



Regione Marche  
Provincia di Ancona  
Comuni di Sassoferrato e Fabriano



Impianto per la produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato “Monte Miesola”, ubicato nei comuni di Sassoferrato (AN) e Fabriano (AN), costituito da 8(otto) Aerogeneratori di potenza nominale massima 5.95 MW per un totale di 47,60 MW con relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Sassoferrato (AN) e Fabriano (AN)

Titolo:

RELAZIONE DI SHADOW FLICKERING

Numero documento:

Commissa	Fase	Tipo doc.	Prog. doc.	Rev.
2 3 4 3 0 6	D	R	0 4 3 2	0 0

Proponente:

**FRI-EL**

FRI-EL S.p.A.  
Piazza della Rotonda 2  
00186 Roma (RM)  
[fri-elspa@legalmail.it](mailto: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)  
Tel. +39 0825 891313  
[www.progettoenergia.biz](http://www.progettoenergia.biz) | [info@progettoenergia.biz](mailto:info@progettoenergia.biz)

SERVIZI DI INGEGNERIA INTEGRATI  
INTEGRATED ENGINEERING SERVICES



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

	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
REVISIONI	00	11.01.2024	EMISSIONE PER AUTORIZZAZIONE	R. DI PIETRO	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 .....	6
3.3	METODOLOGIA DI CALCOLO .....	8
3.4	RISULTATI.....	10
4.	CONCLUSIONI.....	19
5.	ALLEGATI.....	19

## 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 e all'esercizio dell'impianto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica denominato "Monte Miesola", costituito da n° 8 aerogeneratori, per una potenza massima complessiva di 47,60 MW, nei comuni di Sassoferrato (AN) e Fabriano (AN), e relative opere di connessione ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Sassoferrato (AN) e Fabriano (AN), da collegare alla Rete Elettrica Nazionale mediante connessione in antenna alla sezione 132 kV della nuova Stazione Elettrica di smistamento della RTN a 132 kV (nel seguito "Stazione Elettrica 132 kV di "Sassoferrato"), ubicata nel comune di Sassoferrato, da inserire in entra-esce alla linea RTN a 132 kV "Sassoferrato - Fabriano", previo potenziamento/rifacimento della medesima linea RTN a 132 KV "Sassoferrato - Fabriano" nel seguito definito il "Progetto". In particolare, con il termine "Progetto" si fa riferimento all'insieme di: Impianto Eolico, costituito da n° 8 aerogeneratori, Cavidotto MT, Stazione Elettrica d'Utenza, Impianto di Utenza per la Connessione, Stazione elettrica 132 kV di "Sassoferrato" e Raccordi aerei.

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 5.95 MW, avente le caratteristiche principali di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro massimo pari a **155 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 massima fuori terra dell'aerogeneratore pari a **200 m**;
- diametro massimo alla base del sostegno tubolare: **5.90 m**;
- area spazzata massima: 18869,19 m<sup>2</sup>.

Ai fini degli approfondimenti progettuali e dei relativi studi specialistici, si sono individuati alcuni specifici modelli commerciali di aerogeneratore ad oggi esistenti sul mercato, idonei ad essere conformi all'aerogeneratore di progetto.

Nello specifico i modelli di aerogeneratore considerati risultano i seguenti:

- Vestas V150;
- Siemens Gamesa SG155;
- Nordex N149.

Le caratteristiche di dettaglio del modello commerciale più sfavorevole, utilizzate al fine di redigere il presente studio, sono quelle dell'aerogeneratore tipo Siemens Gamesa SG155 HHUB 122.5 m.

## 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 ricettore (abitazione), dell'ombra prodotta dalle pale in rotazione degli aerogeneratori allorquando il sole si trova alle loro spalle (cfr. figura successiva).

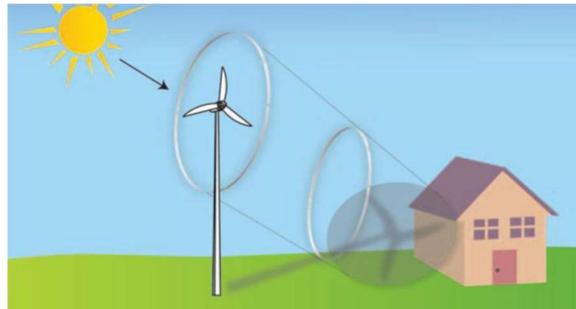


Figura 1 - Rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flicker

Il fenomeno, dal punto di vista di un potenziale 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 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 ricettore, 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 finestrate 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. 8 aerogeneratori per una potenza massima complessiva di 47,60 MW. La disposizione prevista per le turbine è riportata nella tabella 1.

AEROGENERATORE	COORDINATE AEROGENERATORE UTM (WGS84) - FUSO 33		Altitudine [m]
	Long. E [m]	Lat. N [m]	
WTG FA01	321.863	4.804.636	658,40
WTG FA02	321.724	4.805.093	710,00
WTG SA03	322.029	4.805.843	792,00
WTG SA04	321.677	4.806.220	691,40
WTG SA05	321.259	4.806.610	750,00
WTG SA06	321.528	4.807.388	812,80
WTG SA07	321.401	4.807.886	702,30
WTG SA08	320.772	4.807.963	629,10

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

La tabella 2 riporta la scheda riassuntiva delle principali caratteristiche della turbina tipo Siemens Gamesa SG155 HHUB 122.5 m.

Potenza nominale	5.950 kW
Velocità di accensione	3 m / s
Velocità di spegnimento	25 m / s

ROTORE	
Diametro del rotore	155 m
Area spazzata	18.869,19 m <sup>2</sup>
Numero pale	3
Speed, Dynamic Operation Range	9,31 rpm
TORRE	
Altezza del mozzo	122,5 m

Tabella 2: Estratto delle specifiche tecniche turbina Siemens Gamesa SG155 HHUB 122.5m

### 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.

Sebbene il fenomeno possa essere percepito anche all'esterno, esso risulta evidente e fastidioso in quegli ambienti con finestrate 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. La tabella 3 riporta i riferimenti geografici dei fabbricati riscontrati 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	Sassoferrato (AN)	105	668	D10	321168	4808531	4 ( 38° , 128° , 218° , 308° )
2	Sassoferrato (AN)	105	494	C06-A04	321214	4808677	4 ( 8° , 98° , 188° , 278° )
3	Sassoferrato (AN)	105	510	E09	321187	4808807	4 ( 78° , 168° , 258° , 348° )
4	Sassoferrato (AN)	105	650	A03	321215	4808805	4 ( 27° , 117° , 207° , 297° )
5	Sassoferrato (AN)	105	649	F02	321200	4808814	4 ( 70° , 160° , 250° , 340° )
6	Sassoferrato (AN)	105	675-676	C02	321179	4808848	4 ( 24° , 114° , 204° , 294° )
7	Sassoferrato (AN)	105	651-625-241-652-653-626	F02-A03-C06-C02	321210	4808854	4 ( 83° , 173° , 263° , 353° )
8	Sassoferrato (AN)	104	421	C02	319807	4807822	4 ( 68° , 158° , 248° , 338° )
9	Sassoferrato (AN)	104	275	A03	319788	4807803	4 ( 49° , 139° , 229° , 319° )
10	Sassoferrato (AN)	104	280	A03	319819	4807792	4 ( 35° , 125° , 215° , 305° )
11	Sassoferrato (AN)	122	282-459-284-461-285	A03-D10-F02-C02	320295	4806194	4 ( 85° , 175° , 265° , 355° )
12	Sassoferrato (AN)	122	470	C02	320336	4806204	4 ( 54° , 144° , 234° , 324° )
13	Sassoferrato (AN)	122	312	A04	320327	4806185	4 ( 42° , 132° , 222° , 312° )
14	Sassoferrato (AN)	122	315-447	A06-C02	320338	4806164	4 ( 31° , 121° , 211° , 301° )
15	Sassoferrato (AN)	122	448	D10	320329	4806152	4 ( 20° , 110° , 200° , 290° )
16	Sassoferrato (AN)	122	449	C06-A03	320301	4806163	4 ( 40° , 130° , 220° , 310° )
17	Sassoferrato (AN)	122	467-290-291-292-468	F02-A06-A03-A04	320282	4806170	4 ( 10° , 100° , 190° , 280° )
18	Sassoferrato (AN)	122	466-297-298	C02-A06-FABB RURALE	320270	4806151	4 ( 22° , 112° , 202° , 292° )
19	Sassoferrato (AN)	122	453-463-446-340	D10 -C02-A06	320275	4806128	4 ( 84° , 174° , 264° , 354° )
20	Sassoferrato (AN)	122	341-342-343-345-344	C06-C02-A06-A03-D10	320268	4806111	4 ( 15° , 105° , 195° , 285° )
21	Sassoferrato (AN)	122	450-469	C06-C02	320271	4806080	4 ( 71° , 161° , 251° , 341° )

RICETTORI							Numero finestre e orientamento
Ricettore	Comune	Foglio	Particella	Destinazione d'uso	UTM - WGS84		
					Long. E [m]	Lat. N [m]	
22	Sassoferrato (AN)	133	175	A03	320965	4805344	4 ( 63° , 153° , 243° , 333° )
23	Sassoferrato (AN)	133	246-247	C02	320989	4805269	4 ( 32° , 122° , 212° , 302° )
24	Sassoferrato (AN)	133	249	D10	321298	4805382	4 ( 8° , 98° , 188° , 278° )
25	Fabriano (AN)	15	780	FABB RURALE	321020	4804900	4 ( 80° , 170° , 260° , 350° )
26	Fabriano (AN)	15	855	C02	321055	4804889	4 ( 64° , 154° , 244° , 334° )
27	Fabriano (AN)	15	806	A03 - C02	321078	4804869	4 ( 37° , 127° , 217° , 307° )
28	Fabriano (AN)	15	576	A02 - C06	320908	4804798	4 ( 65° , 155° , 245° , 335° )
29	Fabriano (AN)	15	133	A03 - C06	321019	4804726	4 ( 34° , 124° , 214° , 304° )
30	Fabriano (AN)	15	867	D10	321077	4804776	4 ( 21° , 111° , 201° , 291° )
31	Fabriano (AN)	15	866	D10	321094	4804761	4 ( 39° , 129° , 219° , 309° )
32	Fabriano (AN)	15	869	C06 - A03	321053	4804738	4 ( 90° , 180° , 270° , 360° )
33	Fabriano (AN)	15	232-235	A03	321002	4804679	4 ( 74° , 164° , 254° , 344° )
34	Fabriano (AN)	15	757 - 821-138- 823	A03-C02	321109	4804675	4 ( 75° , 165° , 255° , 345° )
35	Fabriano (AN)	15	868	D10	321114	4804694	4 ( 84° , 174° , 264° , 354° )
36	Fabriano (AN)	15	797-152	A03 -C06-C02	321126	4804675	4 ( 77° , 167° , 257° , 347° )
37	Fabriano (AN)	15	800-809	C02	321140	4804707	4 ( 77° , 167° , 257° , 347° )
38	Fabriano (AN)	15	760	A04	321126	4804653	4 ( 87° , 177° , 267° , 357° )
39	Fabriano (AN)	15	799	A03	321114	4804650	4 ( 87° , 177° , 267° , 357° )
40	Fabriano (AN)	15	275	A03	321135	4804619	4 ( 80° , 170° , 260° , 350° )
41	Fabriano (AN)	15	863	C06	321182	4804594	4 ( 37° , 127° , 217° , 307° )
42	Fabriano (AN)	16	795	C02	321140	4804558	4 ( 35° , 125° , 215° , 305° )
43	Fabriano (AN)	15	794	A03	321160	4804557	4 ( 36° , 126° , 216° , 306° )
44	Fabriano (AN)	15	796-793	A03	321172	4804552	4 ( 34° , 124° , 214° , 304° )
45	Fabriano (AN)	15	633	A03	321183	4804539	4 ( 30° , 120° , 210° , 300° )
46	Fabriano (AN)	15	822	C02	321294	4804722	4 ( 41° , 131° , 221° , 311° )
47	Fabriano (AN)	36	793	C02	321620	4803944	4 ( 38° , 128° , 218° , 308° )
48	Fabriano (AN)	36	804-807	F02	321536	4803860	4 ( 7° , 97° , 187° , 277° )
49	Fabriano (AN)	36	789-565	A03 - A05-C02	321544	4803859	4 ( 20° , 110° , 200° , 290° )
50	Fabriano (AN)	36	831-194- 191-695	A04-A03-F03	321568	4803854	4 ( 28° , 118° , 208° , 298° )
51	Fabriano (AN)	36	823-815	D10	321570	4803836	4 ( 18° , 108° , 198° , 288° )
52	Fabriano (AN)	36	195	A03-D10	321595	4803833	4 ( 23° , 113° , 203° , 293° )
53	Fabriano (AN)	36	821	D10	321630	4803822	4 ( 24° , 114° , 204° , 294° )
54	Fabriano (AN)	36	819	D10	321648	4803839	4 ( 80° , 170° , 260° , 350° )
55	Fabriano (AN)	37	519	C06	321877	4803797	4 ( 34° , 124° , 214° , 304° )
56	Fabriano (AN)	36	305-781	A04-A03-C06-C02	321741	4803685	4 ( 19° , 109° , 199° , 289° )
57	Fabriano (AN)	36	780-784	C02	321766	4803685	4 ( 76° , 166° , 256° , 346° )
58	Fabriano (AN)	36	755-318- 319-795- 323-811- 812	C02-A02-A06	321825	4803682	4 ( 29° , 119° , 209° , 299° )
59	Fabriano (AN)	37	546	C02	321871	4803671	4 ( 13° , 103° , 193° , 283° )
60	Fabriano (AN)	37	451	Non classato catastalmente	322696	4803822	4 ( 54° , 144° , 234° , 324° )
61	Fabriano (AN)	37	512	C02	322794	4803686	4 ( 50° , 140° , 230° , 320° )
62	Fabriano (AN)	37	170-540- 548-539	C02	322809	4803639	4 ( 45° , 135° , 225° , 315° )
63	Fabriano (AN)	37	176-175- 179-180- 181-551- 549	A03-A04-C02	322850	4803675	4 ( 44° , 134° , 224° , 314° )
64	Fabriano (AN)	37	187	A03	322869	4803715	4 ( 47° , 137° , 227° , 317° )
65	Fabriano (AN)	37	486	A03	322892	4803726	4 ( 48° , 138° , 228° , 318° )

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

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. Non sono presenti ricettori di classe I, oggetto di particolare tutela dal punto di vista acustico (scuole, ospedali, case di cura e di riposo, ecc.).

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 sebbene ivi riportati solo per completezza di analisi non verranno considerati nello studio che segue, in quanto la presenza di persone è solo saltuaria e per brevi periodi. Nelle elaborazioni che seguono verranno considerati solo i fabbricati potenzialmente abitabili, evidenziati in grigio in tabella 3.

### 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 6 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): 321400E, 4806263N
- 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: 1,2 km dal punto di installazione dell'aerogeneratore
- altezza del punto di vista dell'osservatore: 2 m
- parametri turbina tipo Siemens Gamesa SG155 HHUB 122.5 m:
  - diametro rotore: 155 m,
  - altezza massima 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 4296 h/a), indipendentemente dalla presenza o meno di nubi, le quali inciderebbero 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 2221 h/a come riscontrato presso la Stazione meteorologica di Ancona Falconara, 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 48,3%, pari al complemento a 1 del rapporto  $2221/4296 = 51,7\%$ .

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 51,7% 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  $85\% \times 51,7\% = 43,9\%$ , ovvero del 56,1%, 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÷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):

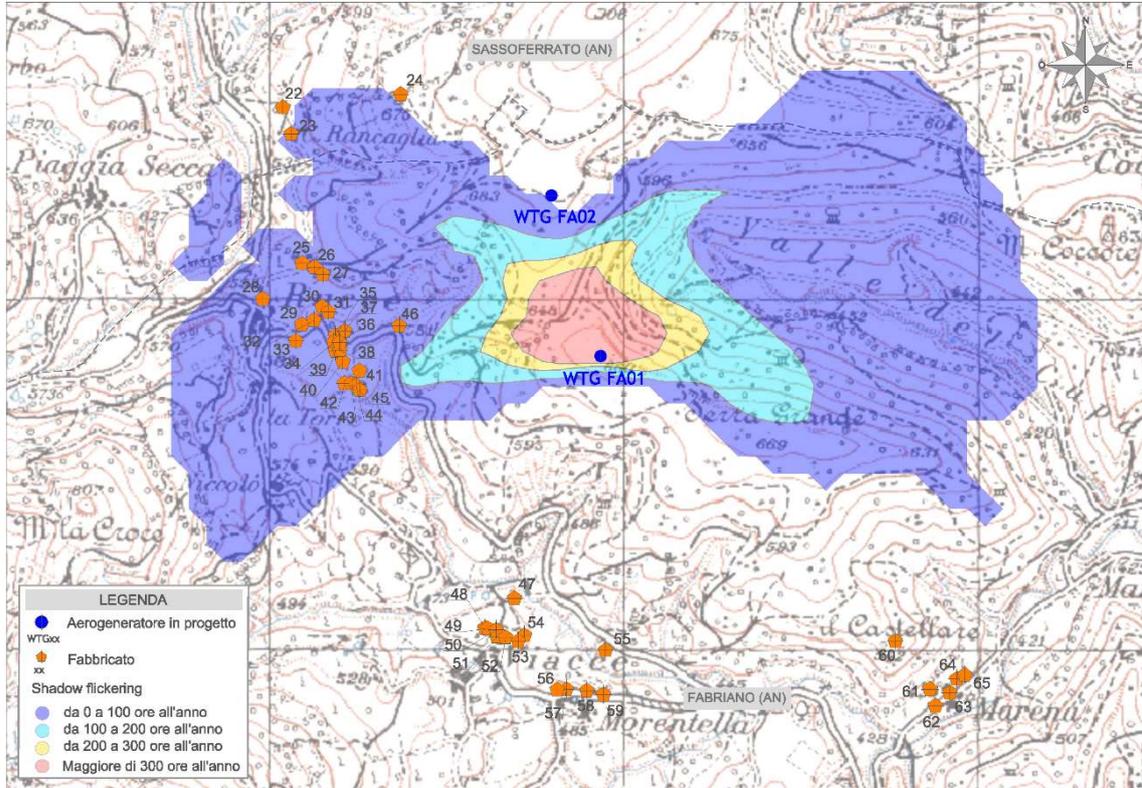


Figura 2 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG FA01

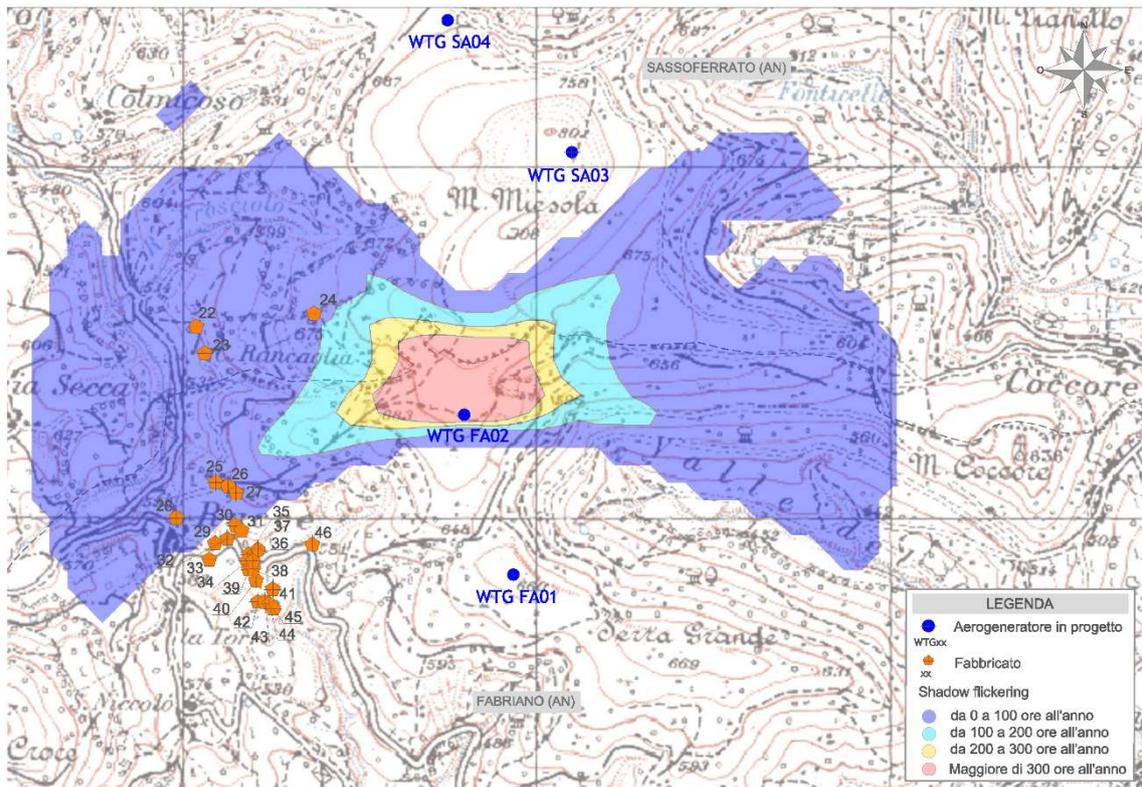


Figura 3 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG FA02

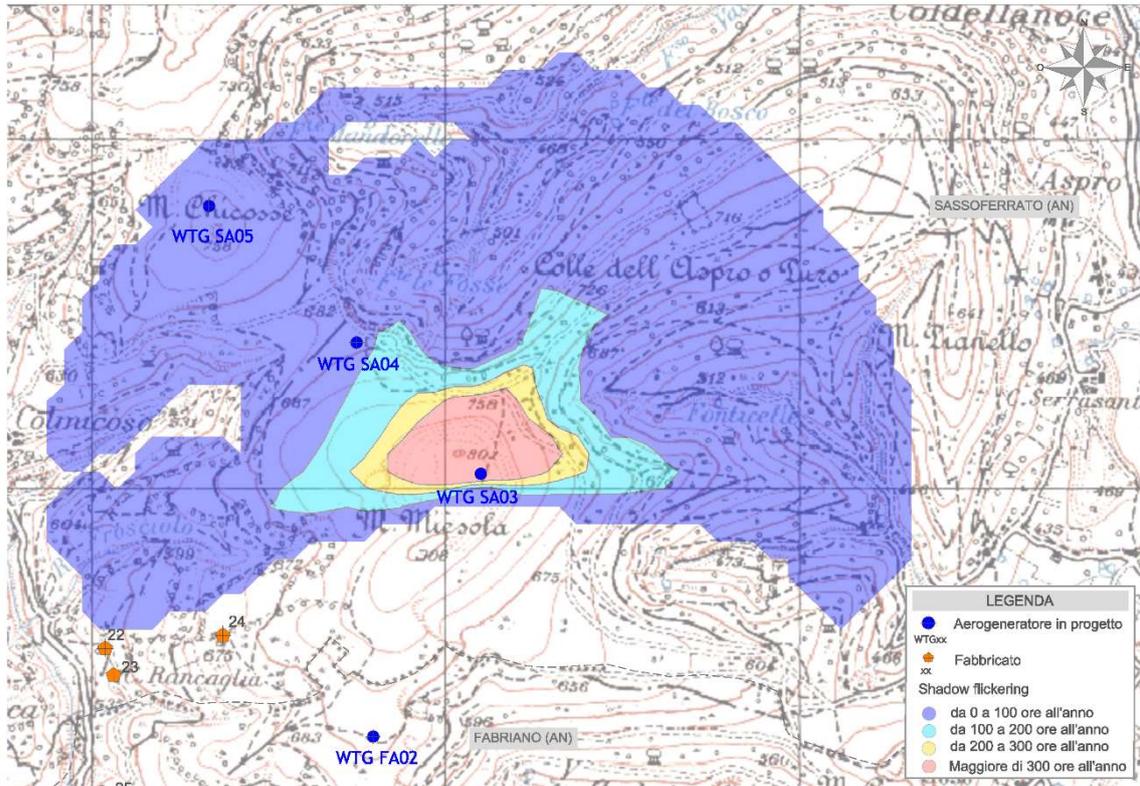


Figura 4 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG SA03

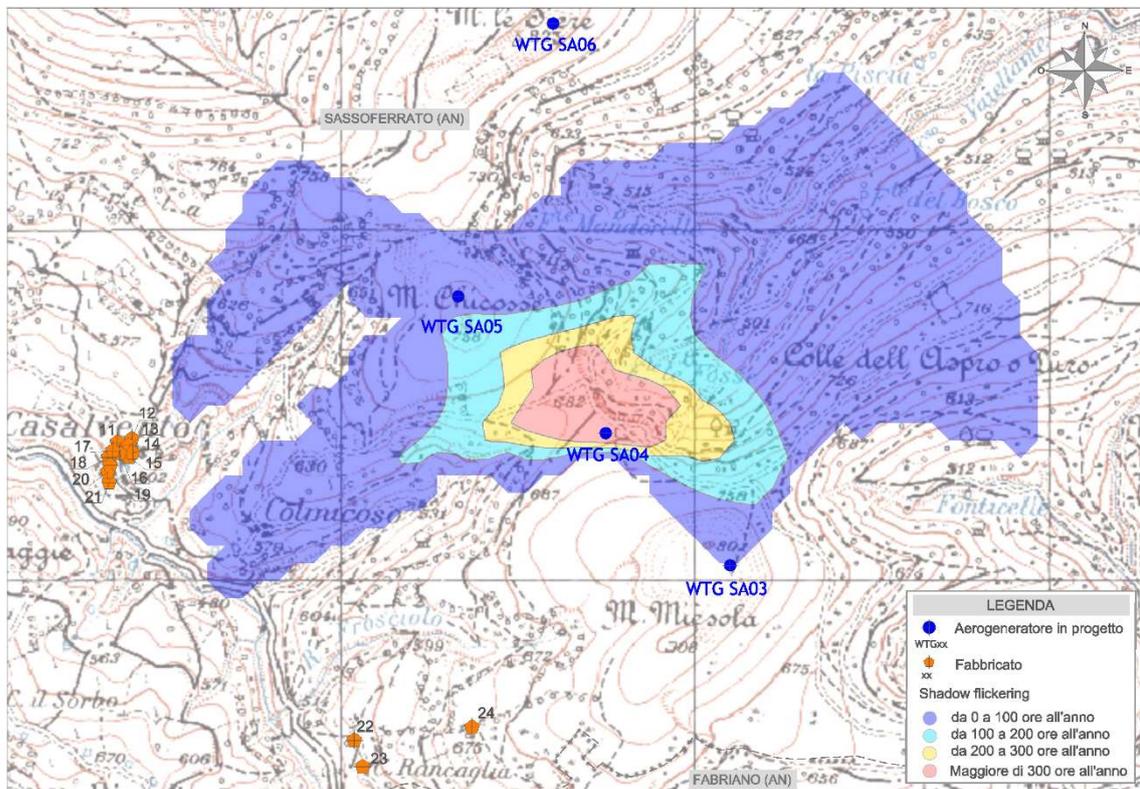


Figura 5 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG SA04

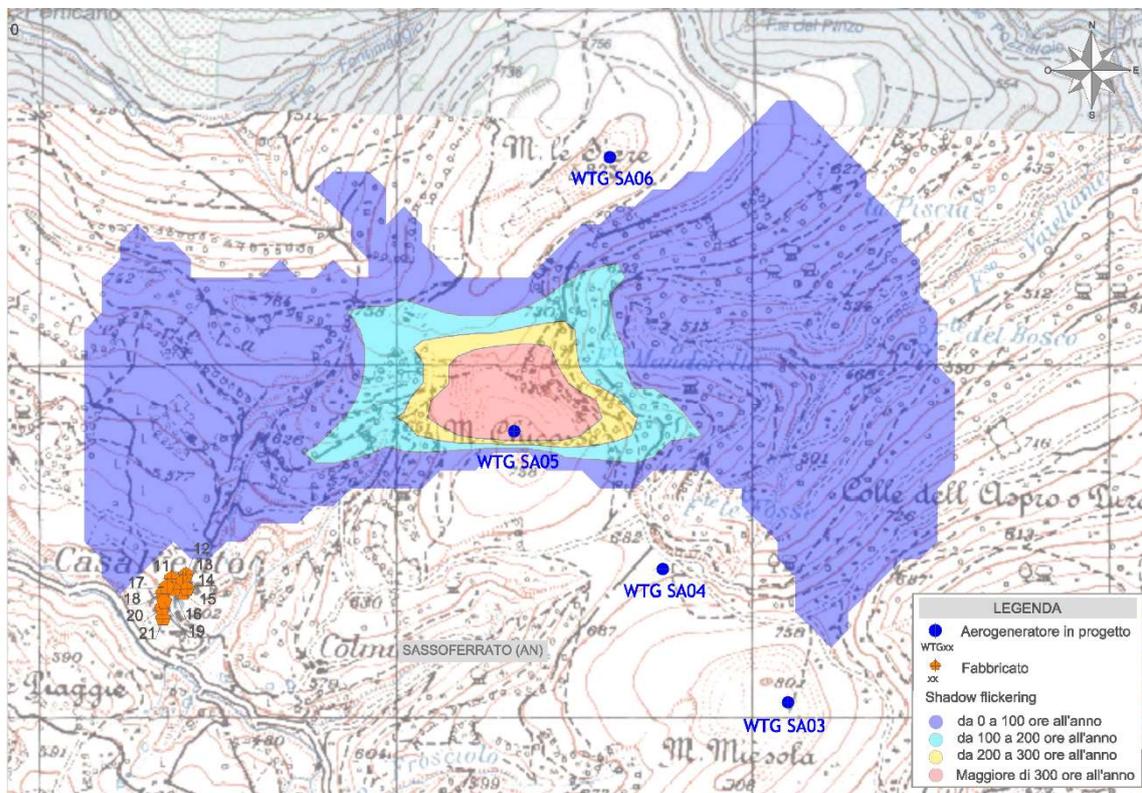


Figura 6 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG SA05

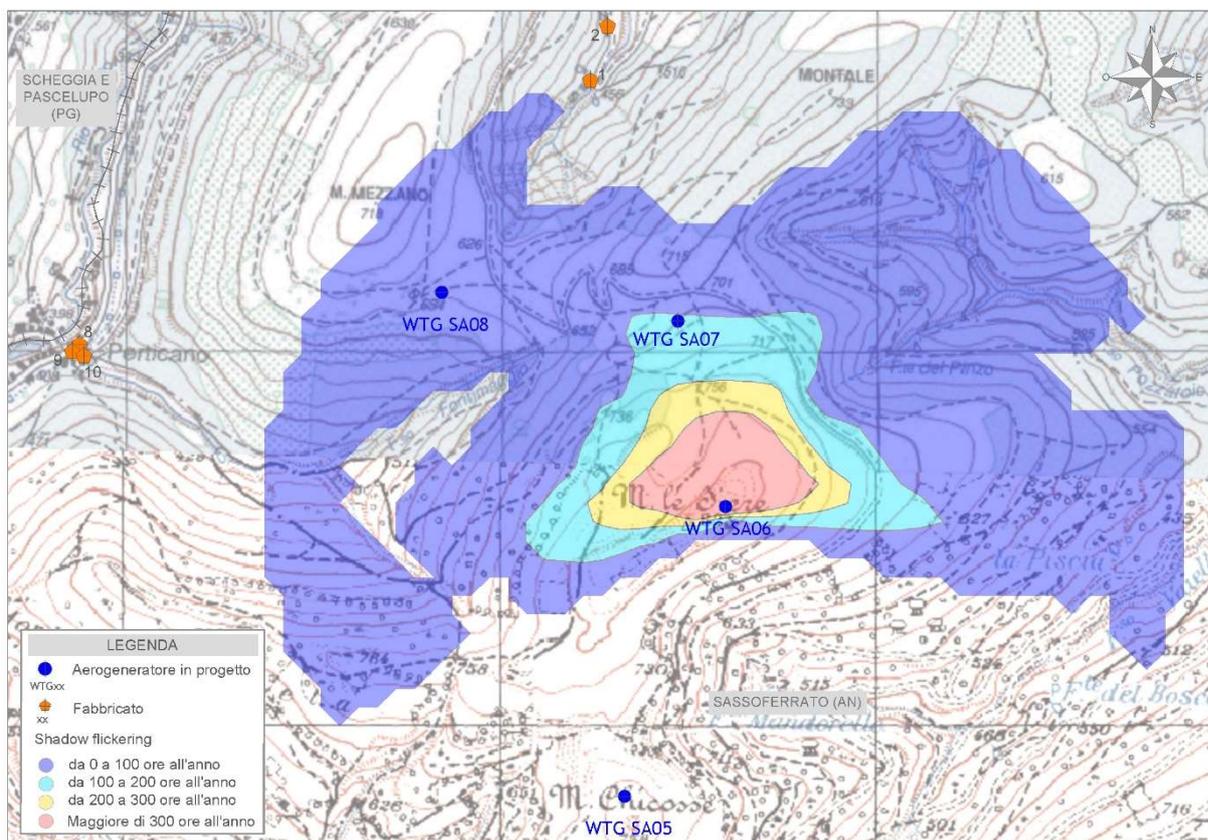


Figura 7 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG SA06

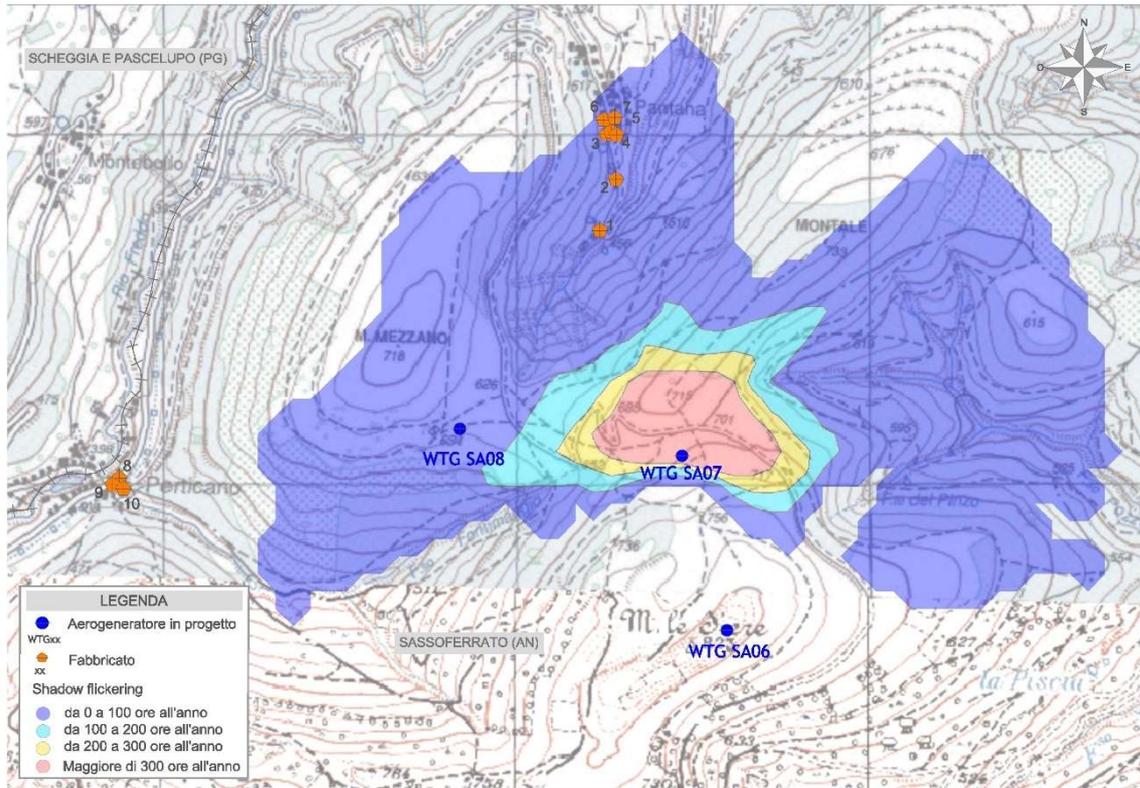


Figura 8 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG SA07

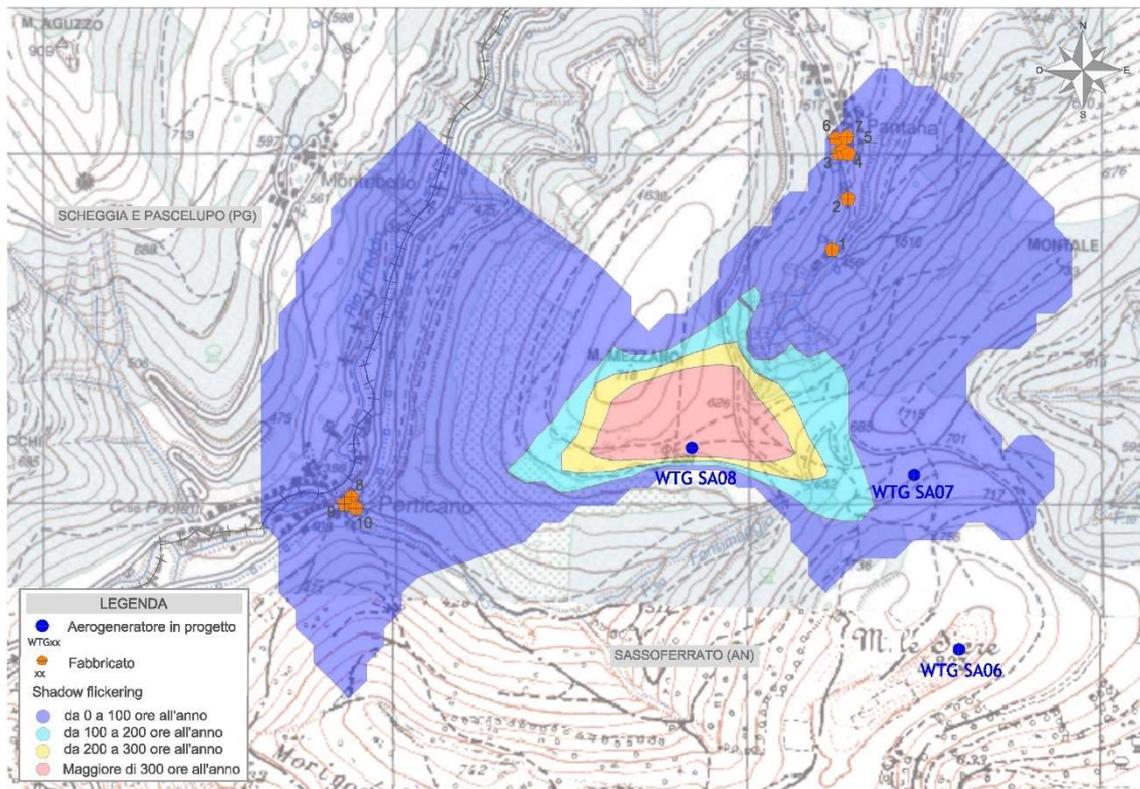


Figura 9 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG SA08

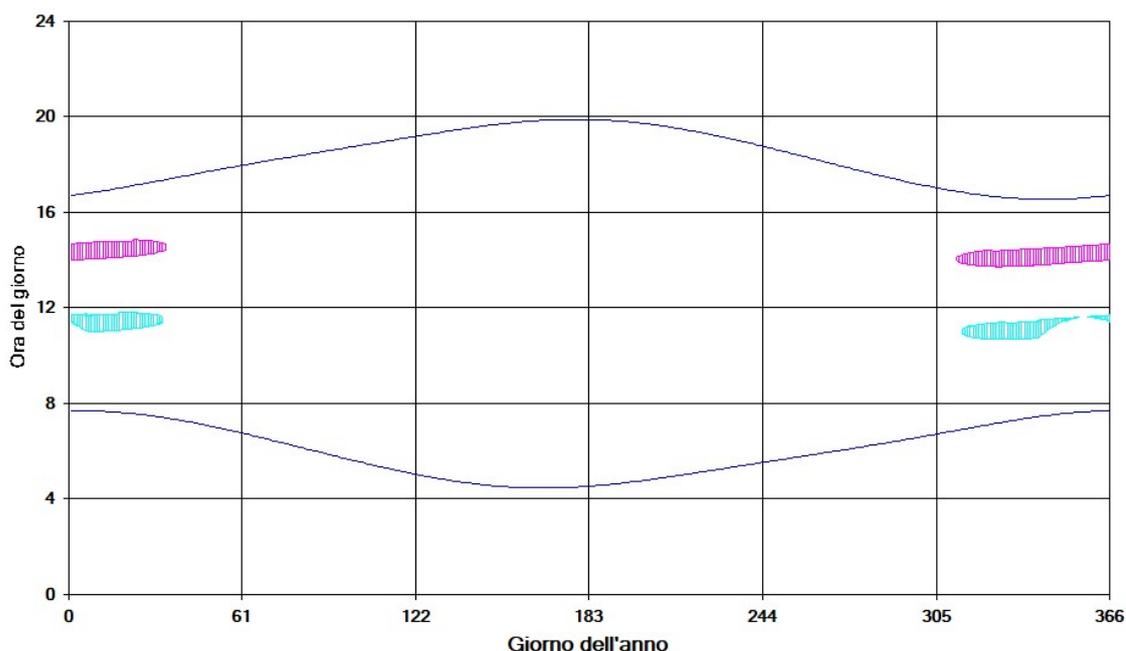
La tabella seguente riassume i risultati dell'analisi eseguita secondo la metodologia di calcolo innanzi descritta, e per quanto precisato al punto 3.2 la stessa si riferisce ai soli fabbricati potenzialmente abitabili, per come riscontrati dal sopralluogo in sito, di seguito riportato:

Fabbricato	WGS84 - UTM fuso 33		Caso peggiore		Caso reale
	Est	Nord	Giorni Anno	Ore Anno	Ore Anno
2	321214	4808677	89	98	43
4	321215	4808805	54	52	23
7	321210	4808854	37	27	12
9	319788	4807803	65	19	8
10	319819	4807792	59	18	8
11	320295	4806194	0	0	0
13	320327	4806185	0	0	0
14	320338	4806164	0	0	0
16	320301	4806163	0	0	0
17	320282	4806170	0	0	0
18	320270	4806151	0	0	0
19	320275	4806128	0	0	0
20	320268	4806111	0	0	0
22	320965	4805344	11	4	2
27	321078	4804869	126	79	35
28	320908	4804798	116	62	27
29	321019	4804726	56	32	14
32	321053	4804738	59	34	15
33	321002	4804679	57	32	14
34	321109	4804675	66	42	18
36	321126	4804675	69	44	19
38	321126	4804653	71	45	20
39	321114	4804650	69	44	19
40	321135	4804619	76	50	22
43	321160	4804557	112	68	30
44	321172	4804552	126	79	35
45	321183	4804539	119	84	37
49	321544	4803859	0	0	0
50	321568	4803854	0	0	0
52	321595	4803833	0	0	0
56	321741	4803685	0	0	0
58	321825	4803682	0	0	0
63	322850	4803675	0	0	0
64	322869	4803715	0	0	0
65	322892	4803726	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'eliofania 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 19 potenziali ricettori potrebbe verificarsi un effetto di shadow flickering che è possibile considerare trascurabile per via della scarsa durata del fenomeno, che si riduce nel caso reale a poche ore l'anno. Per i cinque 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 10 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 2*

Dalla lettura del calendario in figura 10, si legge facilmente che, presso il fabbricato 2, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG SA07 dal 1° gennaio al 2 febbraio, dal 9 novembre al 20 dicembre e dal 23 dicembre al 31 dicembre tra le ore 10:40 e le 11:50 (macchia azzurra);
- WTG SA08 dal 1° gennaio al 3 febbraio e dal 7 novembre al 31 dicembre tra le ore 13:40 e le 14:55 (macchia magenta).

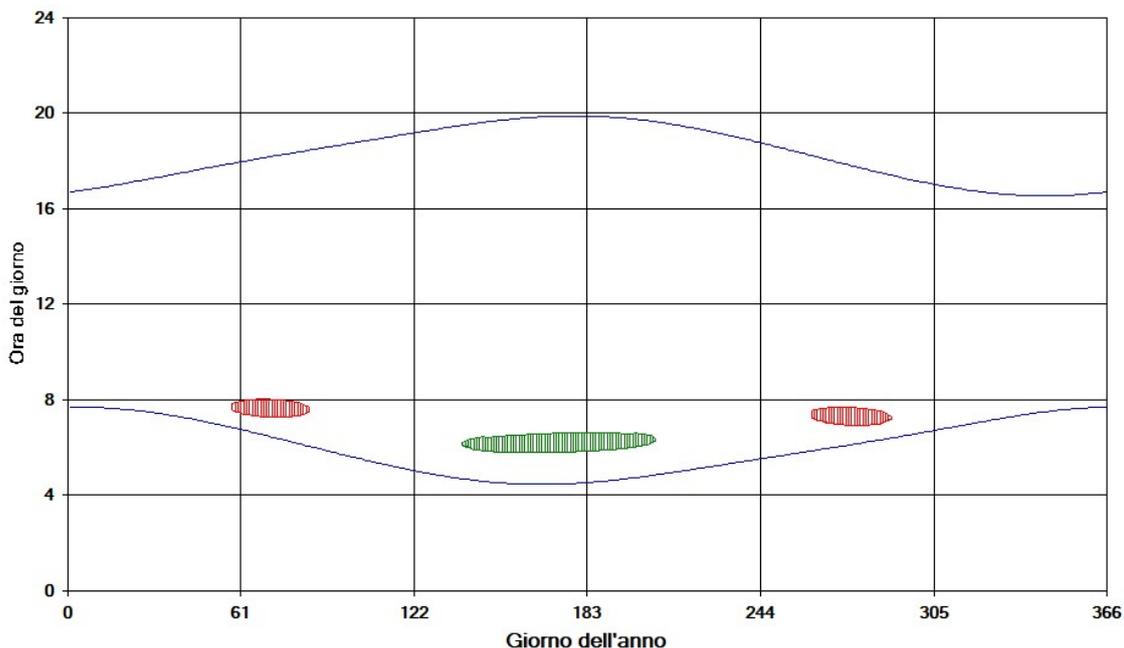


Figura 11 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 27

Dalla lettura del calendario in figura 11, si legge facilmente che, presso il fabbricato 27, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG FA01 dal 27 febbraio al 25 marzo e dal 18 settembre al 16 ottobre tra le ore 06:55 e le 08:05 (macchia rossa);
- WTG FA02 dal 18 maggio al 25 luglio tra le ore 05:45 e le 06:40 (macchia verde).

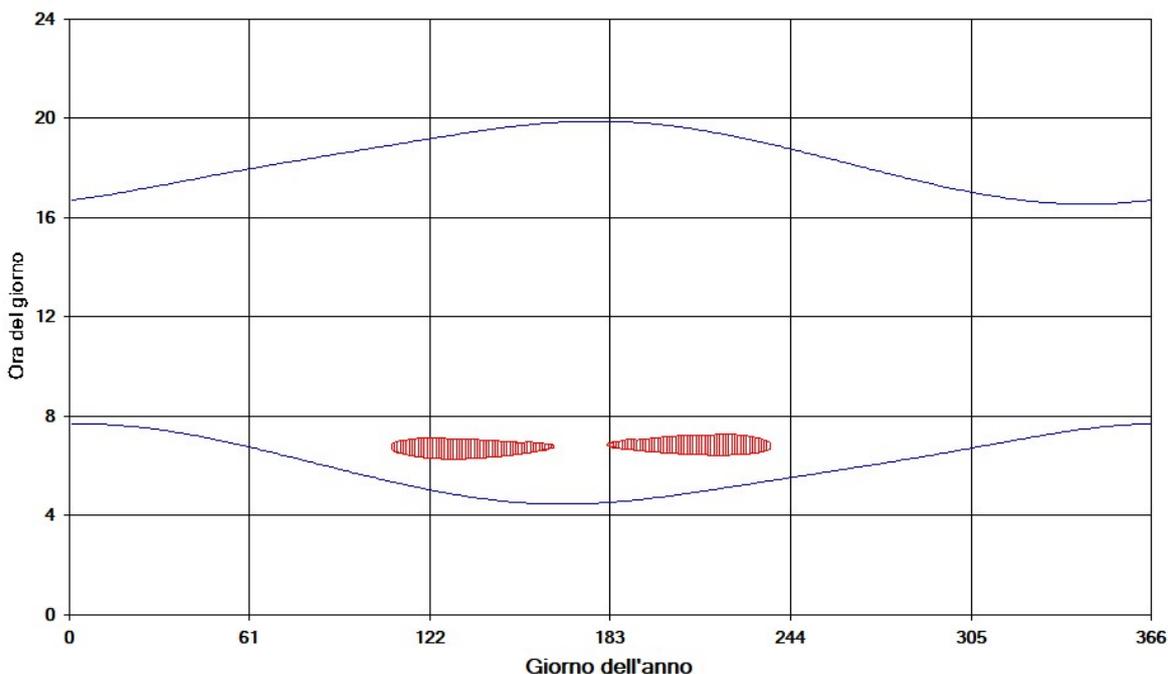
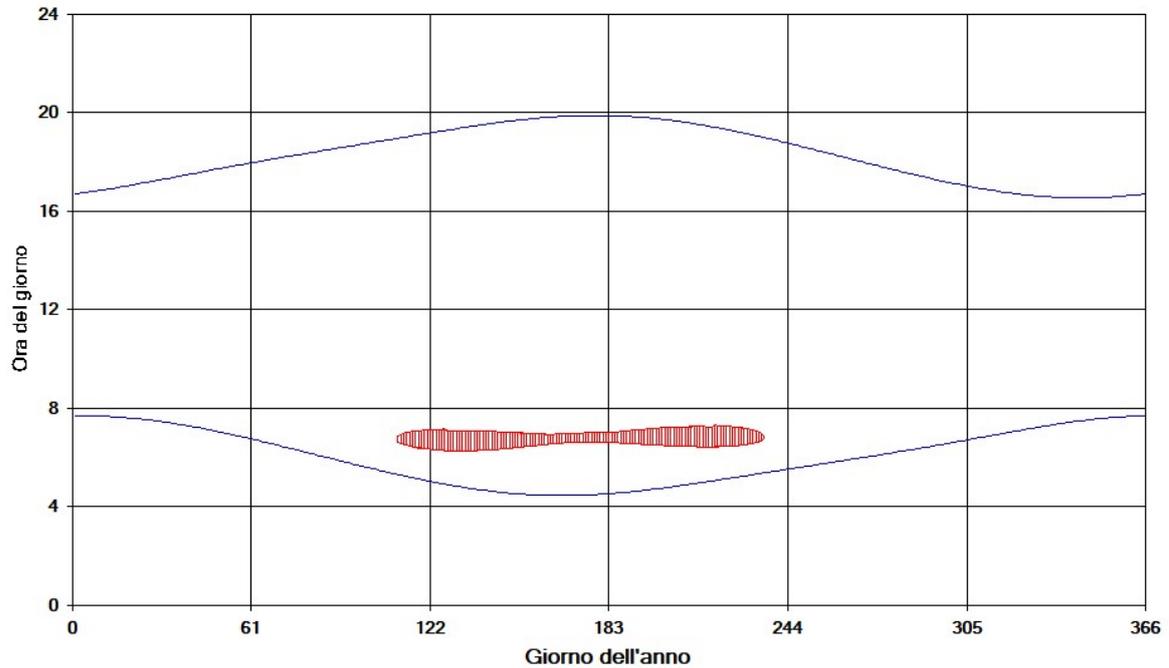


Figura 12 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 43

Dalla lettura del calendario in figura 12, si legge facilmente che, presso il fabbricato 43, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa dell'aerogeneratore:

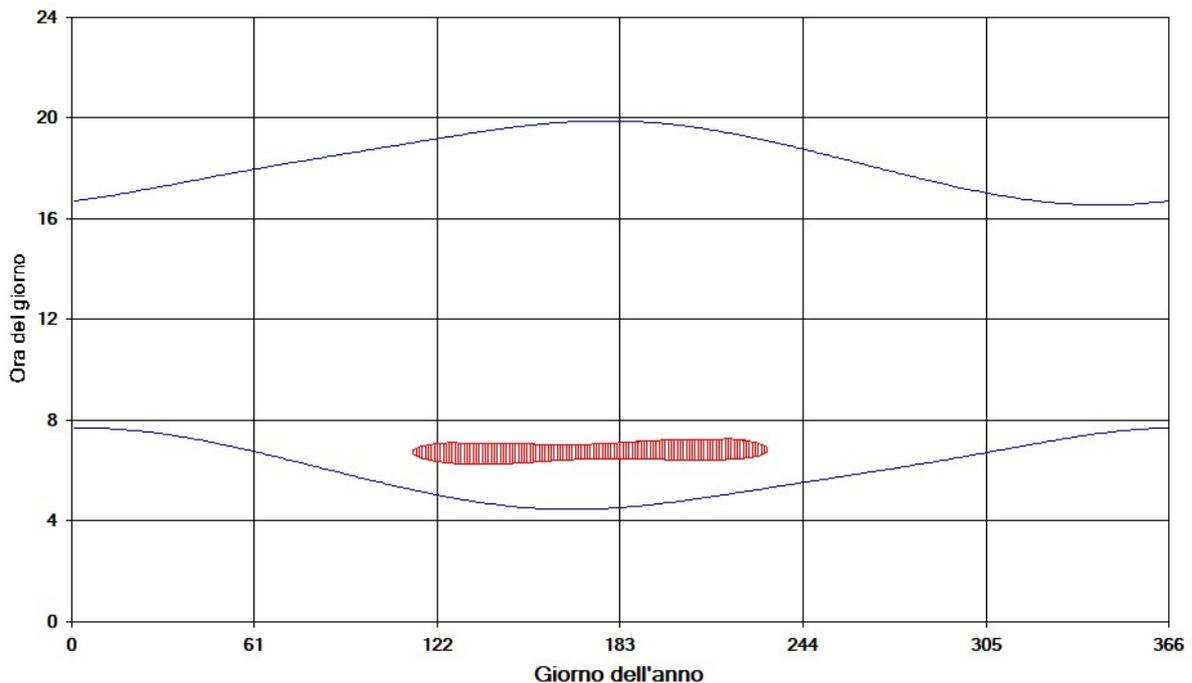
- WTG FA01 dal 18 aprile al 12 giugno e dal 30 giugno al 24 agosto tra le ore 06:15 e le 07:20 (macchia rossa).



*Figura 13 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 44*

Dalla lettura del calendario in figura 13, si legge facilmente che, presso il fabbricato 44, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa dell'aerogeneratore:

- WTG FA01 dal 20 aprile al 23 agosto tra le ore 06:15 e le 07:20 (macchia rossa).



*Figura 14 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 45*

Dalla lettura del calendario in figura 14, si legge facilmente che, presso il fabbricato 45, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa dell'aerogeneratore:

- WTG FA01 dal 23 aprile al 19 agosto tra le ore 06:10 e le 07:20 (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 19 potenziali ricettori (si veda tabella 4), incidendo in maniera trascurabile, in quanto il valore atteso è per tutti i ricettori uguale o inferiore a 43 ore l'anno, e per la maggior parte di essi uguale o inferiore a 27 ore l'anno.

Va altresì sottolineato che:

- la velocità di rotazione delle turbine previste in progetto, del tipo Siemens Gamesa SG155 - HH 122,5m (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.

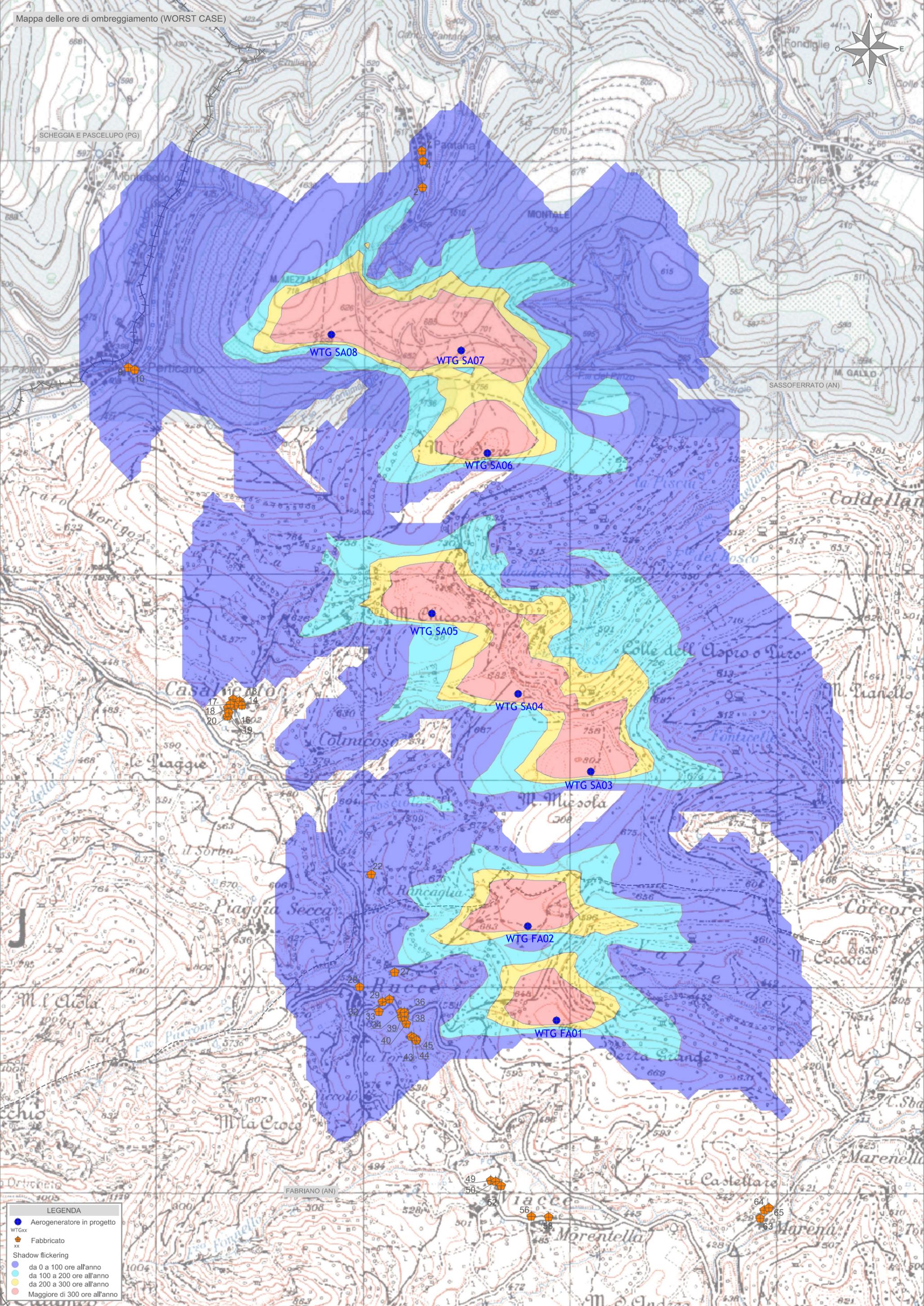
#### 5. ALLEGATI

- Mappa delle ore di ombreggiamento (WORST CASE)





SCHEGGIA E PASCELUPO (PG)



**LEGENDA**

- Aerogeneratore in progetto
- WTGxx
- Fabbricato
- xx
- 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