

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA DI BRINDISI
COMUNE DI BRINDISI

Parco Eolico "152 BRINDISI"
composto da 8 turbine da 6.2 MW ciascuna

R07

**ANALISI DEL FENOMENO DI
SHADOW FLICKERING**

Note:

Rev. 1 – modifiche al layout, elaborato da ACS/MG, approvato da MG, data: 23/01/2024

Rev. 0 - Prima emissione, elaborato da ACS/MG, approvato da MG, data: 30/11/2023



INTERPLAN

Progettista: INTERPLAN s.r.l.
via Papa Giovanni Paolo I, n. 12 - 70124 Bari
c.f. 04767360722
info@interplan.it

Progettista:
Ing. Axel Ceglie Swoboda
via Messina n. 4
721017 Brindisi
c.f. CGLXLA63B16Z102C

Progettista: Ing. Marcello Gatto
Ord. Ing. Bari n. 3965
via Papa Giovanni Paolo I, n. 12 - 70124 Bari
c.f. GTTMCL63A27A662K
marcello.gatto@interplan.it

Committente: Cubico Lidia s.r.l.
Via Alessandro Manzoni, 43 - 20100 Milano
P.IVA e Codice Fiscale 12943230966
pec: cubicolidia@legalmail.it

Sommario

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 2 |
| 2 | Parametri di calcolo utilizzati | 4 |
| 3 | Individuazione dei recettori sensibili | 7 |
| 4 | Analisi dei risultati | 7 |
| 4.1 | Misure di mitigazione..... | 8 |
| 5 | Conclusioni | 9 |
| 6 | Allegato 1: Calcoli | 10 |

Indice delle figure

| | |
|--|---|
| Figura 1 - formazione dell'ombra sul terreno | 3 |
| Figura 2 - Probabilità medie mensili di soleggiamento..... | 5 |
| Figura 3 - Curve di distribuzione di Weibull | 6 |
| Figura 4 - Ortofoto Agea 2019 del fabbricato (punto 6)..... | 8 |
| Figura 5 - Ortofoto Agea 2019 del fabbricato (punto 63)..... | 8 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|---|
| Tabella 1 - Coordinate e caratteristiche degli ostacoli..... | 4 |
| Tabella 2 – Caratteristiche geometriche degli aerogeneratori..... | 5 |
| Tabella 3 - Percentuale di tempo trascorsa in copertura nuvolosa..... | 5 |
| Tabella 4 – Recettori sensibili con ombreggiamento superiore a 50 h/anno..... | 7 |

1 Introduzione

Il presente elaborato riguarda lo studio dell'evoluzione dell'ombra (shadow flickering) per il progetto per la realizzazione di un **parco eolico** per la produzione industriale di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da **8 aerogeneratori** tripala ad asse orizzontale, ciascuno di potenza nominale pari a **6,2 MW**, per una potenza elettrica complessiva pari a **49,6 MW**. L'intervento è proposto dalla società Cubico Lidia s.r.l., con sede in Via Alessandro Manzoni, 43 - 20100 Milano, P.IVA e Codice Fiscale 12943230966, del gruppo **Cubico**, che ad oggi ha in Italia **46 impianti operativi**, con una potenza complessiva installata di ben **260 MW**, e molti altri nel mondo.

Lo shadow flickering (letteralmente ombreggiamento intermittente) è l'espressione comunemente utilizzata per descrivere l'effetto stroboscopico causato dal passaggio delle pale di una o più turbine eoliche attraverso i raggi del sole rispetto a recettori sensibili posti nelle loro immediate vicinanze.

Il periodico cambiamento dell'intensità della luce in prossimità dei recettori sensibili deve essere calcolato in modo da determinare il potenziale periodo di ombreggiamento generato dalle turbine. Il fenomeno generato si traduce in una variazione alternativa dell'intensità luminosa, che a lungo andare, può provocare fastidio agli occupanti delle abitazioni, in seguito recettori, le cui finestre risultino esposte al fenomeno.

La lunghezza dell'ombra, generata dal passaggio delle pale attraverso i raggi del sole, dipende dall'altezza del rotore e

dalla posizione del sole.

Sebbene il fenomeno possa essere percepito anche all'esterno dalle abitazioni, esso risulta evidente e fastidioso in quegli ambienti con finestre rivolte verso le ombre. 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 generale si può affermare che:

- Avendo le pale una forma rastremata con 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 recettore.
- 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 risulterà meno intenso e distinto.
- La presenza di schermature locali (come alberi interposti tra il recettore e la sorgente d'ombra) favorisce una diminuzione dell'effetto.

Il calcolo del potenziale periodo di ombreggiamento consiste nel determinare, attraverso software specifici, le ore di intermittenza annue cui ciascun recettore è sottoposto. Queste informazioni possono essere utilizzate per progettare e gestire la centrale eolica in modo da ridurre al minimo il disturbo causato alle persone.

Le condizioni per cui si formi l'ombra, e il recettore sia interessato da quest'ultima, sono mostrate in Figura 1. Da questa figura si evince che, affinché il recettore sia interessato dall'ombra, è necessario che quest'ultimo abbia una finestra in direzione del campo eolico, il sole sia relativamente basso nel cielo e soprattutto lo stesso si trovi posizionato a valle dell'asse sole turbina.

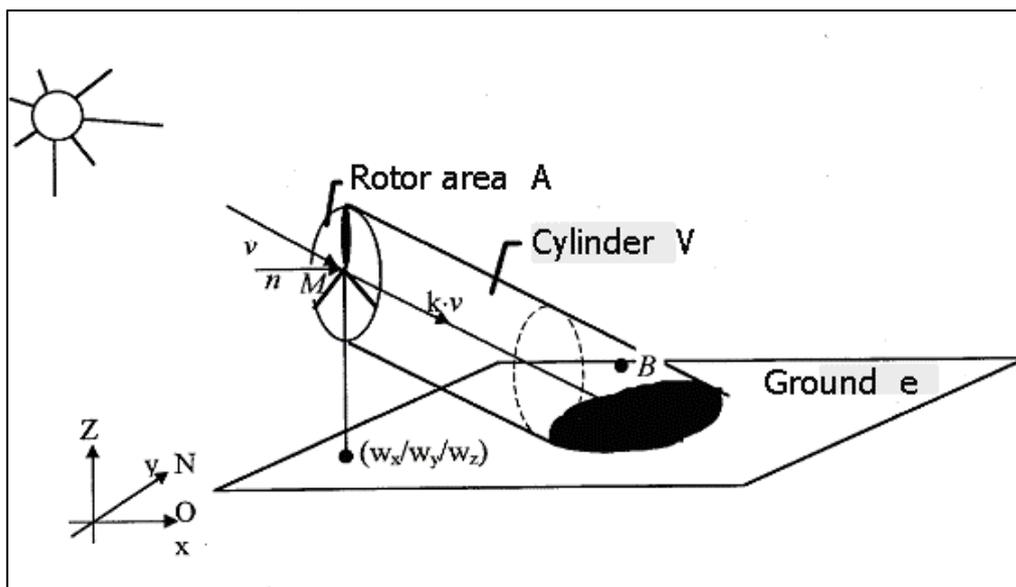


Figura 1 - formazione dell'ombra sul terreno

L'analisi dello studio dell'ombreggiamento dei parchi eolici ha lo scopo di ridurre al minimo il disturbo causato dalle turbine ai recettori sensibili e consente di fornire al controller delle turbine o allo SCADA system la data e le ore in cui lo shadow flicker si manifesta così da poter, in casi particolarmente disagiati, fermare le turbine durante l'acutizzarsi del fenomeno.

L'effetto dell'ombra intermittente 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, in particolare le **frequenze che possono provocare un senso di fastidio** sono comprese **tra i 2.5Hz ed i 20Hz** (Verkuijlen and Westra, 1984).

Tale problematica era rilevante in passato, quando gli aerogeneratori erano di dimensioni più contenute degli attuali e ruotavano a velocità maggiori. Gli attuali aerogeneratori tripala operano invece con velocità di rotazione inferiori.

I generatori previsti nel presente progetto raggiungono una velocità di rotazione massima di 9,5 rpm, cui corrisponde una **frequenza massima** nel passaggio dell'ombra di **0,475 Hz**.

Basterebbe già questa considerazione per concludere circa l'**assenza di effetti negativi** dovuti all'ombra degli aerogeneratori; tuttavia, è stata condotta una analisi più dettagliata, al fine di meglio verificare ogni possibile impatto.

2 Parametri di calcolo utilizzati

Nei calcoli condotti si è preso in considerazione:

- La posizione delle turbine;
- L'altezza al mozzo e il diametro del rotore della turbina scelta;
- La posizione dei recettori sensibili;
- La latitudine e longitudine, il fuso orario e l'ora legale della zona di interesse;
- le informazioni riguardo l'orbita terrestre e la rotazione rispetto al sole;
- probabilità mensile di presenza del sole;
- l'angolo minimo del sole rispetto all'orizzonte da cui calcolare l'ombreggiamento;
- la distanza massima di estensione dell'ombra dietro la turbina;
- minima percentuale di copertura del sole dalla pala;
- intervallo di tempo per il calcolo dell'ombreggiamento.

La posizione delle turbine è riportata nella tabella che segue. La turbina prescelta ha un'altezza del mozzo (altezza dell'asse del rotore) pari a 119 m, mentre il diametro del rotore è di 162 m.

| Aerogeneratore | Coordinate UTM33N | Coordinate WGS84 | Quota Terreno | Altezza Ostacolo | Quota al top |
|----------------|---------------------|--------------------|---------------|------------------|--------------|
| 10 | 737287.4, 4506008.7 | 40.67084, 17.80735 | 32,26 | 200 | 232,26 |
| 20 | 738786.1, 4505408.2 | 40.66501, 17.82483 | 23,70 | 200 | 223,70 |
| 30 | 739906.5, 4505324 | 40.66392, 17.83804 | 29,90 | 200 | 229,90 |
| 40 | 736745.5, 4505106.8 | 40.66288, 17.8006 | 34,86 | 200 | 234,86 |
| 50 | 737988.4, 4505189.4 | 40.66327, 17.81532 | 33,57 | 200 | 233,57 |
| 60 | 738147.7, 4504572.9 | 40.65768, 17.81697 | 37,63 | 200 | 237,63 |
| 70 | 739647.4, 4504379.3 | 40.6555, 17.83462 | 33,73 | 200 | 233,73 |
| 80 | 739850.2, 4506351.2 | 40.67318, 17.83776 | 15,68 | 200 | 215,68 |

Tabella 1 - Coordinate e caratteristiche degli ostacoli

Per quanto riguarda la scelta degli altri parametri, è opportuno tener presente che il caso peggiore si ottiene assimilando il rotore ad una vera e propria sfera. Statisticamente questa condizione non è la migliore rappresentazione della realtà, in quanto la distribuzione del vento, nei diversi settori della rosa dei venti, fa sì che il rotore non sia sempre orientato in corrispondenza dei recettori e soprattutto non sia sempre in movimento.

Pertanto, è necessario selezionare degli opportuni fattori correttivi come di seguito descritti. In assenza di normative nazionali, sono state prese come riferimento le linee guida tedesche, contenenti limiti e condizioni per il calcolo dell'impatto derivante dallo Shadow Flickering.

| Caratteristiche salienti degli aerogeneratori | |
|--|---------|
| Diametro rotore | 162 m |
| Altezza asse del rotore | 119 m |
| Massimo numero di giri | 9,5 rpm |
| Velocità di cut-in | 3 m/s |
| Velocità di cut-off | 25 m/s |

Tabella 2 – Caratteristiche geometriche degli aerogeneratori

Pertanto, nel calcolo si farà riferimento ai seguenti valori:

- L'angolo minimo del sole rispetto all'orizzonte deve essere pari a 3°;
- La percentuale di copertura del sole dalla pala deve essere almeno del 20%;
- Massima distanza entro cui calcolare l'effetto= 1km
- Valori medi mensili di soleggiamento come rilevati.

In relazione a quest'ultimo punto, la statistica di probabilità mensile di presenza del sole è stata dedotta dalla stazione meteorologica di Brindisi Casale, nei pressi del sito, che dispone di statistiche ultratrentennali circa le ore mensili di soleggiamento da cui sono state dedotte le probabilità mensili di soleggiamento qui di seguito riportate.

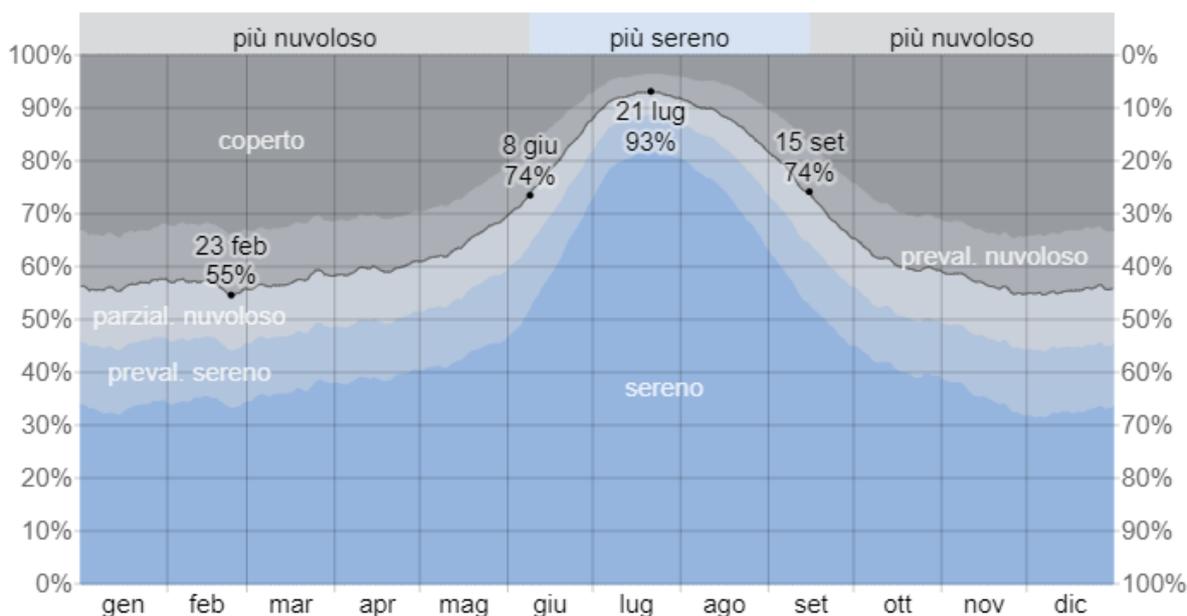


Figura 2 - Probabilità medie mensili di soleggiamento

| Frazione | gen | feb | mar | apr | mag | giu | lug | ago | set | ott | nov | dic |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Più nuvoloso | 44% | 43% | 43% | 40% | 35% | 21% | 8% | 13% | 27% | 39% | 43% | 45% |
| Più sereno | 56% | 57% | 57% | 60% | 65% | 79% | 92% | 87% | 73% | 61% | 57% | 55% |

Tabella 3 - Percentuale di tempo trascorsa in copertura nuvolosa

Il calcolo dell'ombreggiamento è stato fatto considerando il tempo di reale funzionamento delle turbine. Infatti, considerando le caratteristiche anemometriche del sito, descritte in una separata relazione, emerge che per circa il 20% del tempo la velocità del vento è inferiore a quella di cut-in, o superiore a quella di cut-off, per cui la turbina non può risultare in produzione. Si riporta a tal proposito la curva di distribuzione di Weibull calcolata per le condizioni anemometriche del sito.

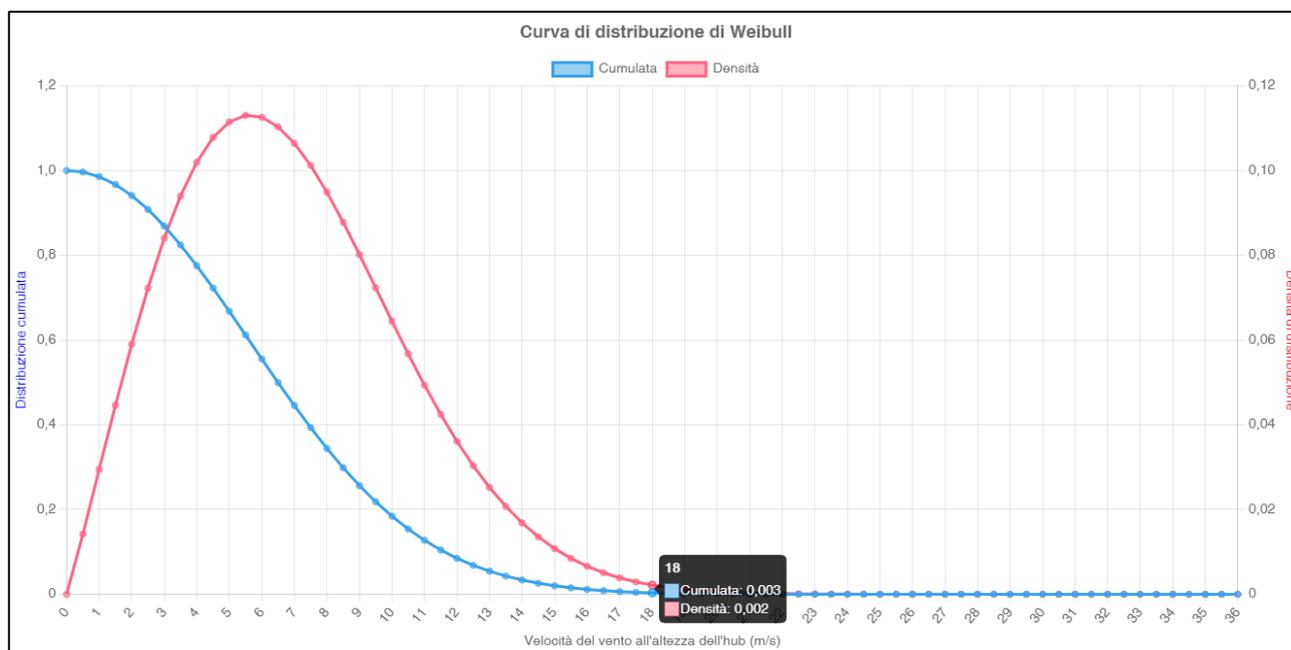


Figura 3 - Curve di distribuzione di Weibull

Inoltre, la turbina può risultare ferma per manutenzione o per un problema di rete. Si è pertanto ritenuto di dover introdurre un coefficiente di disponibilità totale pari a 0,95.

Nei calcoli sono stati pertanto utilizzati i seguenti fattori correttivi:

- coefficiente di producibilità $C_{pd} = 0.8$
- coefficiente di disponibilità $C_{dt} = 0.95$

Il modello matematico così generato non tiene invece conto dei seguenti fattori:

- orientamento del rotore rispetto al recettore;
- orientamento del rotore rispetto al sole;
- presenza di ostacoli e schermature

Le prime due voci riguardano le modalità semplificate di schematizzazione del rotore, ipotizzato come una **sfera**. Ciò equivale a considerare l'ombra del rotore nelle peggiori condizioni, cioè come se il vento spirasse sempre dalla direzione del sole ed il rotore fosse orientato ortogonalmente rispetto alla posizione del recettore. Ovviamente nella realtà il rotore può spesso trovarsi disposto perpendicolarmente rispetto al sole, in una condizione tale da non creare disturbo. Pertanto, i calcoli che derivano dall'emettere questa condizione conducono a risultati assai cautelativi.

Analogamente, non è stata considerata la presenza di ostacoli e schermature, inclusi alberi, costruzioni e le stesse pareti: gli edifici sono stati schematizzati come fossero **trasparenti**! Anche in questo caso, quindi, il risultato dei calcoli conduce a risultati cautelativi.

3 Individuazione dei recettori sensibili

Ai fini della previsione degli impatti indotti dell'impianto in oggetto sono state individuate le posizioni di possibili 'recettori sensibili' nelle immediate vicinanze del parco eolico.

Le posizioni sono state individuate posizioni in prossimità di tutte le costruzioni presenti in un raggio di 1 km dagli aerogeneratori, come risultanti dalle visure catastali. Per ciascuna posizione è stato calcolata la durata del fenomeno di shadow flickering "geometrico", espressa in ore, nonché il suo valore corretto per tener conto degli effetti dell'eliofania e dei coefficienti di producibilità e disponibilità.

Di tutti i punti calcolati vengono classificati come "recettori sensibili" solo quelli in prossimità di edifici appartenenti alle categorie catastali da A1 a A10 e B1-B2-B5-D4-D10.

In allegato 1 sono stati riportati i risultati delle elaborazioni.

4 Analisi dei risultati

Le elaborazioni per il calcolo dell'ombreggiamento provocato dalle turbine eoliche hanno considerato 56 recettori sensibili posti nel raggio di 1 km dagli aerogeneratori. Oltre tale distanza, l'ombra cessa di essere un problema perché il rapporto tra lo spessore della pala e il diametro del sole diventa così piccolo da poter essere trascurato. Di essi, solo 25 risultano interessati dal fenomeno.

Per tutti i possibili recettori sensibili il valore di ombreggiamento calcolato è inferiore a 60 h/anno (valore peraltro assai cautelativo, per quanto si è detto circa il modello di calcolo).

Solamente due punti hanno riportato valori di ombreggiamento superiore a 50 h/anno. Essi sono indicati nella tabella che segue.

| Riferimento | Categoria catastale | Foglio | Particella | SF geometrico, ore | SF con eliofania, ore | SF corretto, ore annue |
|-------------|---------------------|--------|------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| 6 | A03 | 17 | 690 | 98 | 76,45 | 58,1 |
| 63 | F02 | 18 | 672 | 126 | 70,92 | 53,9 |

Tabella 4 – Recettori sensibili con ombreggiamento superiore a 50 h/anno

Il fabbricato in prossimità del punto 6 (categoria catastale A3) riceve ombra dall'aerogeneratore 20, posto a sud-est dell'abitazione. Come si può osservare dalla ortofoto che segue, tale ombra è nei fatti schermata dagli alberi presenti in prossimità dell'abitazione, oltre che dall'assenza di aperture sulla parete Est.



Figura 4 - Ortofoto Agea 2019 del fabbricato (punto 6)

Il fabbricato in prossimità del punto 63 (fabbricato rurale) riceve ombra dall'aerogeneratore 20, posto a sud-est dell'abitazione. Anche in questo caso l'ombra è schermata dagli alberi presenti in prossimità dell'abitazione e dalle pareti.



Figura 5 - Ortofoto Agea 2019 del fabbricato (punto 63)

4.1 Misure di mitigazione

In generale, è possibile considerare le seguenti misure di mitigazione per il fenomeno dello shadow flickering:

- Realizzazione di schermature o alberature, in modo da rendere impercettibile il fenomeno;
- Arresto programmato dell'aerogeneratore nei momenti in cui esso possa proiettare ombra disturbante.

5 Conclusioni

Le analisi condotte hanno evidenziato che in tutte le posizioni considerate il fenomeno dello shadow-flickering si può manifestare al più per 58,1 ore/anno (valore calcolato ampiamente per eccesso).

Solo due recettori sensibili sono ubicati in posizione tale da poter percepire l'ombra alternata del rotore di un aerogeneratore per un periodo di tempo significativo, superiore a 50 ore all'anno.

Tuttavia, tali fabbricati risultano parzialmente schermati dagli alberi e sono privi di ampie superfici vetrate in direzione dell'aerogeneratore, il che rende il **fenomeno impercettibile**.

Inoltre, ove il fenomeno fosse percettibile, esso risulterebbe comunque **innocuo**, in considerazione della frequenza particolarmente bassa del passaggio dell'ombra, mai superiore a 0.475 Hz.

Allo stato attuale non risultano dunque necessari interventi di mitigazione.

6 Allegato 1: Calcoli

| Riferimento | Categoria catastale | Foglio | Particella | SF geometrico, ore | SF con eliofania, ore | SF corretto, ore annue |
|-------------|---------------------|--------|------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| 6 | A03 | 17 | 690 | 98 | 76,45 | 58,1 |
| 63 | F02 | 18 | 672 | 126 | 70,92 | 53,9 |
| 204 | FR | 18 | 597 | 75 | 46,19 | 35,1 |
| 64 | A04 | 18 | 637 | 66 | 46 | 35 |
| 10 | Fdir | 17 | 838 | 64 | 40,13 | 30,5 |
| 116 | FR | 17 | 838 | 63 | 39,51 | 30 |
| 205 | FR | 18 | 598 | 48 | 30,62 | 23,3 |
| 114 | FR | 17 | 697 | 35 | 27,89 | 21,2 |
| 206 | A03 | 17 | 80 | 39 | 24,53 | 18,6 |
| 105 | A07 | 19 | 457 | 22 | 16,72 | 12,7 |
| 115 | FR | 17 | 842 | 21 | 13,88 | 10,5 |
| 100 | FR | 17 | 4 | 18 | 11,44 | 8,7 |
| 202 | A04 | 18 | 510 | 15 | 10,13 | 7,7 |
| 301 | FR | 18 | 603 | 15 | 9,15 | 7 |
| 306 | FR | 19 | 656 | 16 | 9,16 | 7 |
| 217 | F02 | 19 | 687 | 16 | 8,8 | 6,7 |
| 300 | FR | 18 | 602 | 13 | 7,85 | 6 |
| 105 | A03 | 17 | 66 | 11 | 7,74 | 5,9 |
| 0 | A04 | 17 | 937 | 11 | 7,47 | 5,7 |
| 61 | F02 | 18 | 651 | 11 | 7,38 | 5,6 |
| 108 | A07 | 18 | 608 | 12 | 6,79 | 5,2 |
| 316 | FR | 18 | 13 | 7 | 4,72 | 3,6 |
| 107 | A03 | 18 | 511 | 6 | 3,42 | 2,6 |
| 5 | FR | 17 | 706 | 5 | 3,33 | 2,5 |
| 212 | F02 | 17 | 882 | 2 | 1,3 | 1 |
| 101 | A02 | 19 | 661 | 0 | 0 | 0 |
| 106 | A03 | 19 | 645 | 0 | 0 | 0 |
| 110 | A03 | 18 | 606 | 0 | 0 | 0 |
| 208 | A03 | 18 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| 104 | A04 | 18 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| 209 | A04 | 18 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| 210 | A04 | 18 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| 920 | A04 | 40 | 294 | 0 | 0 | 0 |
| 1002 | A04 | 5 | 31 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | A07 | 19 | 576 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | A07 | 19 | 651 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | A07 | 19 | 631 | 0 | 0 | 0 |
| 111 | A07 | 18 | 512 | 0 | 0 | 0 |
| 1000 | A07 | 19 | 580 | 0 | 0 | 0 |
| 1001 | A07 | 5 | 163 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | F02 | 19 | 732 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | F02 | 19 | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 911 | F02 | 17 | 878 | 0 | 0 | 0 |
| 996 | F02 | 40 | 332 | 0 | 0 | 0 |
| 998 | F02 | 19 | 697 | 0 | 0 | 0 |
| 999 | F02 | 19 | 582 | 0 | 0 | 0 |
| 997 | F04 | 19 | 454 | 0 | 0 | 0 |
| 303 | FR | 19 | 22 | 0 | 0 | 0 |
| 304 | FR | 19 | 136 | 0 | 0 | 0 |

| Riferimento | Categoria catastale | Foglio | Particella | SF geometrico, ore | SF con eliofania, ore | SF corretto, ore annue |
|--------------------|----------------------------|---------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 305 | FR | 19 | 655 | 0 | 0 | 0 |
| 307 | FR | 18 | 520 | 0 | 0 | 0 |
| 308 | FR | 18 | 521 | 0 | 0 | 0 |
| 309 | FR | 18 | 522 | 0 | 0 | 0 |
| 310 | FR | 18 | 523 | 0 | 0 | 0 |
| 311 | FR | 18 | 524 | 0 | 0 | 0 |
| 312 | FR | 18 | 525 | 0 | 0 | 0 |