



Regione Campania
 Provincia di Benevento
 Comune di Morcone e Pontelandolfo



Impianto per la produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato "Colle Marco", avente potenza nominale pari a 39,6 MW, da realizzarsi nel Comune di Morcone (BN) e relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Morcone (BN) e Pontelandolfo (BN)

Titolo:

RELAZIONE DI SHADOW FLICKERING

Numero documento:

Commissa						Fase	Tipo doc.	Prog. doc.	Rev.				
2	2	4	3	0	7	D	R	0	2	7	2	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 Serra 6 83031 Ariano Irpino (AV)
 Tel. +39 0825 891313
www.progettoenergia.biz - 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

REVISIONI	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
		00	07.06.2022	EMISSIONE PER AUTORIZZAZIONE	C. ELIA	G. 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 RECETTORI	5
3.3	METODOLOGIA DI CALCOLO	8
3.4	RISULTATI.....	10
4.	CONCLUSIONI.....	17
5.	ALLEGATI.....	17

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 per la costruzione e per l'esercizio dell'impianto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica costituito da n. 6 aerogeneratori, per una potenza massima complessiva di 39,60 MW, nel comune di Morcone (BN), con opere connesse nei comuni di Morcone (BN) e Pontelandolfo (BN), collegato alla Rete Elettrica Nazionale mediante connessione con uno stallo a 150 KV in antenna sulla Stazione Elettrica di Smistamento (SE) della RTN 150 kV "Pontelandolfo", ubicata nel Comune di Pontelandolfo (BN).

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 6.6 MW, avente le caratteristiche principali di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro massimo pari a 158 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/max 36 kW 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 200,00 m;
- diametro massimo alla base del sostegno tubolare: 4,80 m;
- area spazzata massima: 19606,00 m².

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:

1. General Electric GE158 Cypress - HH 121 m
2. Vestas V150 - HH 125 m
3. Siemens Gamesa SG155 - HH 122,5 m

Le caratteristiche di dettaglio del modello commerciale più sfavorevole, utilizzate al fine di redigere il presente studio, sono quelle dell'aerogeneratore tipo General Electric, GE158 Cypress - HH 121 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 allorché il sole si trova alle loro spalle (cfr. figura successiva).

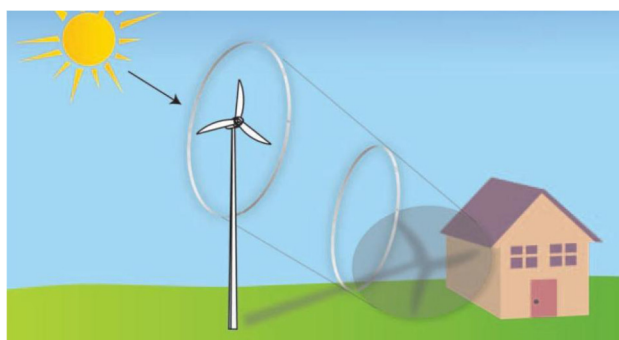


Figura 1 - Rappresentazione schematica del fenomeno dello shadow flicker

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, 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. 6 aerogeneratori per una potenza massima di 39,60 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 1	474.184	4.583.458	710,5
WTG 2	474.644	4.583.188	750,5
WTG 3	475.282	4.583.085	771,0
WTG 4	475.151	4.582.528	744,5
WTG 5	475.052	4.581.780	707,0
WTG 6	473.711	4.582.151	658,0

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

La tabella 2 riporta la scheda riassuntiva delle principali caratteristiche della turbina tipo General Electric, GE158 Cypress - HH 121 m – 6.60 MW.

Potenza nominale	6.600 kW
Velocità di accensione:	3 m / s
Velocità di spegnimento:	25 m / s
ROTORE	
Diametro del rotore	158 m
Area spazzata	19.606 m ²
Numero pale	3
Speed, Dynamic Operation Range	9.91 rpm
TORRE	
Altezza del mozzo	121 m

Tabella 2: Estratto delle specifiche tecniche turbina General Electric, GE158 Cypress - HH 121 m – 6.60 MW

3.2 INDIVIDUAZIONE DEI RECETTORI

Ai fini della previsione degli impatti indotti sulle abitazioni dall'impianto eolico in progetto sono stati individuati i recettori 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.

RECETTORI							Numero finestre e orientamento
Recettore	Comune	Foglio	Particella	Destinazione d'uso	UTM - WGS84		
					Long. E [m]	Lat. N [m]	
1	MORCONE (BN)	8	219	D10	473927,6	4583008,4	4 (78° , 168° , 258° , 348°)
2	MORCONE (BN)	8	215	D10	473919,7	4583040,3	4 (78° , 168° , 258° , 348°)
3	MORCONE (BN)	7	145	F02	473744,1	4583152,4	4 (10° , 100° , 190° , 280°)
			168				
4	MORCONE (BN)	7	165	F02	473722,6	4583161,0	4 (3° , 93° , 183° , 273°)
5	MORCONE (BN)	3	209	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	473587,4	4583346,3	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
6	MORCONE (BN)	3	921	D10	473725,4	4583769,5	4 (55° , 145° , 235° , 325°)
7	MORCONE (BN)	3	928	D10	473792,8	4583792,6	4 (41° , 131° , 221° , 311°)
8	MORCONE (BN)	3	920	A04	473656,1	4583795,5	4 (9° , 99° , 189° , 279°)
9	MORCONE (BN)	3	968	C02 - A04	473663,2	4583836,1	4 (83° , 173° , 263° , 353°)
			969				
10	MORCONE (BN)	4	484	D10	474177,3	4583818,2	4 (11° , 101° , 191° , 281°)
11	MORCONE (BN)	4	616	D10	474183,7	4583791,5	4 (2° , 92° , 182° , 272°)
12	MORCONE (BN)	4	574	C02	474376,8	4583901,6	4 (34° , 124° , 214° , 304°)
13	MORCONE (BN)	4	515	C02	474389,0	4583877,8	4 (38° , 128° , 218° , 308°)
14	MORCONE (BN)	4	605	F02 - C06	474399,8	4583859,8	4 (27° , 117° , 207° , 297°)
			564				
			554				
			625				
			591				
15	MORCONE (BN)	4	551	C06	474417,1	4583845,4	4 (25° , 115° , 205° , 295°)
16	MORCONE (BN)	4	521	F02	474403,9	4583893,7	4 (29° , 119° , 209° , 299°)
17	MORCONE (BN)	4	588	A04 - C02 - F02	474422,3	4583880,2	4 (27° , 117° , 207° , 297°)
			563				
			566				
			632				
			608				
			565				
			589				
			590				
18	MORCONE (BN)	4	562	C06	474427,3	4583857,2	4 (18° , 108° , 198° , 288°)
			561				
			587				
			552				
19	MORCONE (BN)	4	585	C02/C06	474452,3	4583869,7	4 (23° , 113° , 203° , 293°)
			556				
			555				
			586				
20	MORCONE (BN)	4	497	C06	474489,3	4583846,8	4 (81° , 171° , 261° , 351°)
			534				
21	MORCONE (BN)	4	601	C02	474486,3	4583875,6	4 (87° , 177° , 267° , 357°)
			602				
			498				
			614				
22	MORCONE (BN)	4	549	C02	474467,5	4583903,6	4 (16° , 106° , 196° , 286°)
23	MORCONE (BN)	4	548	D10	474509,3	4583876,8	4 (78° , 168° , 258° , 348°)
24	MORCONE (BN)	4	613	F02 - A02	474490,8	4583899,2	4 (77° , 167° , 257° , 347°)
			611				
			615				
			609				
			610				
			567				
			612				
			600				
25	MORCONE (BN)	4	511	C02	474425,2	4583936,5	4 (9° , 99° , 189° , 279°)

RECETTORI							Numero finestre e orientamento
Recettore	Comune	Foglio	Particella	Destinazione d'uso	UTM - WGS84		
					Long. E [m]	Lat. N [m]	
26	MORCONE (BN)	4	500 535	A02	474532,4	4583906,1	4 (20° , 110° , 200° , 290°)
27	MORCONE (BN)	4	538 501	C06	474560,0	4583897,2	4 (27° , 117° , 207° , 297°)
28	MORCONE (BN)	4	505	C06	474609,3	4583861,1	4 (22° , 112° , 202° , 292°)
29	MORCONE (BN)	4	532	C07	474460,9	4583960,6	4 (2° , 92° , 182° , 272°)
30	MORCONE (BN)	4	488	D10	474514,5	4583970,4	4 (9° , 99° , 189° , 279°)
31	MORCONE (BN)	4	507	F03	474727,5	4583780,2	4 (43° , 133° , 223° , 313°)
32	MORCONE (BN)	4	496	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	474815,1	4583826,8	4 (33° , 123° , 213° , 303°)
33	MORCONE (BN)	4	495	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	474834,9	4583838,0	4 (60° , 150° , 240° , 330°)
34	MORCONE (BN)	4	490	A02	474916,8	4583638,2	4 (39° , 129° , 219° , 309°)
35A	MORCONE (BN)	4	553 sub 5	A04	475056,5	4583590,7	4 (26° , 116° , 206° , 296°)
35B	MORCONE (BN)	4	553 sub 6	C06	475030,4	4583570,9	4 (22° , 112° , 202° , 292°)
36	MORCONE (BN)	5	351	D10	475088,4	4583435,8	4 (36° , 126° , 216° , 306°)
37	MORCONE (BN)	5	348	C02	474960,9	4583084,2	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
38	MORCONE (BN)	9	264	C02	475399,6	4582341,6	4 (51° , 141° , 231° , 321°)
39	MORCONE (BN)	12	213	C02	475207,9	4581352,0	4 (13° , 103° , 193° , 283°)
40	MORCONE (BN)	12	215	C02	474616,1	4581585,7	4 (72° , 162° , 252° , 342°)
41	MORCONE (BN)	12	232	C02	474612,0	4581813,4	4 (8° , 98° , 188° , 278°)
42	MORCONE (BN)	11	366	A07 - C02	474141,1	4581812,4	4 (86° , 176° , 266° , 356°)
43	MORCONE (BN)	8	213	D10	474006,5	4581957,5	4 (80° , 170° , 260° , 350°)
44	MORCONE (BN)	8	211	C02	473925,9	4581726,4	4 (8° , 98° , 188° , 278°)
45	MORCONE (BN)	8	204	F02	473899,5	4581721,6	4 (3° , 93° , 183° , 273°)
46	MORCONE (BN)	11	397	F02	473851,7	4581681,4	4 (7° , 97° , 187° , 277°)
47	MORCONE (BN)	11	423 422 34	A04 - F02	473843,0	4581691,8	4 (84° , 174° , 264° , 354°)
48	MORCONE (BN)	8	202	C06	473840,2	4581708,1	4 (16° , 106° , 196° , 286°)
49	MORCONE (BN)	11	29 28 281 282	FABB DIRUTO - AREA FAB DM	473795,6	4581692,0	4 (25° , 115° , 205° , 295°)
50	MORCONE (BN)	11	344	C02/A02	473719,8	4581684,0	4 (14° , 104° , 194° , 284°)
51	MORCONE (BN)	11	353	A03/C02/F03	473665,2	4581676,4	4 (21° , 111° , 201° , 291°)
52	MORCONE (BN)	11	364 361	D10	473572,8	4581670,5	4 (49° , 139° , 229° , 319°)
53	MORCONE (BN)	11	365	D10	473612,6	4581723,0	4 (49° , 139° , 229° , 319°)
54	MORCONE (BN)	11	293	A02	473628,5	4581729,6	4 (45° , 135° , 225° , 315°)
55	MORCONE (BN)	11	359	C02	473613,7	4581732,2	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
56	MORCONE (BN)	8	201	D07	473659,2	4581773,5	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
57	MORCONE (BN)	7	76	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	473847,2	4582383,1	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
58A	MORCONE (BN)	7	64	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	473728,0	4582482,5	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
58B	MORCONE (BN)	7	64	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	473719,1	4582501,1	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
59	MORCONE (BN)	7	65	NON IDENTIFICATO CATASTALMETE	473699,7	4582527,9	4 (0° , 90° , 180° , 270°)
60	MORCONE (BN)	7	169	D10	473542,7	4582645,8	4 (56° , 146° , 236° , 326°)
61A	MORCONE (BN)	6	172 sub 2	F2	473223,5	4582388,7	4 (72° , 162° , 252° , 342°)
61B	MORCONE (BN)	6	173 sub 3	F2	473256,3	4582410,5	4 (30° , 120° , 210° , 300°)
61C	MORCONE (BN)	6	174 sub 4	F2	473204,2	4582417,4	4 (47° , 137° , 227° , 317°)
61D	MORCONE (BN)	6	175 sub 5	F2	473200,6	4582400,5	4 (32° , 122° , 212° , 302°)

RECETTORI							Numero finestre e orientamento
Recettore	Comune	Foglio	Particella	Destinazione d'uso	UTM - WGS84		
					Long. E [m]	Lat. N [m]	
62	MORCONE (BN)	6	170	C2 - A4 - A2	473100,5	4582264,1	4 (31° , 121° , 211° , 301°)
			118				
63	MORCONE (BN)	6	166	F3	473147,4	4582219,0	4 (25° , 115° , 205° , 295°)
64	MORCONE (BN)	6	173	F2	473149,7	4582294,3	4 (23° , 113° , 203° , 293°)
65	MORCONE (BN)	6	54	FABB DIRUTO - F2	473124,4	4582287,3	4 (29° , 119° , 209° , 299°)
			174				
66	MORCONE (BN)	6	53	FABB DIRUTO - F2	473116,3	4582306,0	4 (14° , 104° , 194° , 284°)
			169				
67	MORCONE (BN)	6	167	F2	473123,9	4582318,8	4 (42° , 132° , 222° , 312°)
			168				
			171				
			51				

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

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 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 "recettori 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): 474496, 4582619N
- coordinate UTM-WGS84-FUSO 33 delle turbine considerate (vedi tabella 1)
- coordinate UTM-WGS84-FUSO 33 dei recettori 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 General Electric, GE158 Cypress - HH 121 m:
 - diametro rotore: 158 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 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 2324 h/a come riscontrato presso la Stazione meteorologica di Piano Cappelle (BN), 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 48.0%, pari al complemento a 1 del rapporto $2324/4465 = 52,0\%$.

In altri termini, rispetto al WORST CASE, la probabilità di occorrenza del fenomeno di shadow flickering si riduce realisticamente, per l'area in esame, al 52,0 % 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 $85 \% \times 52,0\% = 44,2 \%$, ovvero del 55,8 %, 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 recettori;
- 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):

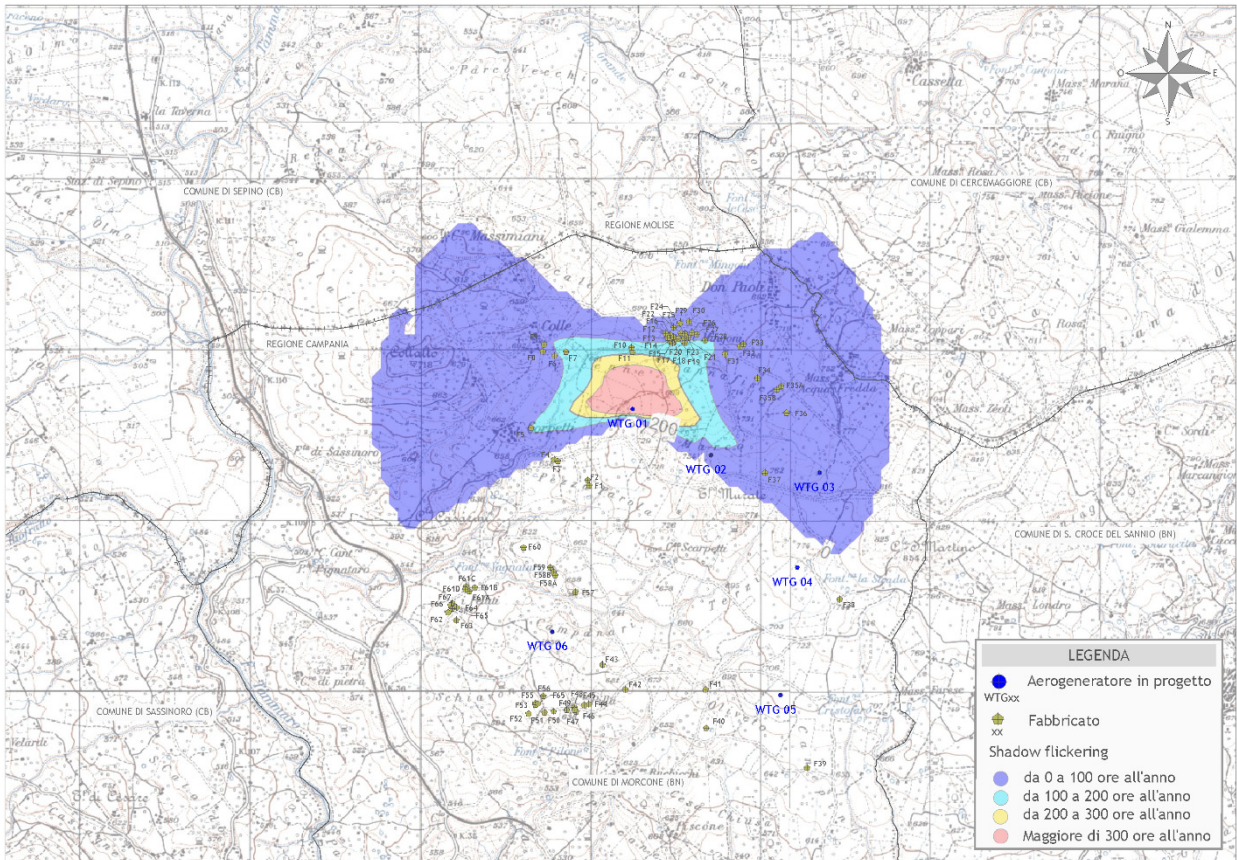


Figura 2 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 01

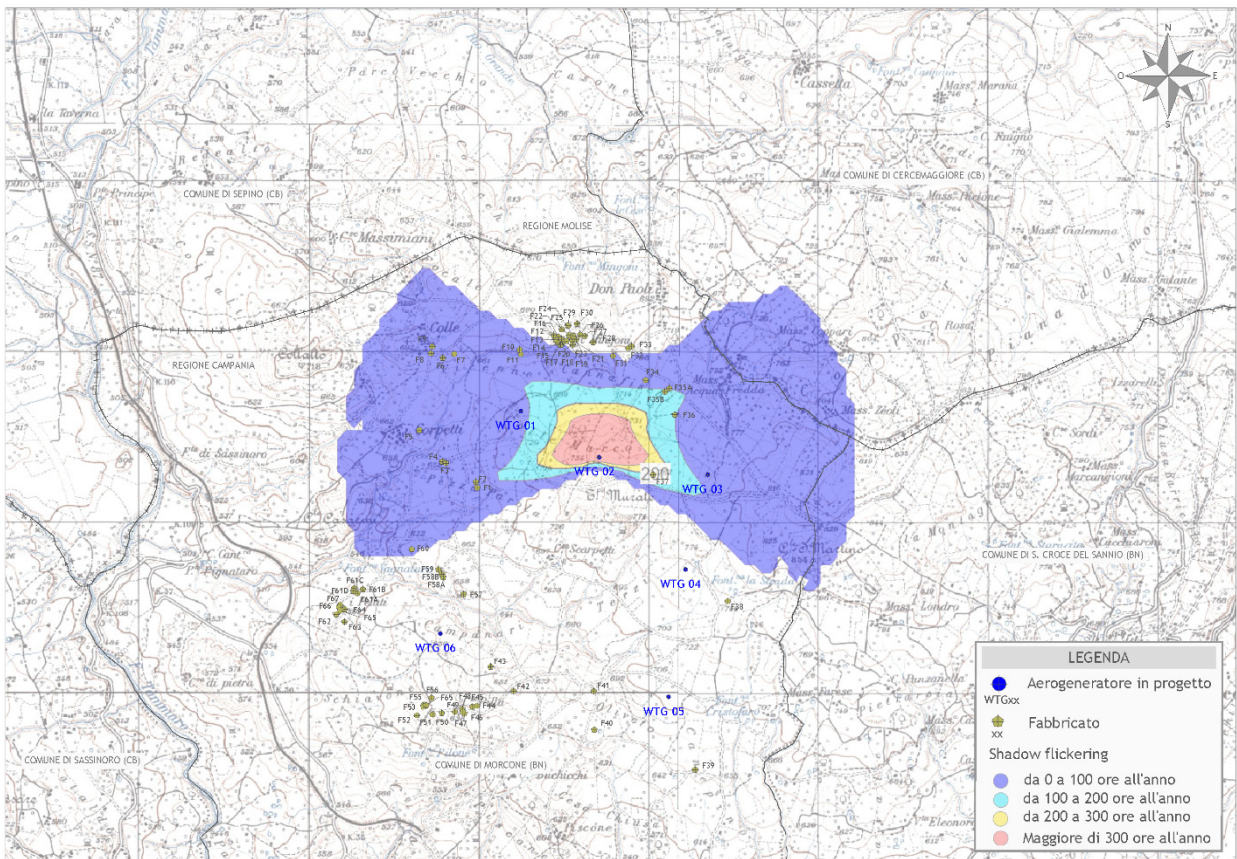


Figura 3 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 02

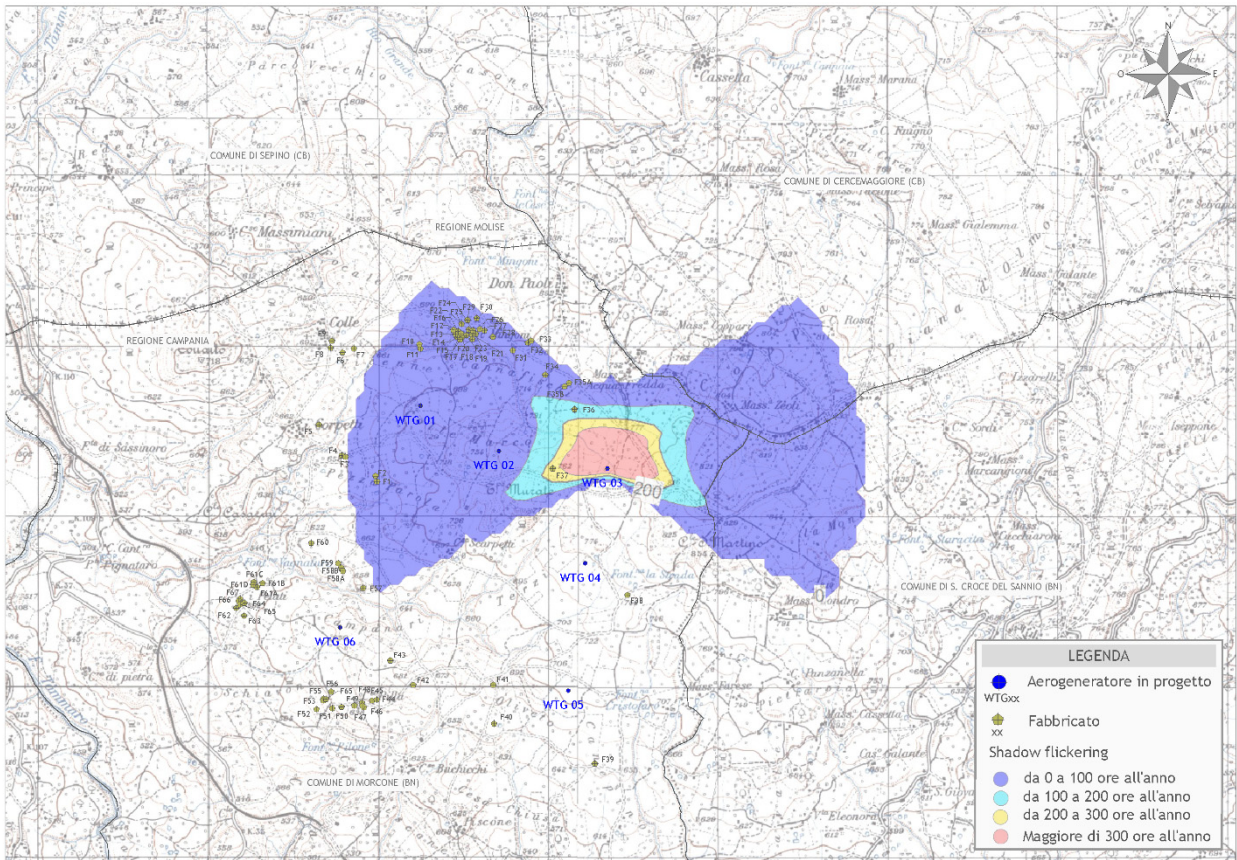


Figura 4 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 03

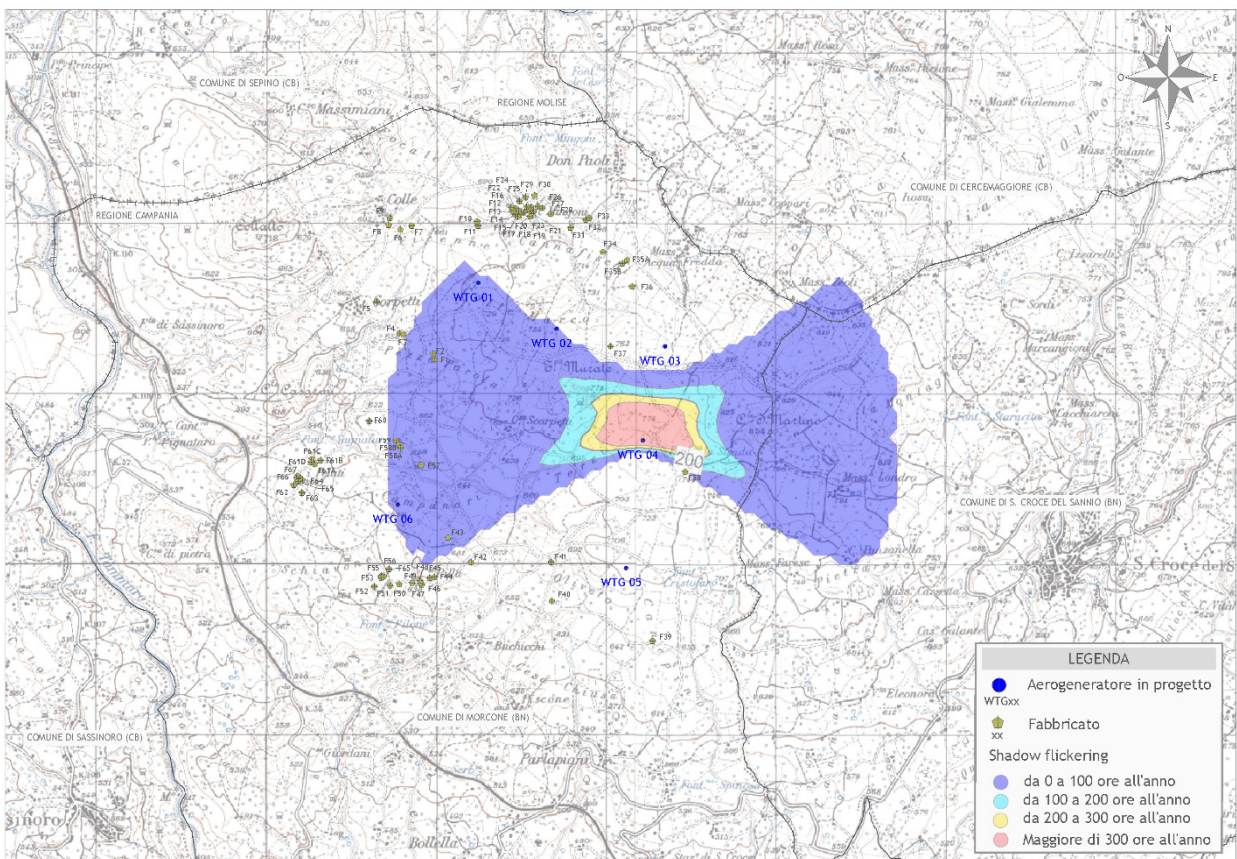


Figura 5 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 04

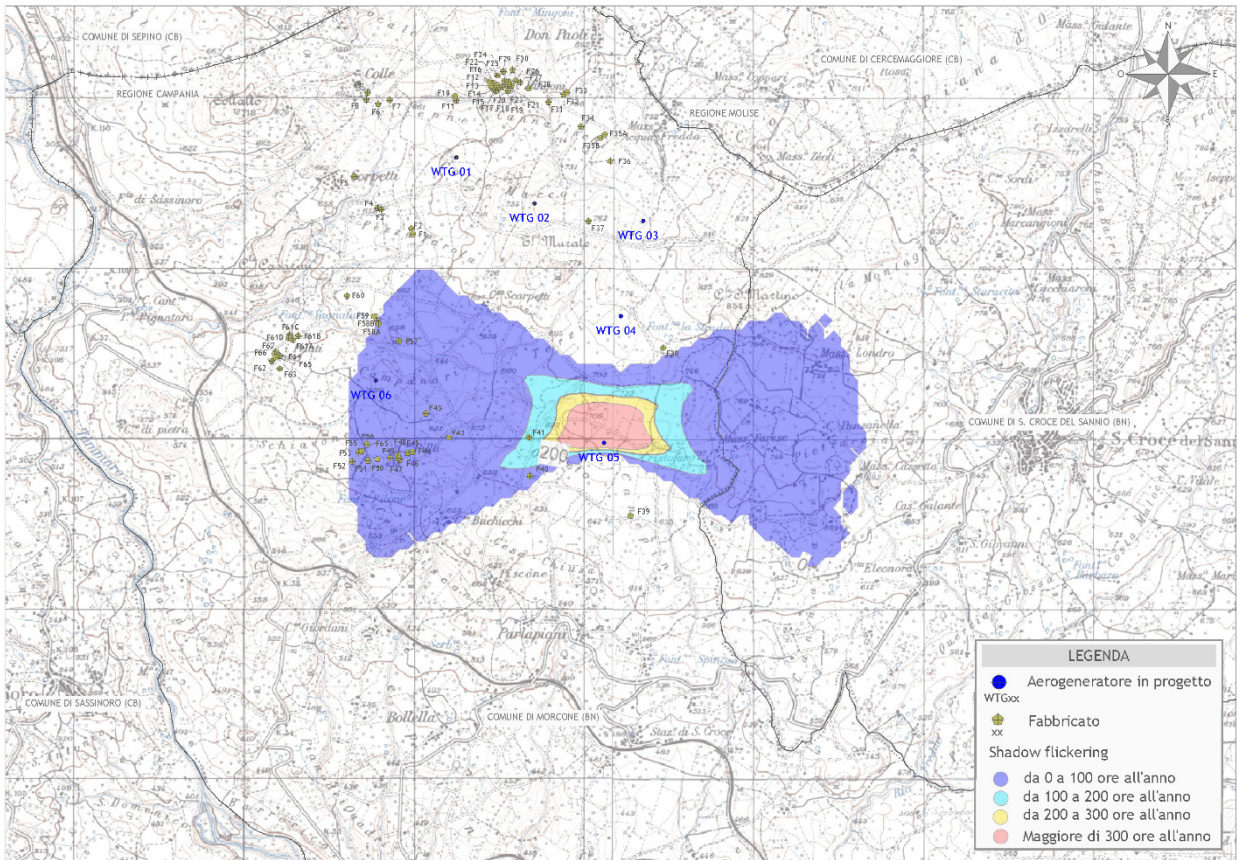


Figura 6 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 05

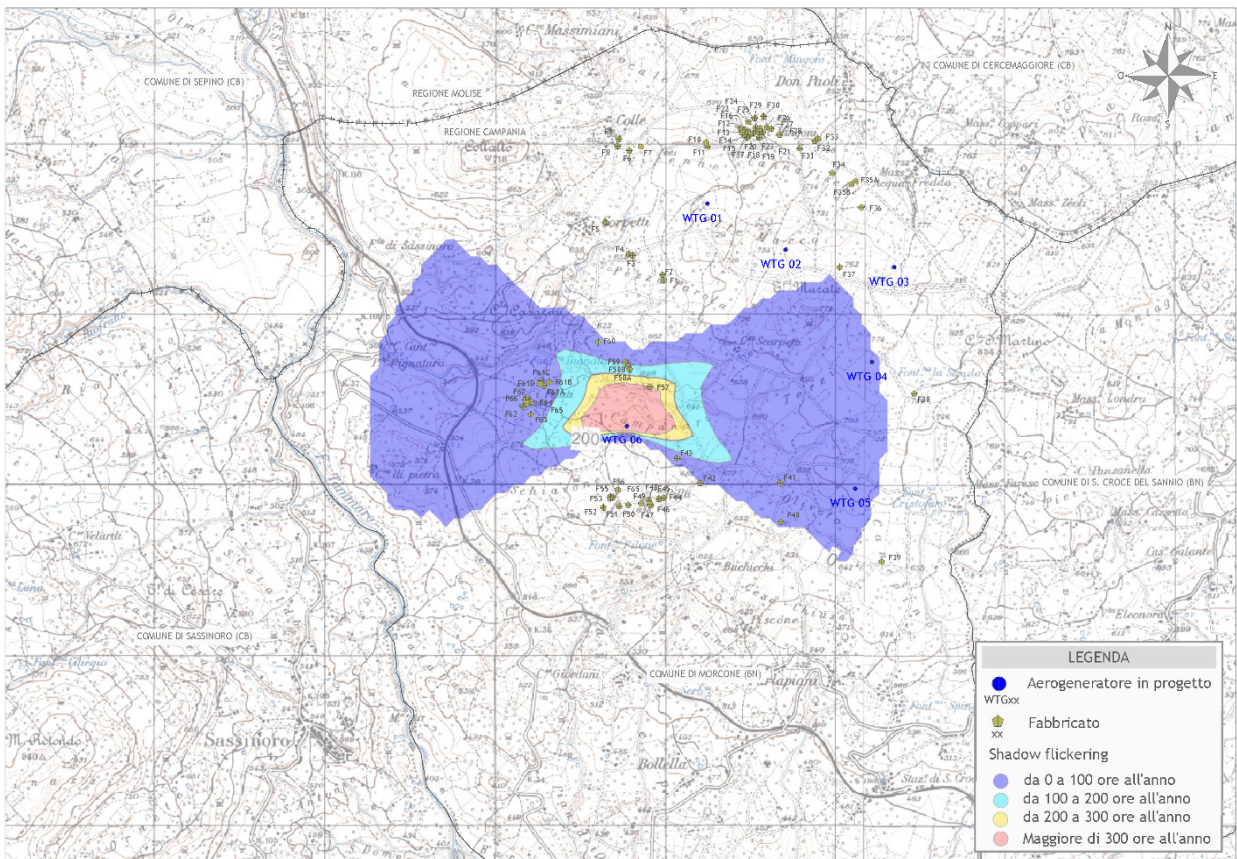


Figura 7 - Mappa di impatto potenziale per l'aerogeneratore WTG 06

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
8	473656	4583796	97	75	33
9	473663	4583836	118	85	38
17	474422	4583880	82	112	50
24	474491	4583899	82	98	43
26	474532	4583906	84	94	41
34	474917	4583638	146	162	71
35A	475056	4583591	162	161	71
42	474141	4581812	55	30	13
47	473843	4581692	44	19	8
50	473720	4581684	41	16	7
51	473665	4581676	39	14	6
54	473629	4581730	28	11	5
62	473101	4582264	75	58	26

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 13 potenziali recettori 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 fabbricati evidenziati, presso i quali l'effetto di shadow flickering potrebbe essere superiore a 40 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 ordinate sono riportati i giorni dell'anno e sull'asse delle ascisse l'ora del giorno.

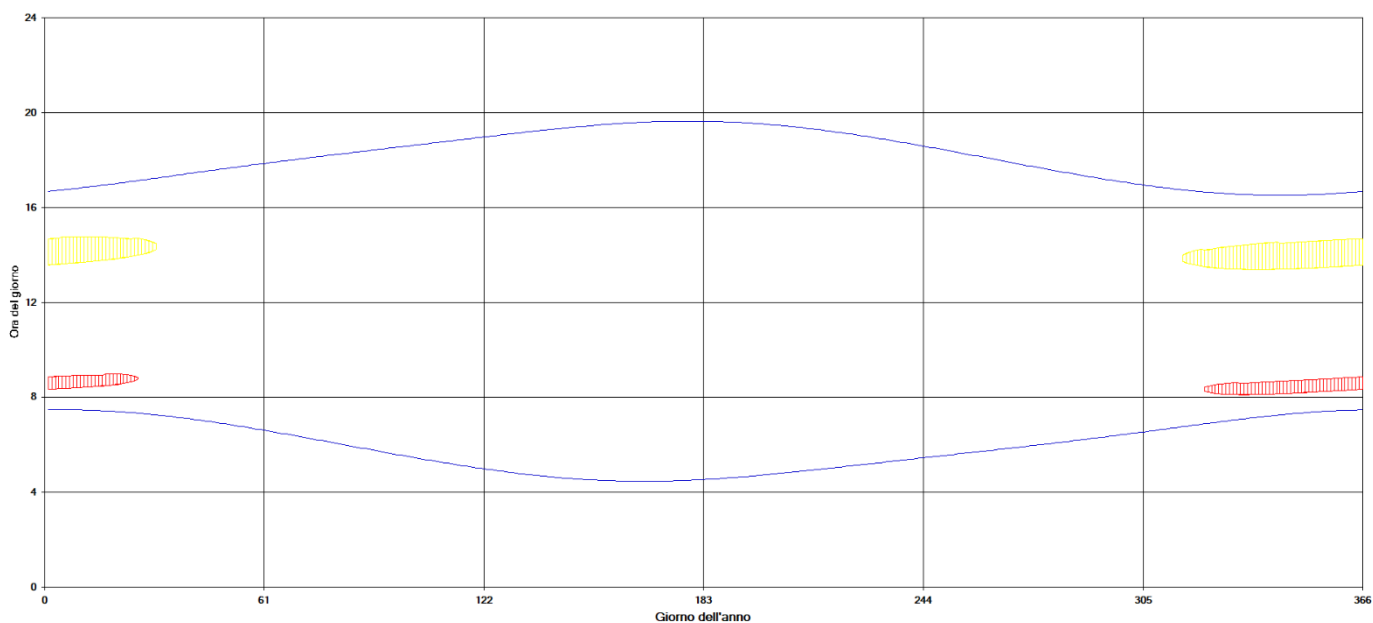


Figura 8 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 17

Dalla lettura del calendario in figura 8, si legge facilmente che, presso il fabbricato 17, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 01 dal 1° gennaio al 31 gennaio e dall'11 novembre al 31 dicembre tra le ore 13:25 e le 14:50 (macchia gialla);
- WTG 03 dal 1° gennaio al 26 gennaio e dal 17 novembre al 31 dicembre tra le ore 08:05 e le 09:00 (macchia rossa).

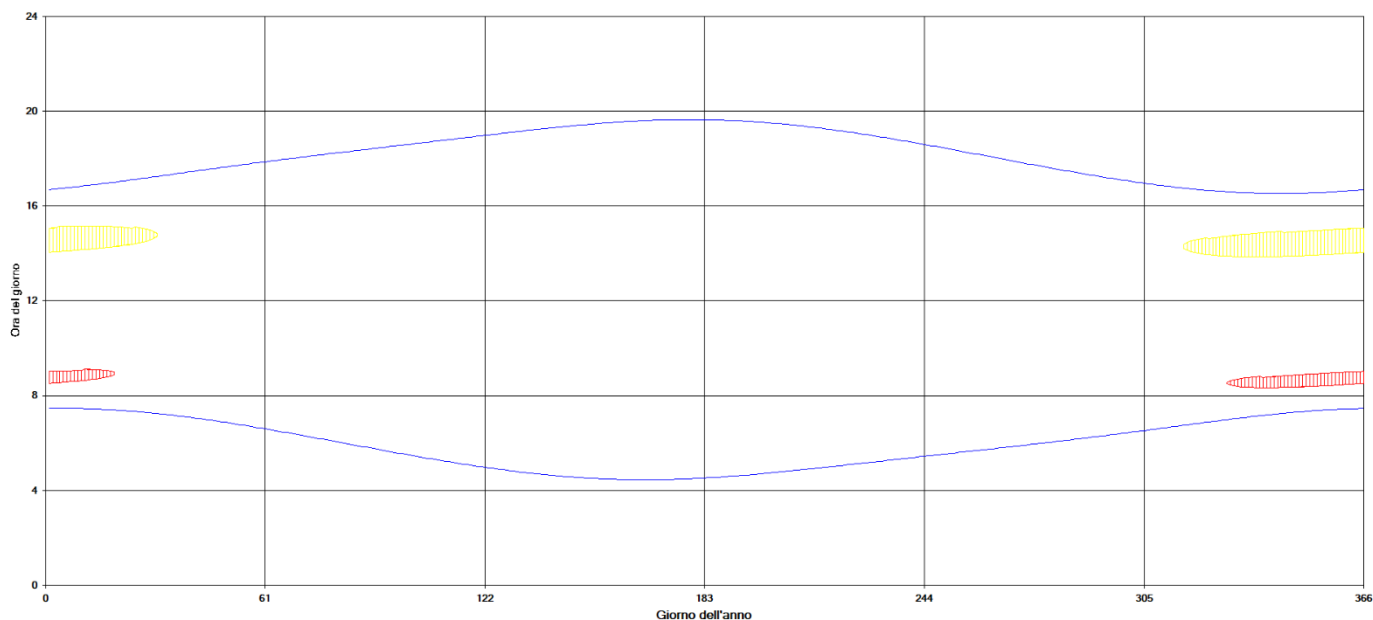


Figura 9 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 24

Dalla lettura del calendario in figura 9, si legge facilmente che, presso il fabbricato 24, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 01 dal 1° gennaio al 31 gennaio e dall'11 novembre al 31 dicembre tra le ore 13:50 e le 15:10 (macchia gialla);
- WTG 03 dal 1° gennaio al 19 gennaio e dal 23 novembre al 31 dicembre tra le ore 08:20 e le 09:05 (macchia rossa).

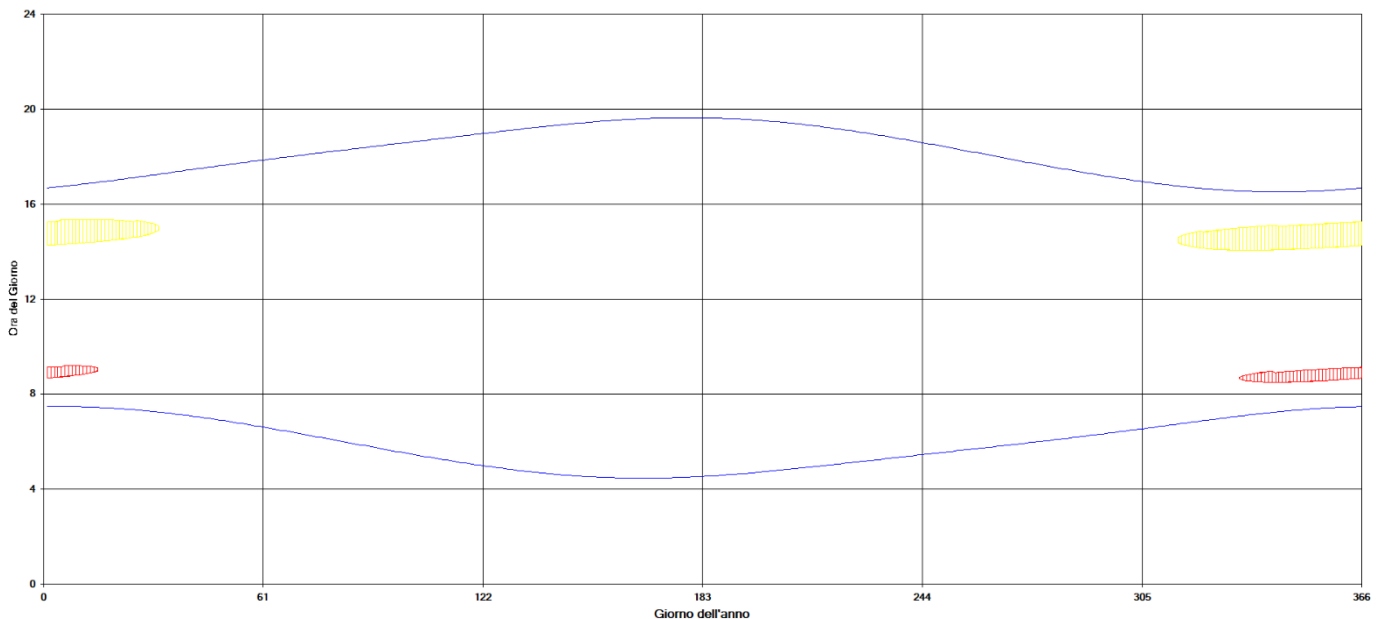


Figura 10 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 26

Dalla lettura del calendario in figura 10, si legge facilmente che, presso il fabbricato 26, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 01 dal 1° gennaio al 1° febbraio e dal 10 novembre al 31 dicembre tra le ore 14:05 e le 15:25 (macchia gialla);
- WTG 03 dal 1° gennaio al 15 gennaio e dal 27 novembre al 31 dicembre tra le ore 08:30 e le 09:10 (macchia rossa).

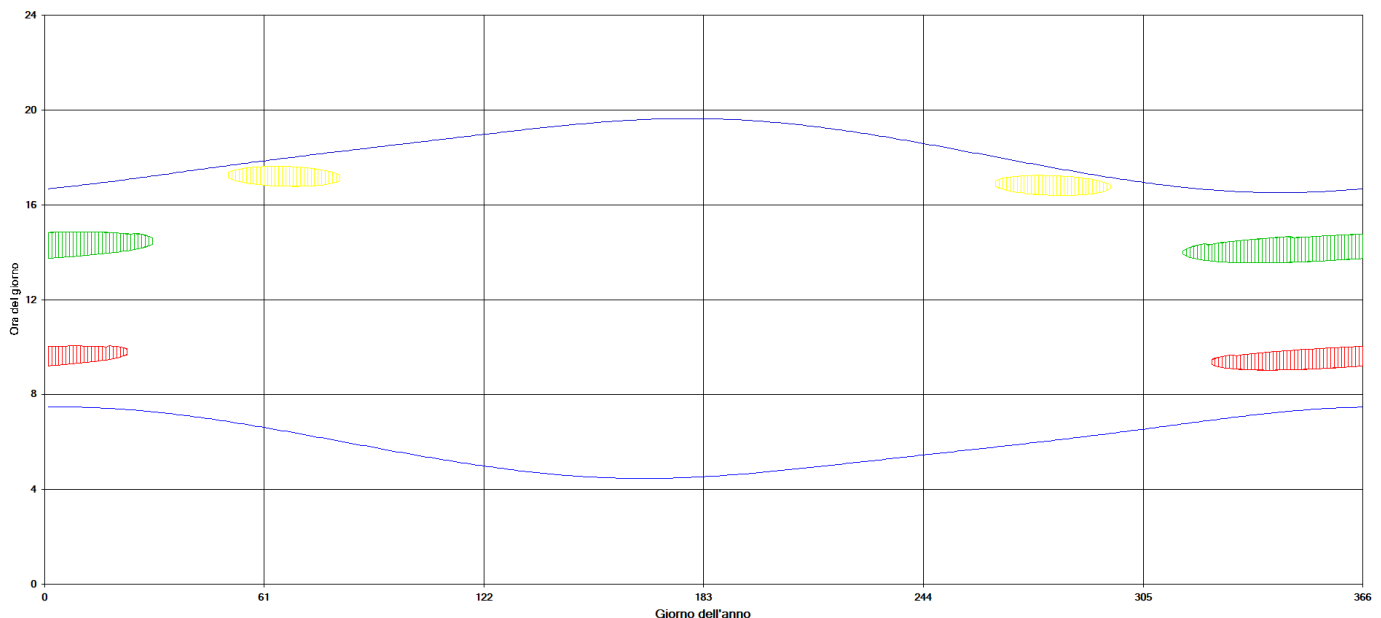


Figura 11 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 34

Dalla lettura del calendario in figura 11, si legge facilmente che, presso il fabbricato 34, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 01 dal 20 febbraio al 22 marzo e dal 20 settembre al 22 ottobre tra le ore 16:25 e le 17:40 (macchia gialla);
- WTG 02 dal 1° gennaio al 30 gennaio e dall'11 novembre al 31 dicembre tra le ore 13:35 e le 14:55 (macchia verde);
- WTG 03 dal 1° gennaio al 23 gennaio e dal 19 novembre al 31 dicembre tra le ore 09:00 e le 10:05 (macchia rossa).

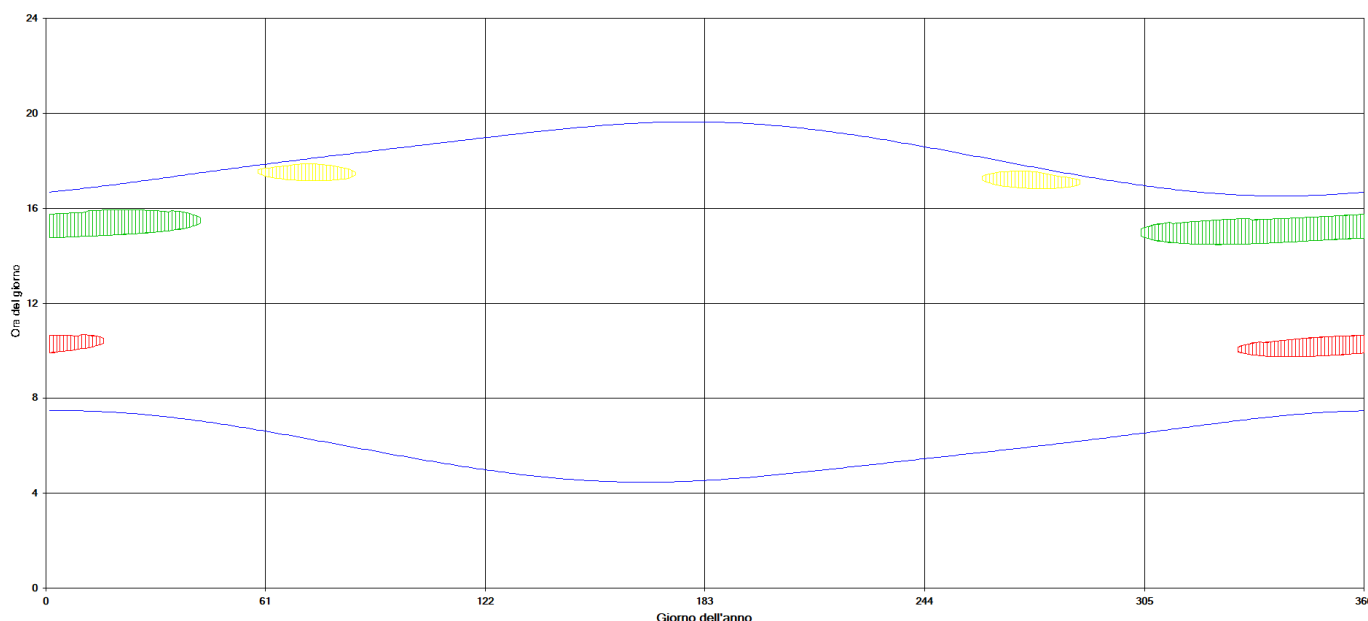


Figura 12 – Calendario dell'ombra nelle condizioni caso peggiore per il fabbricato 35A

Dalla lettura del calendario in figura 12, si legge facilmente che, presso il fabbricato 35A, il fenomeno dell'ombreggiamento si può verificare a causa degli aerogeneratori:

- WTG 01 dal 28 febbraio al 26 marzo e dal 16 settembre al 13 ottobre tra le ore 16:50 e le 17:55 (macchia gialla);
- WTG 02 dal 1° gennaio al 12 febbraio e dal 30 ottobre al 31 dicembre tra le ore 14:30 e le 15:55 (macchia verde);
- WTG 03 dal 1° gennaio al 16 gennaio e dal 26 novembre al 31 dicembre tra le ore 09:40 e le 10:40 (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 13 abitazioni (si veda tabella 4), incidendo in maniera trascurabile, in quanto il valore atteso è per tutti i recettori inferiore a 71 ore l'anno, e per la maggior parte di essi uguale o inferiore a 40 ore l'anno.

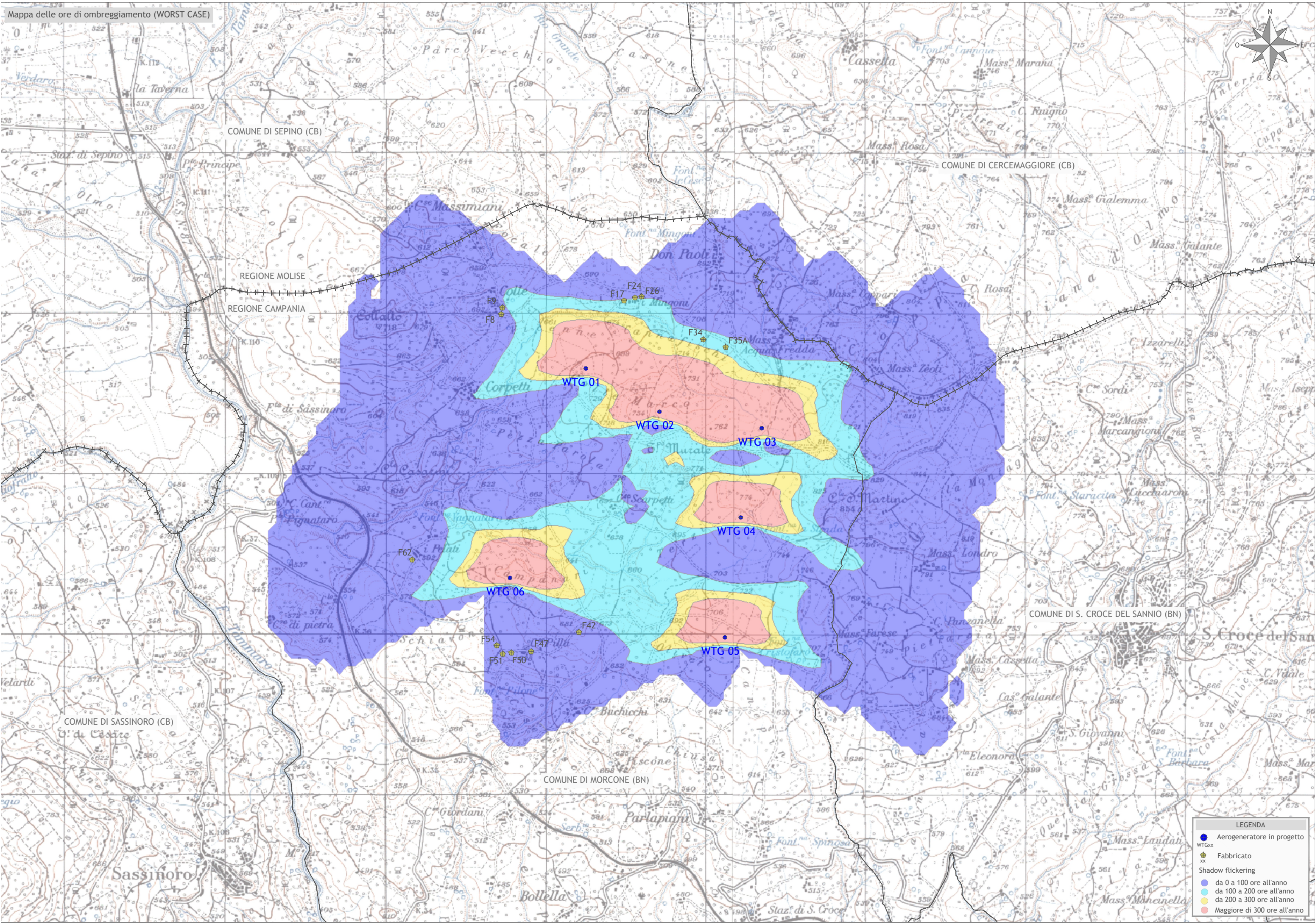
Va altresì sottolineato che:

- la velocità di rotazione delle turbine previste in progetto, del tipo General Electric, GE158 Cypress - HH 121 m (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 recettori. 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)





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