

REGIONE: PUGLIA

PROVINCIA: LECCE

Comune di Guagnano

ELABORATO:

S.7

OGGETTO:

**PARCO EOLICO DA 6 WTG da 6 MW/CAD E SISTEMA
DI ACCUMULO DELL'ENERGIA DA 18 MW**

PROGETTO DEFINITIVO

GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

PROPONENTE:



SORGENIA RENEWABLES S.R.L.

Via A. Algardi, 4

20148 Milano (MI)

sorgenia.renewables@legalmail.it

PROGETTISTI:



ing. Massimo CANDEO

Ordine Ing. Bari n° 3755

Via Cancellotto, 3

70125 Bari

Mobile 328.9569922

m.candeo@pec.it

ing. Gabriele CONVERSANO

Ordine Ing. Bari n° 8884

Via Garruba, 3

70122 Bari

Mobile 328 6739206

gabrieleconversano@pec.it

Collaborazione:

Ing. Antonio CAMPANALE

Ordine Ing. Bari n° 11123

Note:

Maggio 2022	1	Revisione	Ing. Antonio Campanale Ing. Gabriele Conversano	ing. Massimo Candeco
Settembre 2021	0	Emissione	Ing. Antonio Campanale Ing. Gabriele Conversano	ing. Massimo Candeco
DATA	REV	DESCRIZIONE	ELABORATO da:	APPROVATO da:

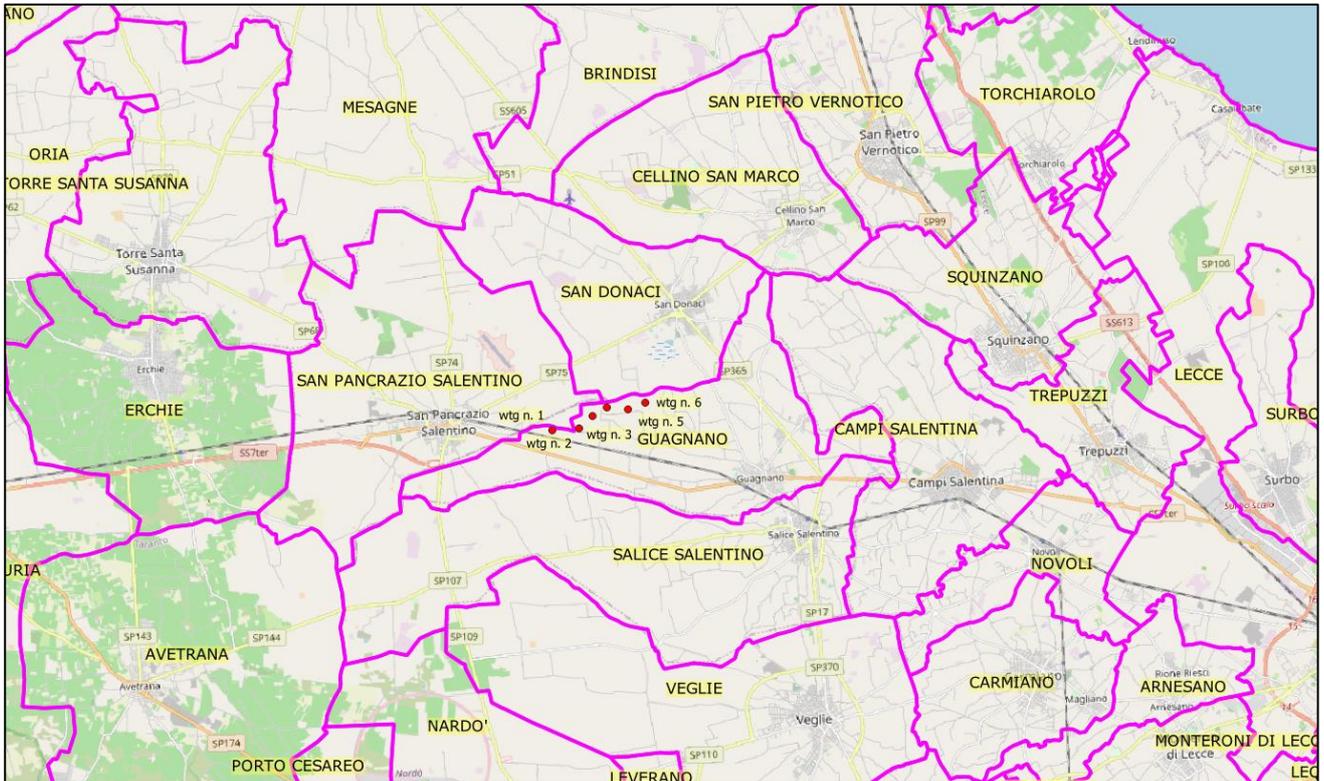
PROPRIETÀ ESCLUSIVA DELLE SOCIETÀ SOPRA INDICATE,
UTILIZZO E DUPLICAZIONE VIETATE SENZA AUTORIZZAZIONE SCRITTA

SOMMARIO

1	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	3
2	INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....	4
3	STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE	6
4	CONCLUSIONI.....	11

1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

La presente relazione contiene l'analisi della Gittata massima degli elementi rotanti per gli aerogeneratori di un progetto per la realizzazione di un impianto eolico in Agro del Comune di Guagnano (LE), costituito da 6 aerogeneratori tripala (WTG) ad asse orizzontale, ciascuno di potenza nominale pari a 6 MW, per una potenza elettrica complessiva pari a 36 MW e di un sistema di accumulo dell'energia di potenza pari a 18 MW.



Inquadramento a scala ampia dell'area di intervento con limiti comunali

In particolare l'area oggetto di intervento è ubicata nei pressi, ma ad adeguata distanza, dalla SS7 ter e da Castello Monaci e nelle vicinanze della SP 365 Guagnano – San Donaci e della SP75 San Pancrazio Salentino – San Donaci.

Di seguito è riportato un inquadramento su ortofoto del layout dell'impianto, in cui sono mostrate le posizioni degli aerogeneratori, la viabilità di nuova realizzazione ed il percorso del cavidotto di connessione alla rete elettrica nazionale.



Inquadramento a scala ridotta dell'area di intervento

WTG	COMUNE	Estremi catastali		Coordinate WGS84 UTM 33N	
		Fg.	P.IIa	E	N
1	Guagnano	18	15	744009	4477909
2	Guagnano	5	156	744833	4477978
3	Guagnano	5	147	745227	4478343
4	Guagnano	6	214	745667	4478611
5	Guagnano	6	133	746313	4478532
6	Guagnano	6	149	746825	4478756

Layout di progetto – Posizione aerogeneratori

2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala o un frammento della stessa) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse.

Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzata con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche.

L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato), ed i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto.

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni.

Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto dalla fulminazione in accordo alla norma IEC 61400-24 – livello I.

Pertanto possiamo sicuramente affermare che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è del tutto trascurabile.

Il problema del calcolo della gittata di elementi rotanti è stato analizzato principalmente dal costruttore VESTAS¹.

Nello studio citato la VESTAS ha determinato la distanza che la pala di un aerogeneratore raggiunge in caso di distacco dal mozzo mentre la pala è in rotazione per otto modelli di aerogeneratori, aventi lunghezza delle pale da 25 a 54,6 metri e velocità di rotazione da 26rpm a 17.7 rpm (ovviamente con gli aerogeneratori aventi pale di maggiore dimensione che funzionano a velocità di rotazione inferiori). Nello studio sono state considerate tre condizioni:

- moto in assenza di attrito dell'aria;
- moto in presenza di attrito dell'aria
- moto in presenza di attrito dell'aria e di rotazioni intorno agli assi della pala.

Come riportato nello studio, la prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%.

I risultati dello studio della VESTAS sono stati che, in ipotesi conservative la gettata massima per i modelli testati, diminuiva sostanzialmente all'aumentare delle dimensioni delle pale e del diminuire del numero di giri.

Fa eccezione, come si può notare, il caso della V112 3MW per la quale è stata calcolata una gittata di 147 metri, ma ciò è dovuto al fatto che l'altezza del mozzo è più elevata (119 metri) e che la velocità di rotazione è comunque più elevata rispetto alle V82, V90 e V100.

¹ VESTAS - *Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento*

Tabella 1 – Gittata calcolata nello studio Vestas citato per varie tipologie di aerogeneratore

Modello	Lunghezza pala	velocità rotazione	altezza mozzo	gittata
	<i>m</i>	<i>rpm</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
V80 - 2MW	39	19,2	80	125
V52 - 850kW	26	25	75	130
V82 - 1,65	40	14,4	78	103
V90-2MW	44	14,9	105	118
V90-3MW	44	16,1	105	77
V100 - 1,8MW	49	16,6	95	104
V112 - 3MW	54,6	17,7	119	147

Si nota immediatamente che la massima gittata calcolata è inferiore ai 150 metri per tutte le tipologie di aerogeneratori oggetto di studio.

3 STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE

Uno studio rigoroso del problema della gittata degli elementi rotanti richiede la conoscenza di elementi progettuali che sono in possesso unicamente del costruttore delle turbine (tra questi, in particolare, l'evoluzione delle sezioni, dei pesi e dei coefficienti di portanza e resistenza lungo l'aerogeneratore).

Qui di seguito saranno di seguito effettuate alcune assunzioni in vantaggio di sicurezza e sarà modellata la traiettoria di una pala con riferimento a tali assunzioni ed i risultati saranno confrontati con quelli ottenuti dalla VESTAS per aerogeneratori di taglia, dimensioni e velocità di rotazione comparabili, al fine di verificare se la stima ottenuta è coerente con stime effettuate in casi analoghi.

3.1 ANALISI DISTACCO INTERA PALA

L'analisi sarà effettuata mediante un modello cinematico semplificato, in cui le approssimazioni effettuate sono tutte in vantaggio di sicurezza.

E' infatti stata trascurata l'energia cinetica dissipata in fase di rottura, che fa sì che la velocità di partenza dell'ipotetico proiettile non possa essere pari alla velocità di rotazione della pala, ed è stato altresì trascurato l'effetto di attrito dell'aria, che causerebbe un rallentamento della pala ed una conseguente minore distanza percorsa.

Il modello di seguito descritto ed applicato è pertanto relativo al moto di un proiettile scagliato verso l'alto nelle condizioni più sfavorevoli.

L'aerogeneratore modello SIEMENS GAMESA SG170 ha le seguenti caratteristiche:

- lunghezza pala 85 m;
- altezza al mozzo pari a 115 metri.

Come noto la condizione di massima gittata si ottiene per un proiettile in partenza con un angolo di 45° verso l'alto rispetto all'orizzontale, pertanto il caso considerato sarà di distacco di una delle tre pale dell'aerogeneratore esattamente in tale condizione. In assenza di migliori dati da parte del costruttore, si assume inoltre che il baricentro sia ubicato circa a 1/3 della lunghezza della pala (28 metri dal centro di rotazione). In tali ipotesi l'altezza del baricentro della pala è ubicata a 135 m dal suolo.

Si consideri ora che la massima velocità di è di 13 rpm.

A 13 rpm la velocità tangenziale del baricentro della pala è di 27,2 m/s. Considerando una inclinazione di 45° verso l'alto di tale velocità, si ottiene la seguente composizione delle velocità iniziali:

- velocità iniziale orizzontale: 27,2 m/s
- velocità iniziale verticale: 27,2 m/s.

A questa composizione delle velocità corrisponde un tempo di volo di atterraggio di circa 8,71 secondi, cui corrisponde una distanza percorsa in orizzontale di 237 metri circa, cui sono da sommare i 57 metri di lunghezza tra il baricentro (cui si riferiscono i calcoli) e la punta della pala, ottenendo un risultato di 294 metri.

La stima ottenuta, pari a 294 m, rappresenta la massima distanza alla quale può atterrare la punta della pala a seguito di distacco dall'aerogeneratore.

Ovviamente la stima è effettuata in condizioni di grande sicurezza perché:

- non tiene conto della resistenza dell'aria che rallenta il moto sull'asse orizzontale (è stato modellato come moto rettilineo uniforme);
- non tiene conto della enorme dissipazione di energia che, comunque, si avrebbe al momento del distacco per vincere la resistenza del vincolo della pala all'aerogeneratore: infatti quand'anche si consideri il caso di distacco della pala dalla navicella, è evidente che il dispendio di energia cinetica per rompere il vincolo con l'aerogeneratore non può essere nullo

Alle pagine seguenti sono mostrati inquadramenti su Ortofoto delle posizioni di progetto degli aerogeneratori con evidenziato un buffer di 294 metri intorno a ciascuna posizione. Negli inquadramenti sono altresì mostrate le posizioni di tutti gli edifici presenti in zona.

Come si può notare dagli stralci cartografici **nel buffer di 294 metri dalle altre WTG non sono presenti edifici di alcuna natura.**

3.2 ANALISI DEL DISTACCO DI UN FRAMMENTO DI PALA

3.2.1 ANALISI DEL DISTACCO IN IPOTESI SEMPLIFICATA DI MOTO A PROIETTILE

Ipotesi:

- **attrito nullo;**
- **massima velocità della pala;**
- **nessuna energia spesa per il distacco del frammento**
- **Angolo di gittata massimo**

Risultati

	tempo di volo	velocità iniziale lungo x	distanza
Frammento di 10 metri	17.3	75.4	1315
Frammento di 5 metri	17.9	78.6	1416

3.3 ANALISI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELL'AEROGENERATORE

Il modello di aerogeneratore adottato è il SIEMENS-GAMESA SG170 6.0 MW che ha una Potenza Nominale pari a 6,0 MW e sarà costituito da una torre di sostegno tubolare metallica a tronco di cono, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 200 mt rispetto al suolo, con rotore di diametro massimo pari a 170m.

All'interno della documentazione tecnica prodotta dal produttore degli aerogeneratori, vengono indicati i sistemi di sicurezza dell'aerogeneratore, che si allegheranno a fine relazione.

3.3.1 I SISTEMI DI CONTROLLO E GESTIONE DEGLI AEROGENERATORI

I sistemi di sicurezza e controllo sono valutati secondo la norma EN ISO 13849-2:20142014 – Sicurezza del macchinario – Parti dei sistemi di controllo relative alla sicurezza – Parte 2: Convalida.

I sistemi di sicurezza mitigano il rischio oltre ad altre misure di protezione.

Tutte le parti rotanti e le aree ad alta tensione sono coperte da protezioni che richiedono uno strumento per la rimozione.

Post valutazione del rischio sono stati individuati i seguenti sistemi di sicurezza:

- Protezione da eccesso di velocità
- Protezione da eccesso di vibrazione
- Attivazione pulsante di arresto di emergenza
- Protezione antitorsione del cavo.

La **protezione da eccesso di velocità** utilizza sensori interni per determinare la velocità del rotore e quindi confrontarla con limiti predeterminati. Quando la protezione si attiva (in caso di eccesso di velocità), manda la turbina eolica in modalità di arresto.

La **protezione da vibrazioni e urti eccessivi** è costituita da un dispositivo di rilevamento delle vibrazioni strutturali nelle turbine eoliche, posizionato sulla sommità della torre.

Il dispositivo è configurato per regolare in sicurezza il pitch della pala in caso di forti vibrazioni della sommità della torre o se la navicella è esposta a uno shock meccanico.

Il sistema è progettato per soddisfare i requisiti di sicurezza PLd di Categoria 3 secondo ISO 13849-1:2015.

Ciascuna turbina è dotata di **pulsanti di arresto di emergenza** in vari punti della navicella e della torre. La funzionalità di questi pulsanti di arresto è progettata secondo i requisiti della ISO 13850:2015, ed il sistema soddisfa i requisiti di sicurezza PLd di Categoria 3 secondo ISO 13849-1:2015.

La funzione di arresto di emergenza prevale sia sui sistemi di controllo che su quelli di protezione (arresto di imbardata, vibrazioni, velocità eccessiva...), ed è principalmente prevista per la protezione delle persone. Si basa solo su sistemi meccanici e fail-safe.

A protezione in caso di guasto del sistema di controllo dell'imbardata, la torre è dotata di una **protezione antitorsione del cavo**, che consente alla turbina eolica di girare in entrambe le direzioni rispetto alla posizione zero solo entro limiti predeterminati. Il sistema soddisfa i requisiti di sicurezza PLc di Categoria 1 secondo ISO 13849-1:2015.

3.3.2 PROTEZIONE E RILEVAMENTO DEL GHIACCIO

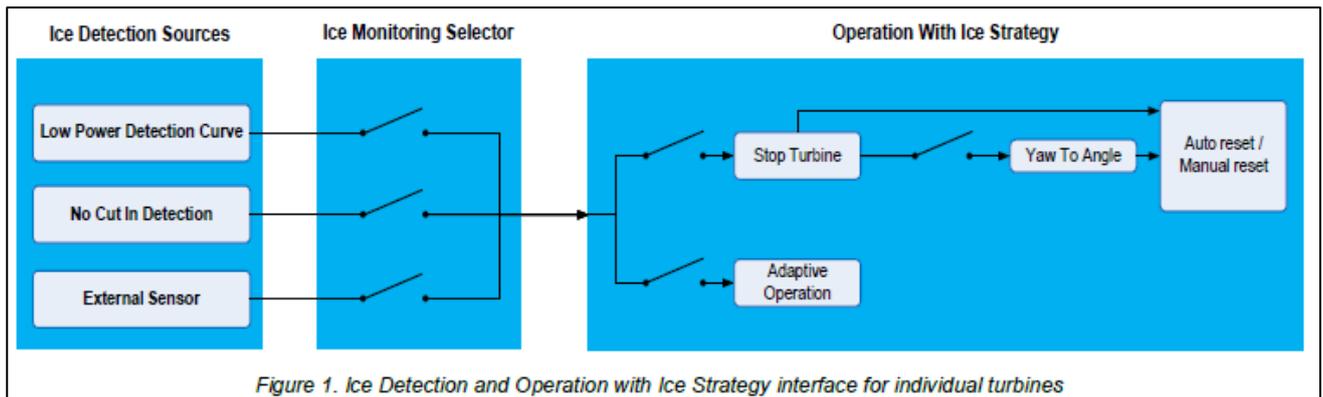
Le WTG sono dotate di un sistema di rilevamento del ghiaccio che consente il funzionamento in sicurezza anche in condizioni di ghiaccio sulla pala, configurabile per lavorare in massima produzione o in massima sicurezza.

Il sistema può utilizzare per il rilevamento della presenza di ghiaccio:

- Curva di rilevamento bassa potenza (LPDC)
- Mancato rilevamento del cut-in
- Un sensore esterno, posizionato sulla navicella o sulla pala.

Una volta che il ghiaccio è stato rilevato, viene gestita la seguente risposta:

- Arrestare la turbina, in attesa di riarmo automatico o riarmo manuale
- Arrestare la turbina ed impostare l'imbardata a un angolo specifico
- Adaptive Operation, funzionamento continuo con ottimizzazione della curva di potenza

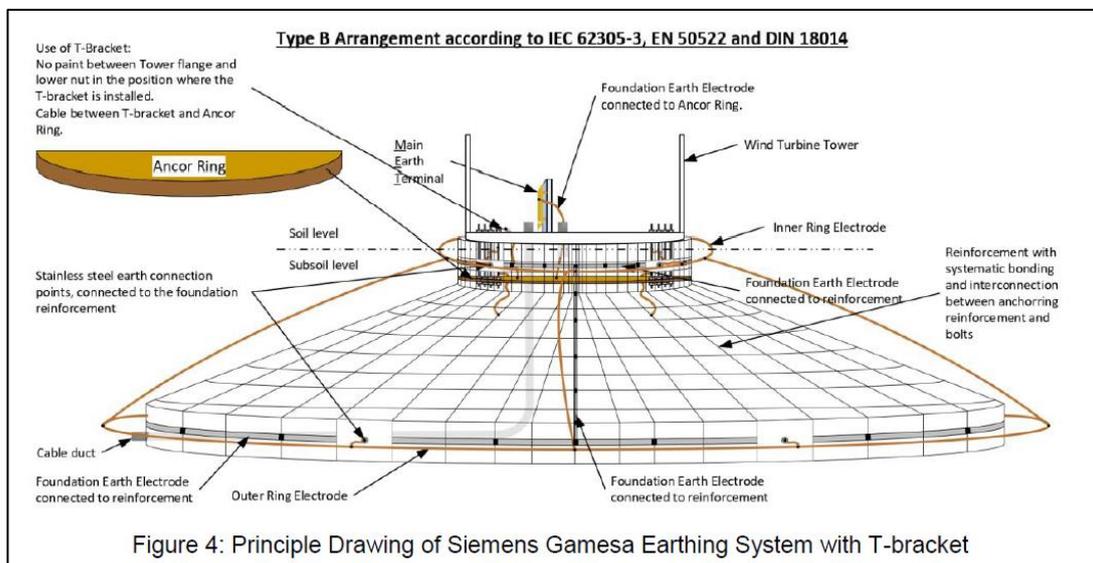


La figura seguente mostra una visualizzazione delle opzioni disponibili e di come sono collegate.

3.3.3 PROTEZIONE CONTRO LA FULMINAZIONE

La progettazione complessiva del Lightning Protection System rispetta la norma IEC 61400-24:2019 "Sistemi di generatori eolici - Parte 24 Protezione contro i fulmini" oltre che la norma IEC 62305-1:2010 "Protezione contro i fulmini - Parte 1: Principi generali, livello di protezione contro i fulmini I".

All'interno di questo sistema di protezione contro la fulminazione, la torre funge da parte di collegamento naturale fornendo un collegamento conduttivo dalla navicella alla terra. L'impianto di messa a terra dell'aerogeneratore sarà collegato ad idoneo impianto di messa a terra di completamento. Tutti i cavi che escono/entrano nella turbina eolica saranno schermati.



Schema tipico impianto di messa a terra dell'aerogeneratore

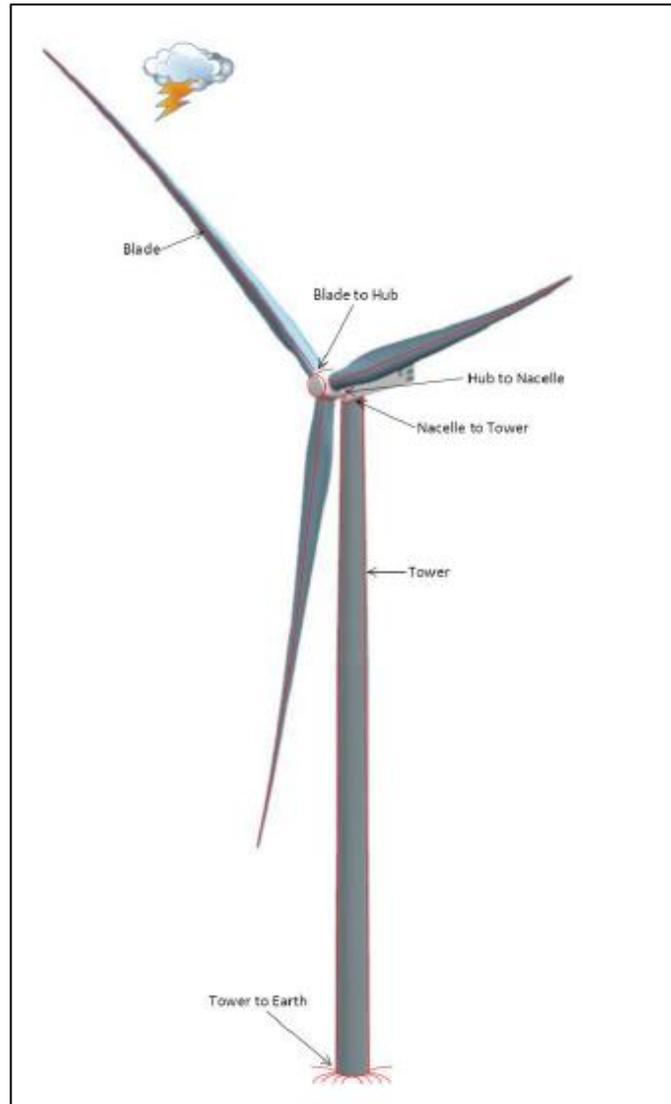


Figura: Messa a terra dell'aerogeneratore

Si allegano i seguenti documenti tecnici redatti dal produttore dell'aerogeneratore:

- D2047461_007 SGRE ON Siemens Gamesa 5.X Lightning Protection and Earthing
- D2097468_012 SGRE ON Siemens Gamesa 5.X Ice Detection Strategy and Operation with Ice
- D2097486_003 SGRE ON Siemens Gamesa 5.X Safety System

4 CONCLUSIONI

In conclusione:

- **la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è certamente inferiore a 294 metri;**
- **Nel buffer di 294 metri dai luoghi di installazione delle torri è presente solo ed esclusivamente un impianto fotovoltaico di piccole dimensioni e che è interessato di poco all'interno del raggio d'azione di distacco del rotore.**

- **Data la presenza di sistemi di protezione dell'aerogeneratore è altamente improbabile che avvenga la rottura degli elementi rotanti. Tali sistemi, in caso di minima anomalia arrestano la rotazione, evitando dunque che un frammento di dimensioni pari a 5 o 10 m possano cadere ad elevate distanze, come da modello matematico.**

Si ritiene che non sussistano quindi problemi di sicurezza legati alla ipotetica (remota) gittata di elementi rotanti.

STRALCI CARTOGRAFICI SU ORTOFOTO
CON INDICAZIONE DI UN BUFFER DI 294 METRI
INTORNO A CIASCUNA WTG IN PROGETTO

