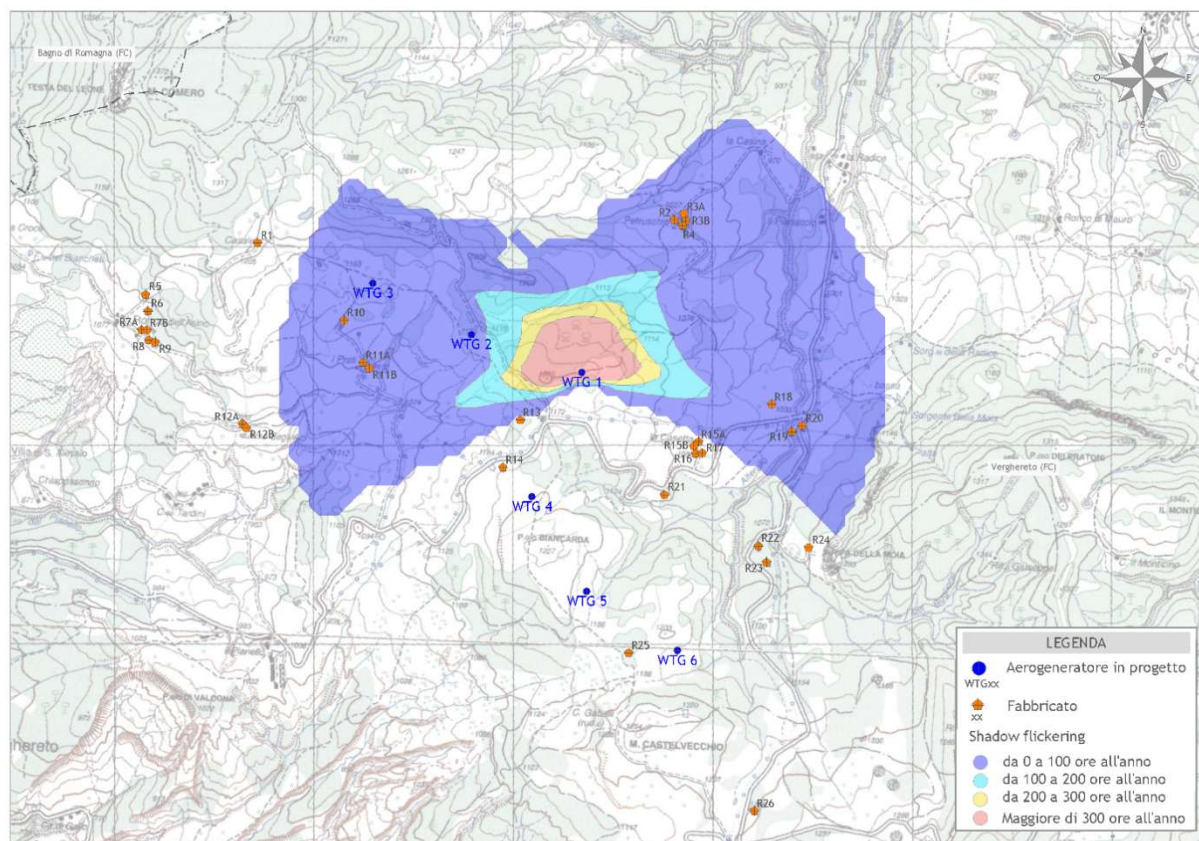


Figura 2 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 1

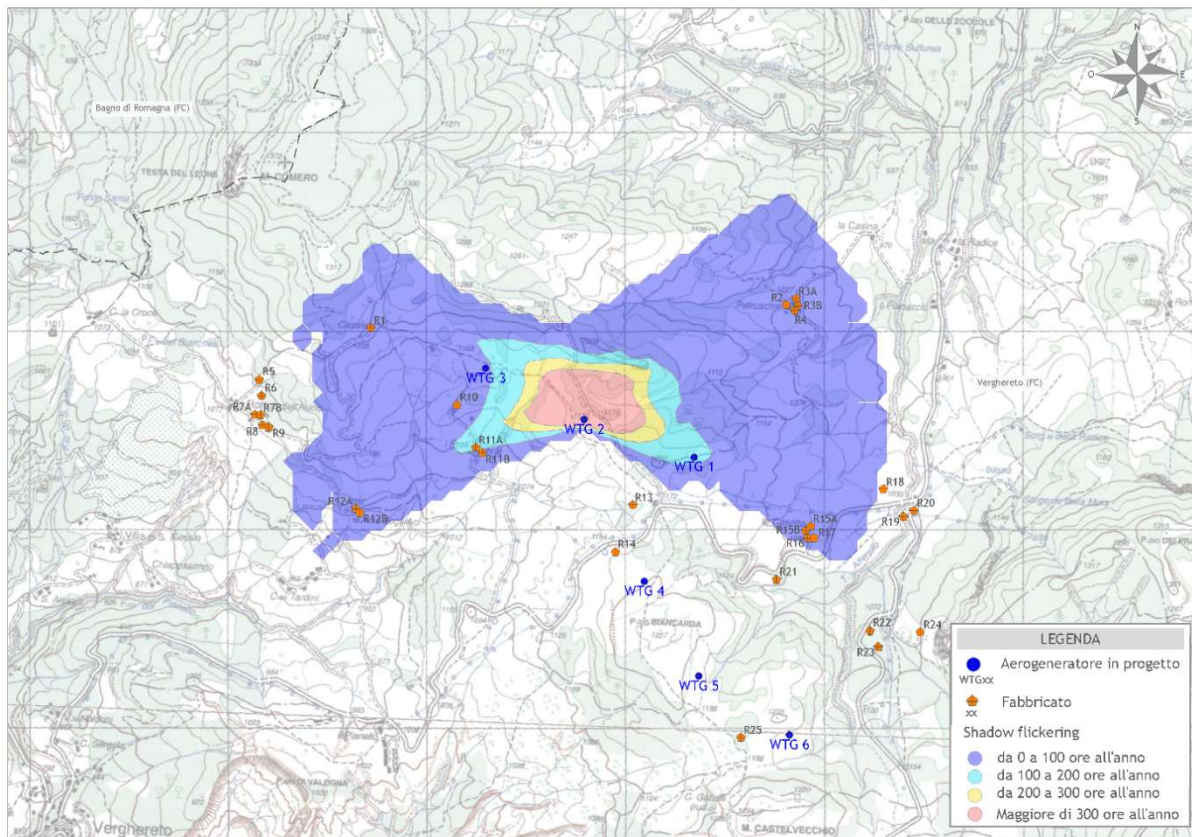


Figura 3 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 2

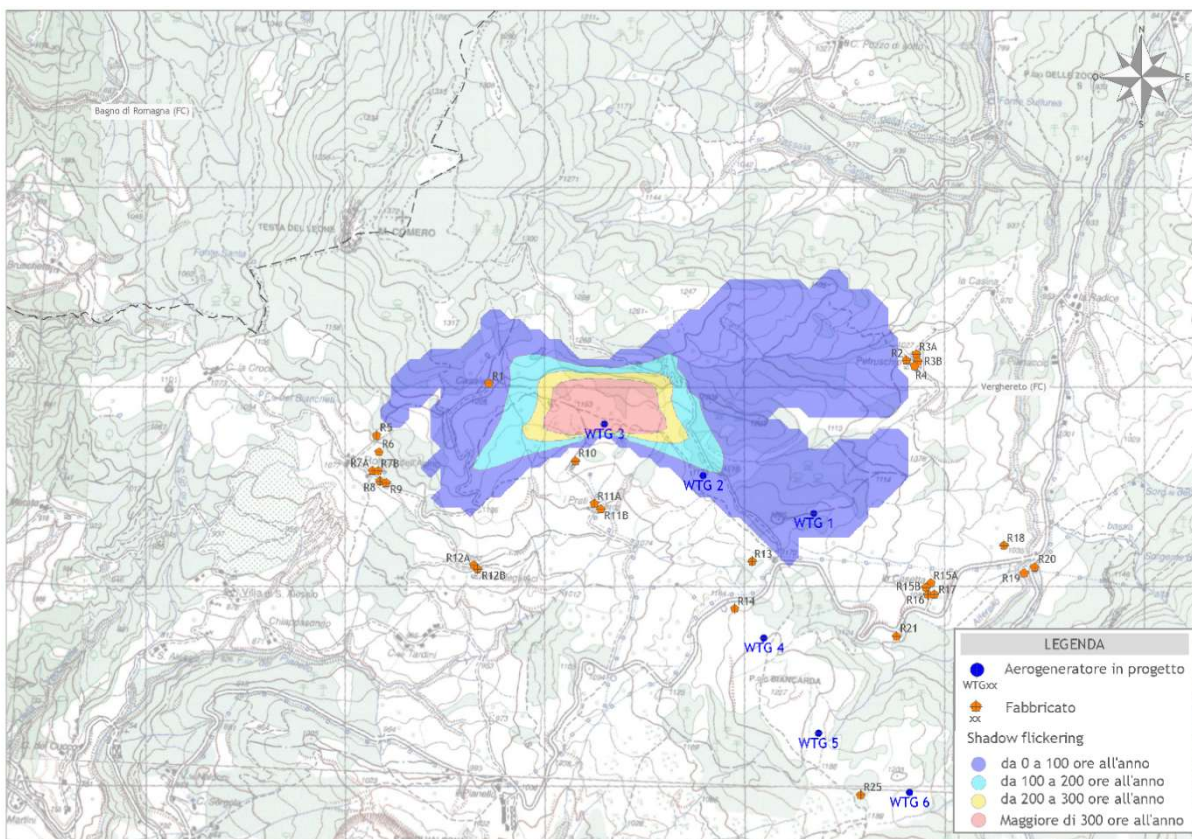


Figura 4 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 3

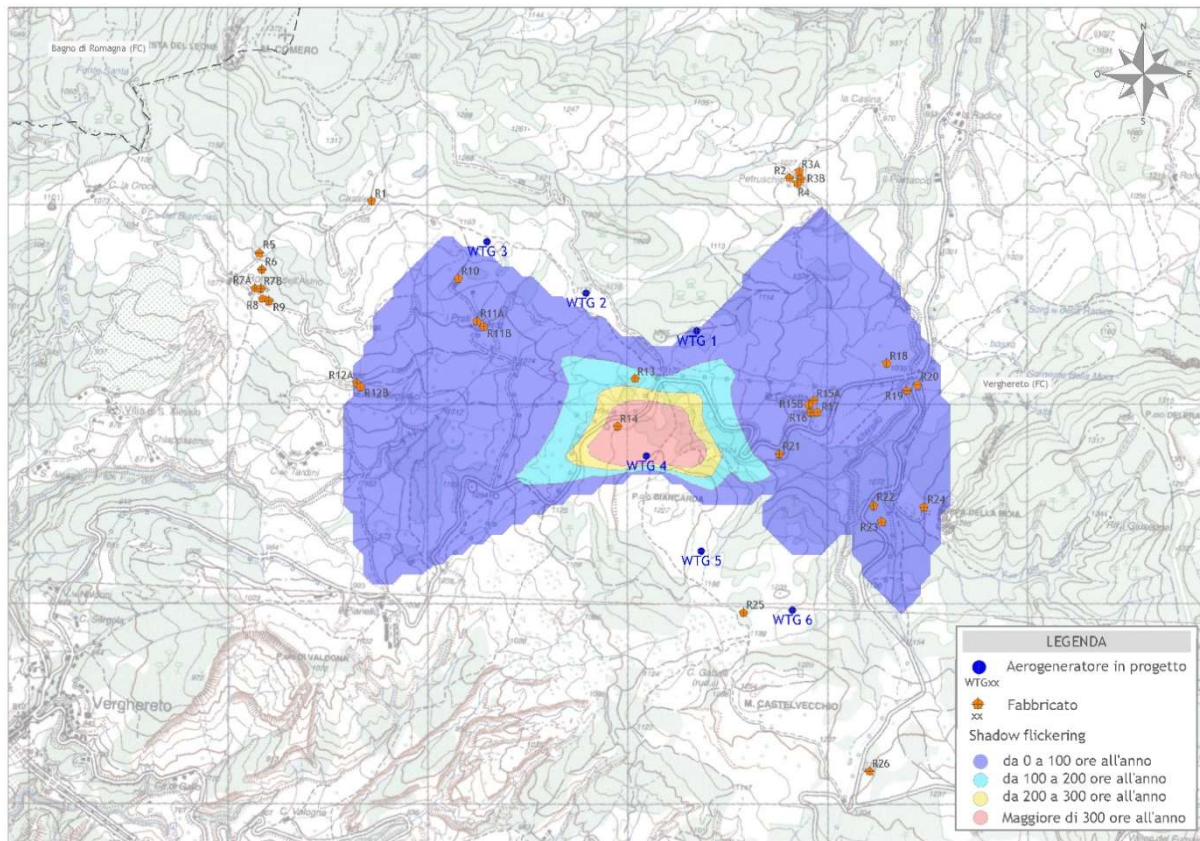


Figura 5 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 4

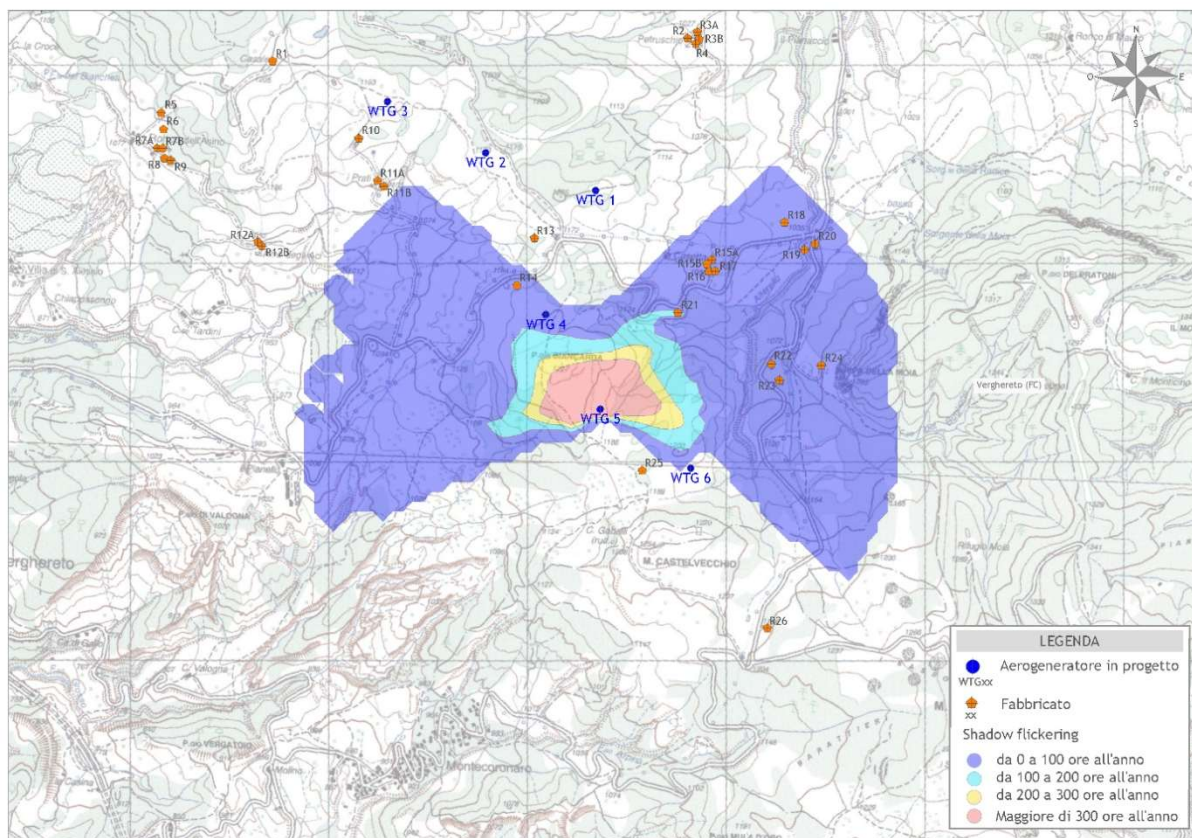


Figura 6 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 5

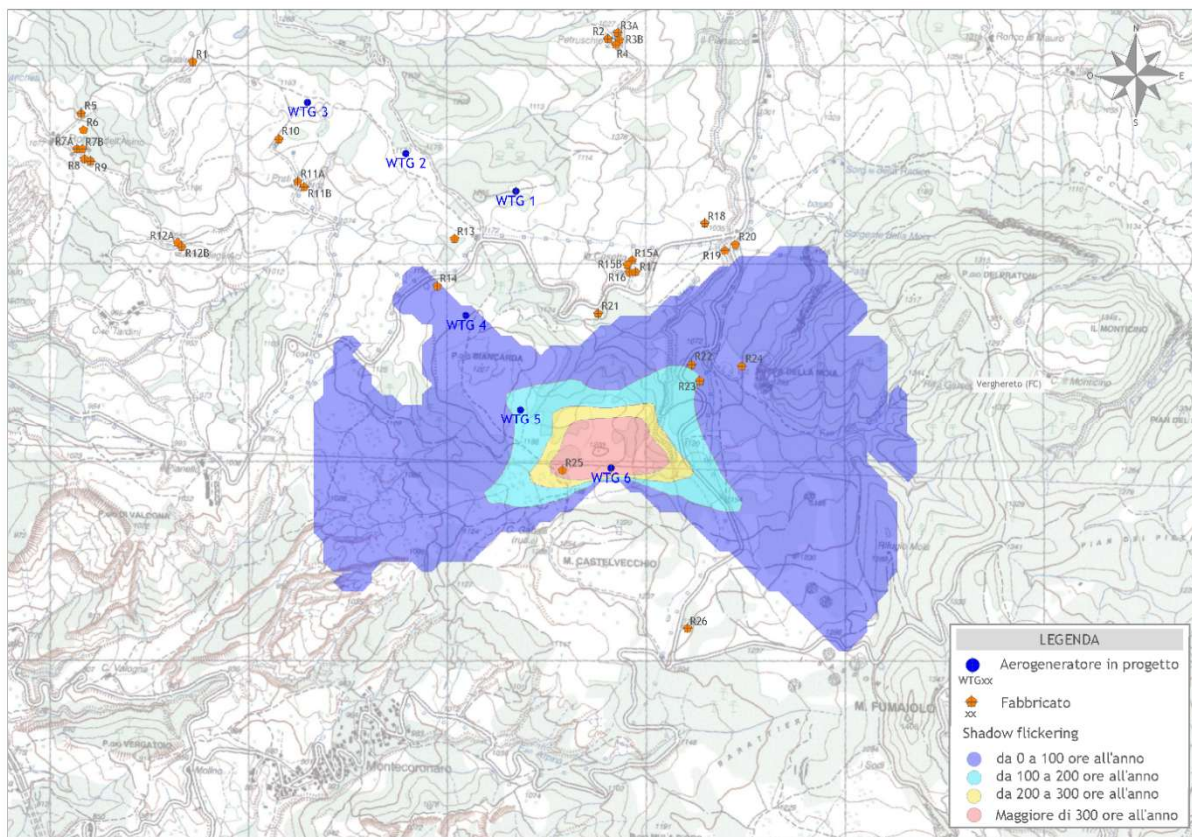


Figura 7 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 6

La tabella seguente riassume i risultati dell'analisi eseguita secondo la metodologia di calcolo innanzi descritta, e per quanto precisato al punto 3.2 la stessa si riferisce ai soli fabbricati potenzialmente abitabili, per come riscontrati dal sopralluogo in sito, di seguito riportato:

Fabbricato	WGS84 – UTM fuso 33		Caso peggiore		Caso reale
	Est	Nord	Giorni Anno	Ore Anno	Ore Anno
1	260646	4855825	95	65	25
2	262740	4855941	105	59	23
3B	262798	4855935	114	65	25
5	260084	4855563	0	0	0
7A	260062	4855387	0	0	0
8	260101	4855335	0	0	0
12A	260571	4854913	117	55	21
15A	262862	4854824	183	96	37
22	263163	4854298	222	153	59
23	263204	4854216	253	160	62
26	263143	4852965	0	0	0

Tabella 4: Risultati di calcolo

In particolare in tabella 4 vengono riportati il numero di giorni e di ore in cui è fisicamente possibile che il fenomeno si presenti (caso peggiore) e il valore reale atteso di ore all'anno in cui il fenomeno potrebbe presentarsi (caso reale). A tal proposito è importante sottolineare che anche il caso reale, calcolato tenendo conto dell'eliofanìa locale e delle ore di funzionamento dell'impianto, è comunque un valore cautelativo in quanto nella stima non si è tenuto conto degli effetti mitigativi dovuti al piano di rotazione delle

pale non sempre ortogonale alla direttrice sole-finestra e all'eventuale presenza di ostacoli e/o vegetazione interposti tra il sole e la finestra.

Dalla tabella 4, si evince che presso sette potenziali ricettori potrebbe verificarsi l'effetto di shadow flickering, tuttavia tale effetto si può considerare trascurabile per via della scarsa durata del fenomeno, che si riduce nel caso reale a poche ore l'anno. Per i tre fabbricati evidenziati, presso i quali l'effetto di shadow flickering potrebbe essere superiore a 30 ore l'anno, è stato elaborato un calendario dell'ombra che riporta in maniera grafica i periodi dell'anno in cui è possibile il verificarsi del fenomeno (condizioni del caso peggiore). Le curve di colore blu indicano l'ora dell'alba e del tramonto e le macchie colorate indicano il periodo in cui è possibile il verificarsi del fenomeno. Sull'asse delle ascisse sono riportati i giorni dell'anno e sull'asse delle ordinate l'ora del giorno.

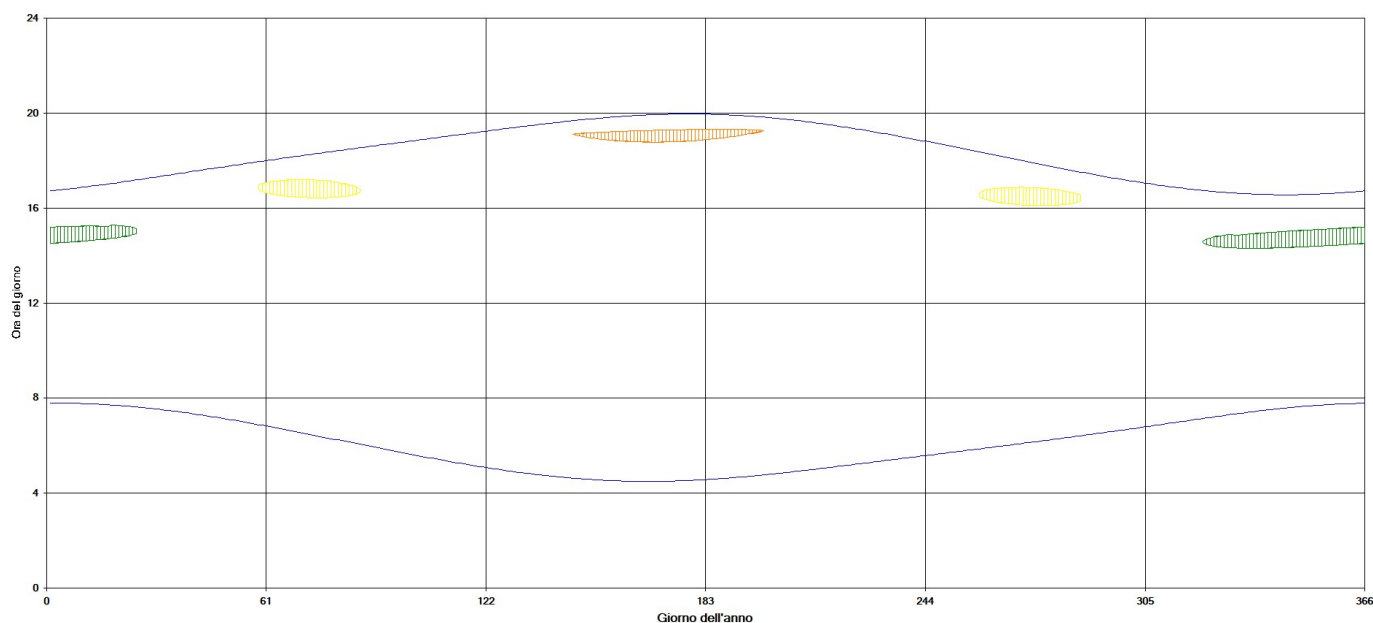


Figura 8 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 15 A

Dalla lettura del calendario in figura 8, si legge facilmente che, presso il fabbricato 15 A, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 2 dal 25 maggio al 17 luglio tra le ore 18:45 e le 19:20 (macchia arancione);
- WTG 4 dal 28 febbraio al 27 marzo e dal 15 settembre al 13 ottobre tra le ore 16:05 e le 17:15 (macchia gialla);
- WTG 5 dal 1° gennaio al 15 gennaio e dal 16 novembre al 31 dicembre tra le ore 14:20 e le 15:20 (macchia verde).

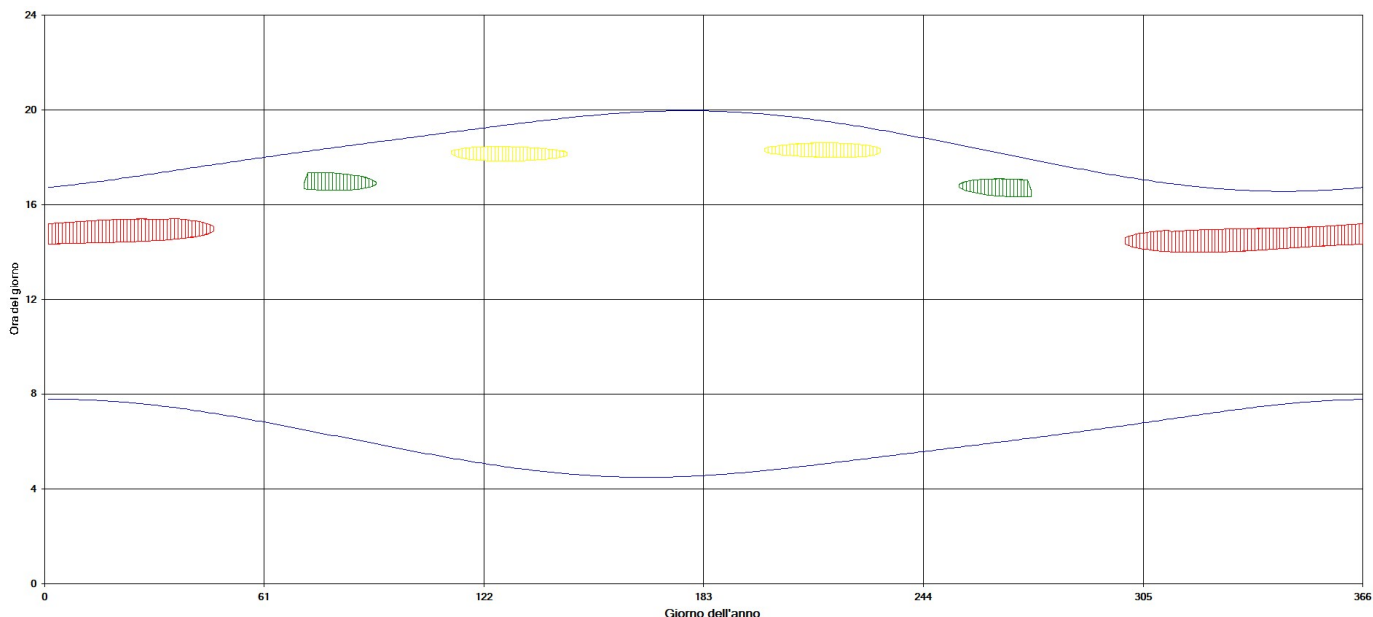


Figura 9 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 22

Dalla lettura del calendario in figura 9, si legge facilmente che, presso il fabbricato 22, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 4 dal 22 aprile al 24 maggio e dal 18 luglio al 19 agosto tra le ore 16:05 e le 17:15 (macchia gialla);
- WTG 5 dal 12 marzo al 1° aprile e dal 10 settembre al 30 settembre tra le ore 16:20 e le 17:25 (macchia verde);
- WTG 6 dal 1° gennaio al 16 febbraio e dal 26 ottobre al 31 dicembre tra le ore 14:00 e le 15:25 (macchia rossa).

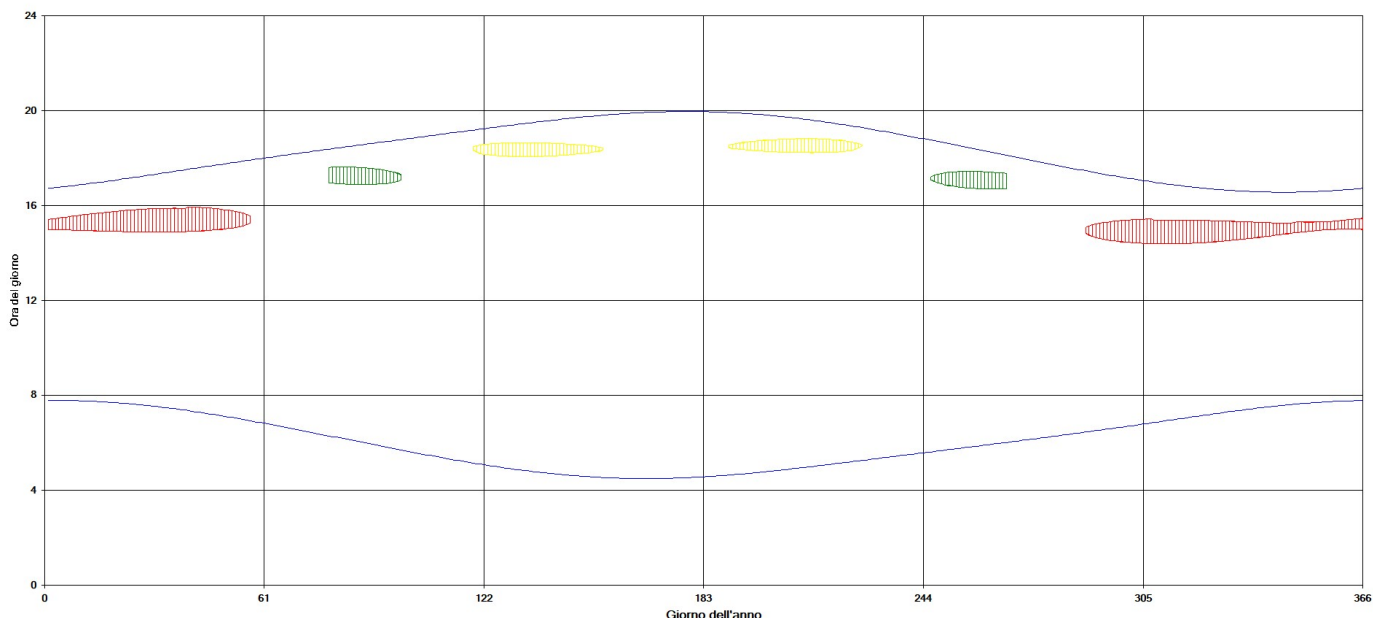


Figura 10 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 23

Dalla lettura del calendario in figura 10, si legge facilmente che, presso il fabbricato 23, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 4 dal 28 aprile al 3 giugno e dall'8 luglio al 14 agosto tra le ore 18:05 e le 18:50 (macchia gialla);
- WTG 5 dal 19 marzo all'8 aprile e dal 2 settembre al 23 settembre tra le ore 16:40 e le 17:40 (macchia verde);
- WTG 6 dal 1° gennaio al 26 febbraio e dal 15 ottobre al 31 dicembre tra le ore 14:25 e le 16:00 (macchia rossa).

4. CONCLUSIONI

A seguito di quanto descritto nei paragrafi precedenti si può concludere che, pur considerando una stima cautelativa in quanto non si è tenuto conto degli effetti mitigativi dovuti al piano di rotazione delle pale non sempre ortogonale alla direttrice sole-finestra e all'eventuale presenza di ostacoli e/o vegetazione interposti tra il sole e la finestra, il fenomeno dello shadow flickering si potrebbe verificare esclusivamente su sette abitazioni (si veda tabella 4), incidendo in maniera trascurabile, in quanto il valore atteso è per tutti i ricettori inferiore o uguale a 62 ore l'anno.

Va altresì sottolineato che:

- la velocità di rotazione delle turbine previste in progetto MySe 5.0-166 (modello commerciale più sfavorevole) è nettamente inferiore a 60 rpm, frequenza massima raccomandata al fine di ridurre al minimo i fastidi e soddisfare le condizioni di benessere;
- le turbine in progetto che causano il fenomeno dell'ombreggiamento sono molto distanti dai ricettori. In tali circostanze l'effetto dell'ombra è trascurabile poiché il rapporto tra lo spessore della pala e la distanza dal fabbricato è molto ridotto;
- una stima più approfondita del fenomeno, formulata tenendo conto della posizione del piano di rotazione delle pale in relazione alle direzioni dei venti attese, porterebbe ad un ulteriore abbattimento dei valori di shadow flickering sopra esposti.

5. ALLEGATI

- Mappa delle ore di ombreggiamento (WORST CASE)

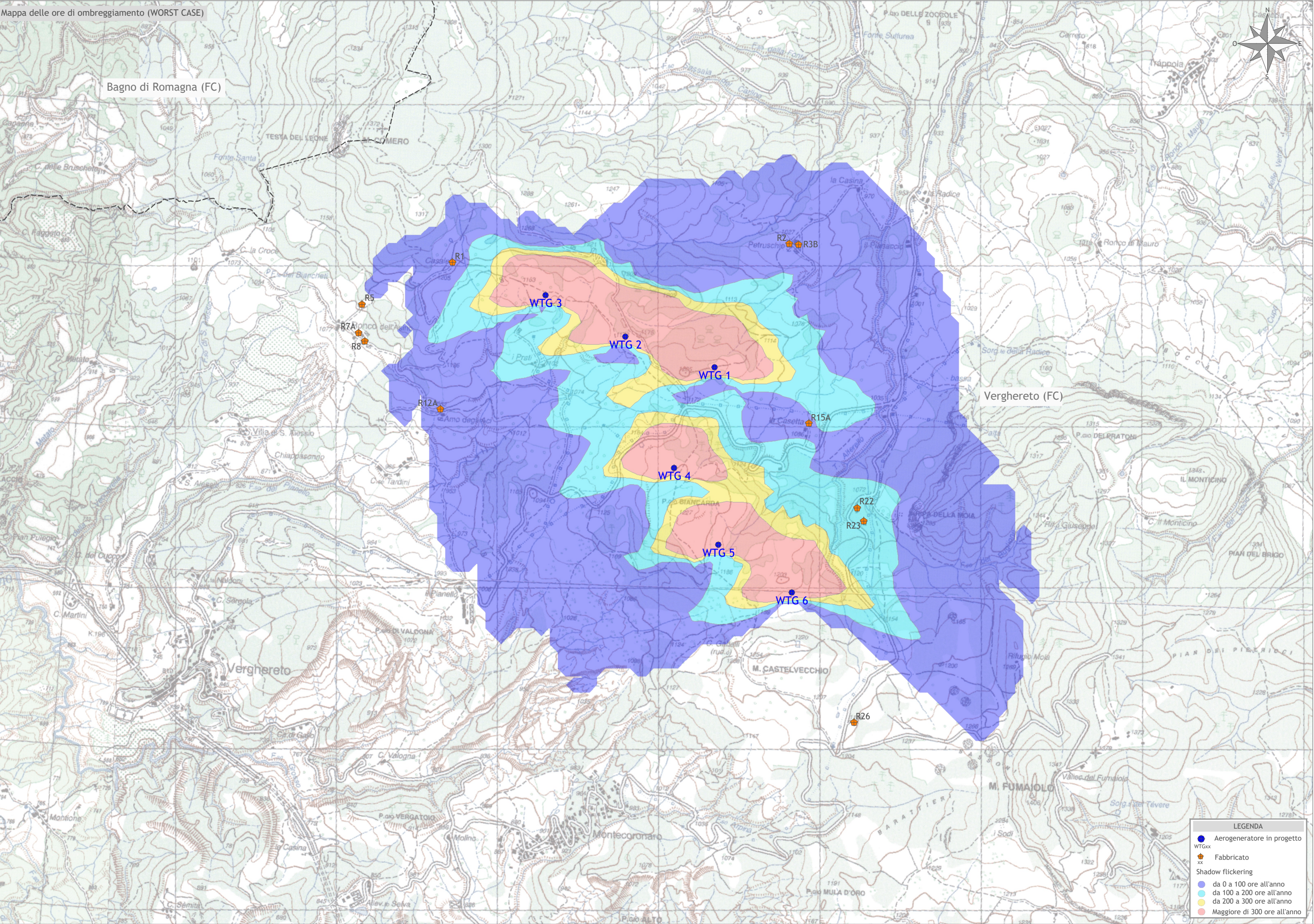
Progettista
(ing. Massimo LO RUSSO)



Bagno di Romagna (FC)



Verghereto (FC)



LEGENDA

- WTGxx Aerogeneratore in progetto
- xx Fabbricato
- Shadow flickering
 - da 0 a 100 ore all'anno
 - da 100 a 200 ore all'anno
 - da 200 a 300 ore all'anno
 - Maggiore di 300 ore all'anno