

# AUTORIZZAZIONE UNICA EX D. LGS. N. 387/2003



## PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO ALIANO



Titolo elaborato:

### ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

| LT      | GD     | GD      | EMISSIONE                       | 11/05/22 | 0   | 0 |
|---------|--------|---------|---------------------------------|----------|-----|---|
| REDATTO | CONTR. | APPROV. | DESCRIZIONE REVISIONE DOCUMENTO | DATA     | REV |   |

#### PROPONENTE



**POWER PRIME S.R.L.**

VIA G. GARIBALDI N. 15  
74023 GROTTAGLIE (TA)

#### CONSULENZA



**GE.CO.D'ORS.R.L.**

VIA G. GARIBALDI N. 15  
74023 GROTTAGLIE (TA)

#### PROGETTISTA

ING. GAETANO D'ORONZIO  
VIA GOITO 14 – COLOBRARO (MT)

Codice  
ALSA122

Formato  
A4

Scala  
/

Foglio  
1 di 27

## Sommarrio

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | PREMESSA   | 3  |
| 2.  | CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE           | 3  |
| 2.1 | CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE           | 6  |
| 2.2 | Viabilità e piazzole                                   | 8  |
| 2.3 | Sottostazione elettrica di trasformazione utente (SEU) | 10 |
| 2.4 | BESS   | 11 |
| 2.5 | Linee elettriche di collegamento MT                    | 13 |
| 2.6 | Stazione di condivisione                               | 14 |
| 2.7 | Linea AT di collegamento alla RTN                      | 16 |
| 2.8 | Stallo arrivo produttore                               | 17 |
| 3.  | STUDI CONDOTTI sugli incidenti                         | 18 |
| 4.  | CAUSE DI ROTTURA DELLA PALA O PARTE DI ESSA            | 18 |
| 5.  | STUDIO DELLA GITTATA                                   | 19 |
| 6.  | ANALISI TEORICA DEL MOTO DI ROTAZIONE COMPLESSO        | 21 |
| 7.  | CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA                          | 23 |
| 8.  | CONCLUSIONI  | 27 |

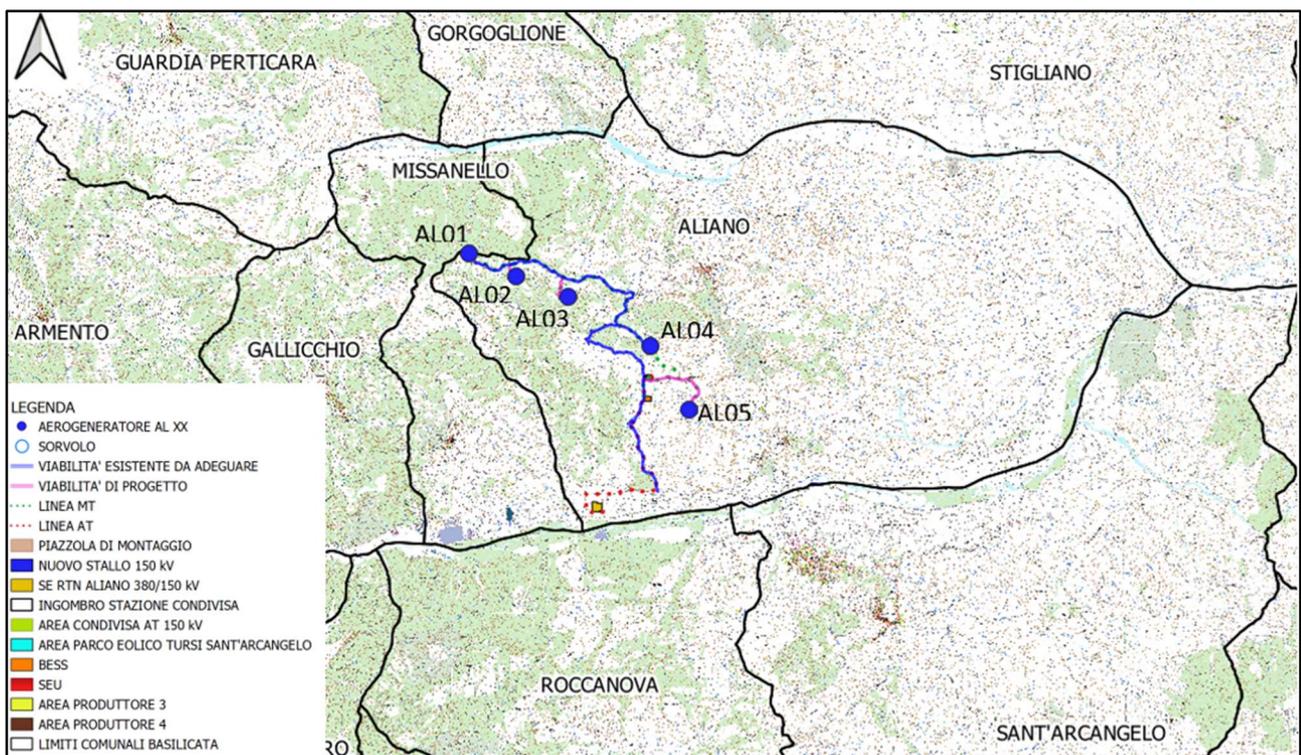
## 1. PREMESSA

Nella presente trattazione è affrontato lo studio e il calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore o di un frammento della stessa nell'ambito del Parco Eolico Aliano situato nella Regione Basilicata in Provincia di Matera.

## 2. CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE

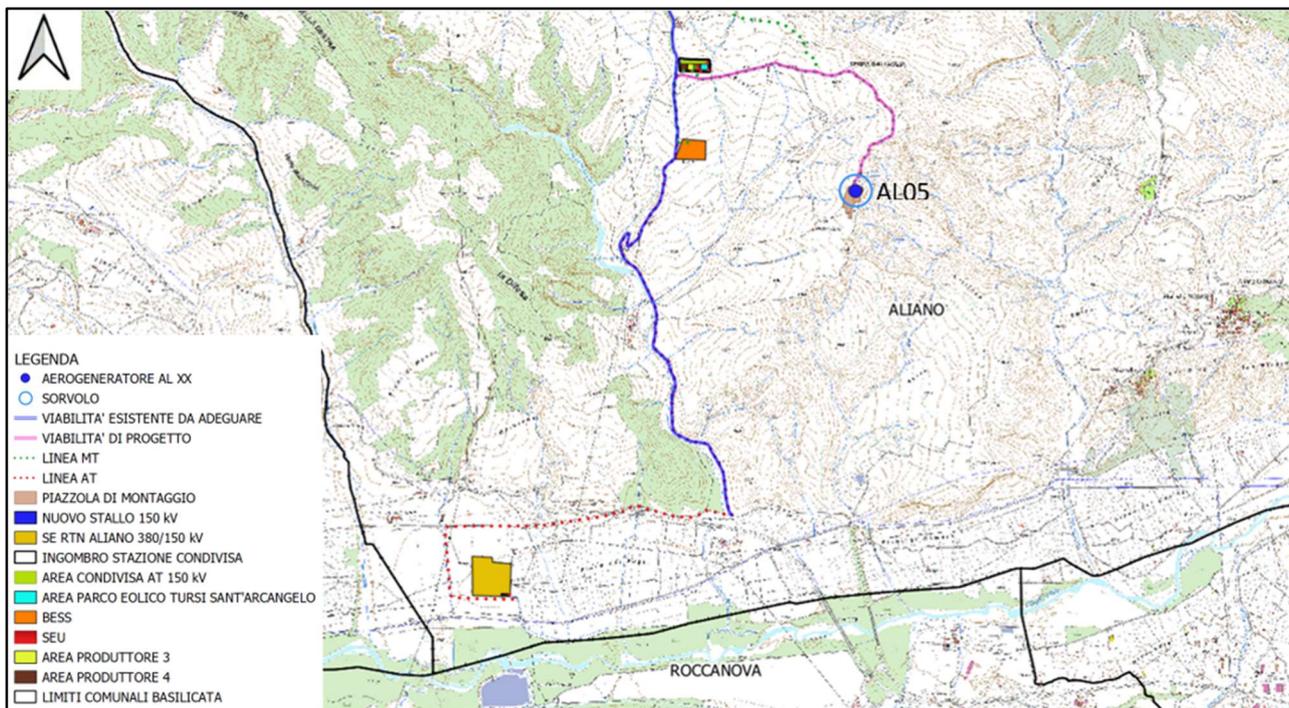
L'impianto eolico presenta una potenza nominale totale in immissione pari a 45 MWp ed è costituito da n. 5 aerogeneratori di potenza nominale pari a 6.2 MWp, per un totale di 31 MWp, con altezza torre pari a 135 m e rotore pari a 170 m e un sistema di accumulo di energia (BESS, Battery Energy Storage System) di potenza pari a 14 MWp.

L'impianto interessa esclusivamente il Comune di Aliano ove ricadano i 5 aerogeneratori, il BESS, la sottostazione elettrica di trasformazione 150/33 kV, la sottostazione condivisa e la stazione elettrica SE RTN Terna 380/150 kV all'interno della quale verrà realizzato il nuovo stallo AT 150 kV (Figura 2.1).



**Figura 2.1:** Inquadramento territoriale - Limiti amministrativi comuni interessati

La soluzione di connessione (soluzione tecnica minima generale STMG - codice pratica del preventivo di connessione C.P. 202101502), prevede che l'impianto eolico venga collegato in antenna a 150 kV su un nuovo stallo della Stazione Elettrica di Trasformazione (SE) a 380/150 kV denominata "Aliano".



**Figura 2.2:** Soluzione di connessione alla RTN in corrispondenza della SSE RTN Terna 380/150 kV Aliano

Il Gestore ha inoltre prescritto che lo stallo che sarà occupato dall'impianto dovrà essere condiviso con altri produttori e al fine verrà realizzata una stazione elettrica condivisa con altri produttori.

La connessione a 150kV della Sottostazione elettrica utente (SEU) alla suddetta stazione RTN sarà realizzata tramite la costruzione di una stazione elettrica condivisa con altri produttori e mediante la posa in opera, su strade esistenti o da realizzarsi per lo scopo, di linee AT interrate per una lunghezza complessiva di circa 6 km.

Le turbine eoliche e il BESS verranno collegate attraverso un sistema di linee elettriche interrate di media tensione da 33 kV allocate prevalentemente in corrispondenza del sistema di viabilità interna che servirà per la costruzione e la gestione futura dell'impianto. Tale sistema di viabilità verrà realizzato prevalentemente adeguando il sistema viario esistente e realizzando nuovi tratti di raccordo per consentire il transito dei mezzi eccezionali.

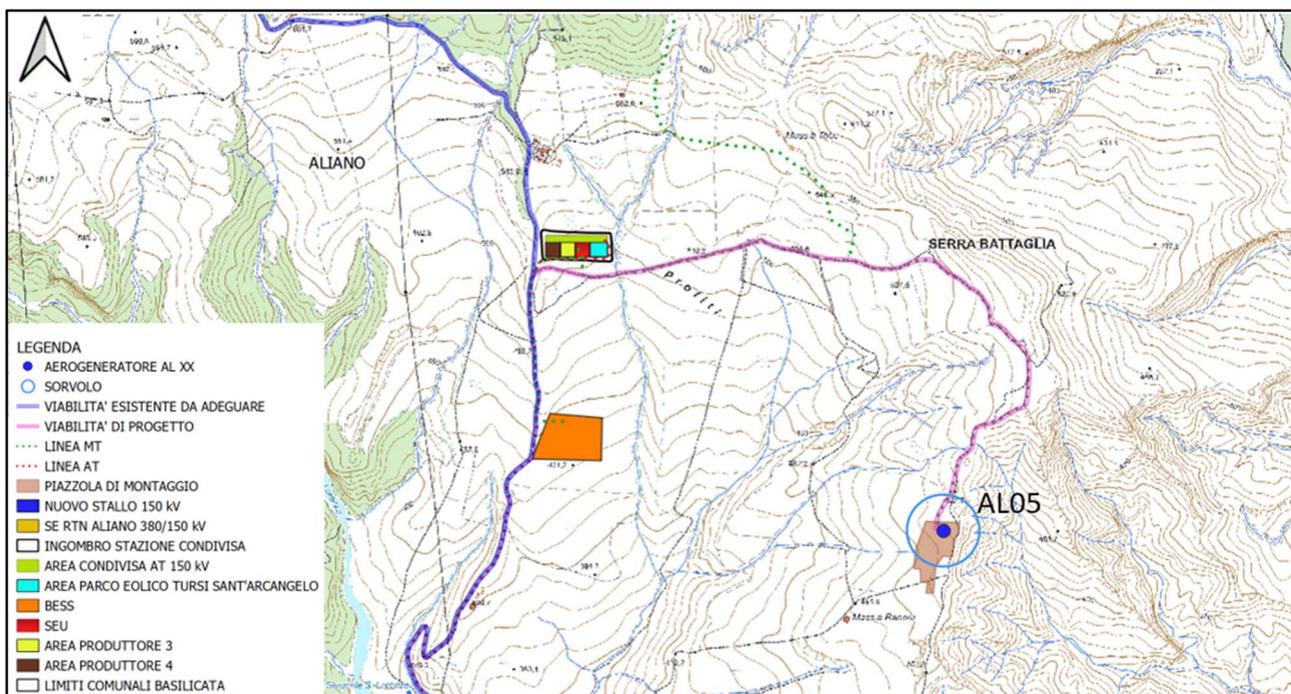


Figura 2.3: Area SEU 150/33 kV e BESS 14 MW

L'area di progetto (Figura 2.4) è servita dalla SS 598 (Val d'Agri) e da un sistema di viabilità esistente, opportunamente adeguato e migliorato per il transito dei mezzi eccezionali da utilizzare per consegnare in sito i componenti degli aerogeneratori, da cui si dirameranno nuovi tratti di viabilità per giungere alle posizioni degli aerogeneratori, necessari per la costruzione e la manutenzione dell'impianto eolico.

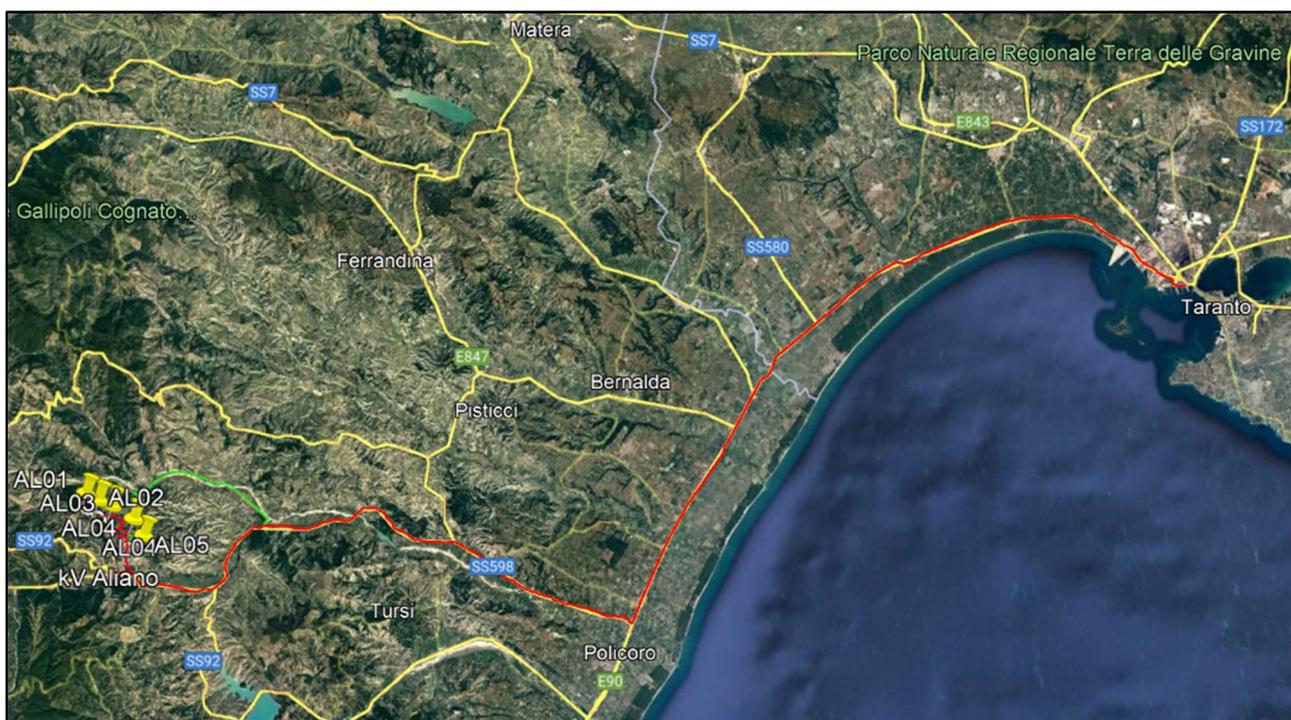


Figura 2.4: Layout di impianto con viabilità di accesso su immagine satellitare

## 2.1 Caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore

---

L'aerogeneratore è una macchina rotante che trasforma l'energia cinetica del vento in energia elettrica ed è essenzialmente costituito da una torre (suddivisa in più parti), dalla navicella, dal Drive Train, dall'Hub e tre pale che costituiscono il rotore.

Per il presente progetto una delle possibili macchine che potrebbe essere installata è il modello Siemens Gamesa SG 170, di potenza nominale pari a 6.2 MW, altezza torre all'hub pari a 135 m e diametro del rotore 170 m (**Figura 2.1.1**).

Oltre ai componenti su elencati, vi è un sistema di controllo che esegue, il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, ed il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata, che permette l'allineamento della macchina rispetto alla direzione del vento.

Il rotore è a passo variabile in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro di diametro pari a 170 m, posto sopravvento al sostegno, con mozzo rigido in acciaio. Altre caratteristiche principali sono riassunte nella **Tabella 2.1.1**.

Le caratteristiche dell'aerogeneratore su descritto sono quelle ritenute idonee in base a quanto disponibile oggi sul mercato, in futuro potrà essere possibile cambiare il modello dell'aerogeneratore senza modificare in maniera sostanziale l'impatto ambientale e i limiti di sicurezza previsti.

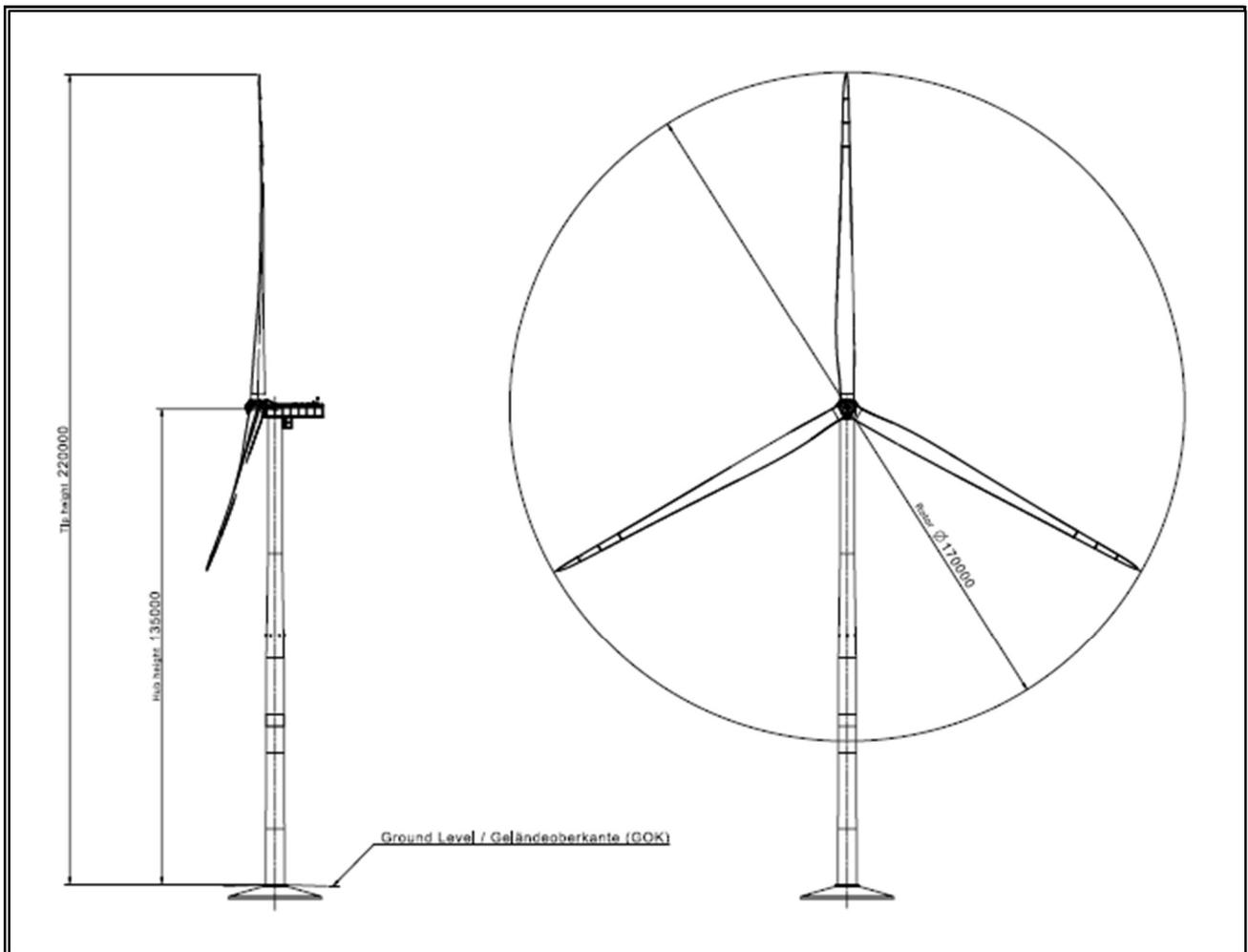


Figura 2.1.1: Profilo aerogeneratore SG170 HH135 – 6.2 MW

| Technical Specifications     |   |
|------------------------------|---|
| <b>Rotor</b>                 |   |
| Type .....                   | 3-bladed, horizontal axis   |
| Position .....               | Upwind  |
| Diameter .....               | 170 m   |
| Swept area .....             | 22,698 m <sup>2</sup>   |
| Power regulation .....       | Pitch & torque regulation<br>with variable speed                          |
| Rotor tilt .....             | 6 degrees   |
| <b>Blade</b>                 |   |
| Type .....                   | Self-supporting   |
| Blade length .....           | 83.5 m  |
| Max chord .....              | 4.5 m   |
| Aerodynamic profile .....    | Siemens Gamesa<br>proprietary airfoils                                    |
| Material .....               | G (Glassfiber) – CRP<br>(Carbon Reinforced Plastic)                       |
| Surface gloss .....          | Semi-gloss, < 30 / ISO2813  |
| Surface color .....          | Light grey, RAL 7035 or<br>White, RAL 9018                                |
| <b>Aerodynamic Brake</b>     |   |
| Type .....                   | Full span pitching  |
| Activation .....             | Active, hydraulic   |
| <b>Load-Supporting Parts</b> |   |
| Hub .....                    | Nodular cast iron   |
| Main shaft .....             | Nodular cast iron   |
| Nacelle bed frame .....      | Nodular cast iron   |
| <b>Mechanical Brake</b>      |   |
| Type .....                   | Hydraulic disc brake  |
| Position .....               | Gearbox rear end  |
| <b>Nacelle Cover</b>         |   |
| Type .....                   | Totally enclosed  |
| Surface gloss .....          | Semi-gloss, <30 / ISO2813   |
| Color .....                  | Light Grey, RAL 7035 or<br>White, RAL 9018                                |
| <b>Generator</b>             |   |
| Type .....                   | Asynchronous, DFIG  |
| <b>Grid Terminals (LV)</b>   |   |
| Baseline nominal power ..    | 6.0 MW / 6.2 MW   |
| Voltage .....                | 690 V   |
| Frequency .....              | 50 Hz or 60 Hz  |
| <b>Yaw System</b>            |   |
| Type .....                   | Active  |
| Yaw bearing .....            | Externally geared   |
| Yaw drive .....              | Electric gear motors  |
| Yaw brake .....              | Active friction brake   |
| <b>Controller</b>            |   |
| Type .....                   | Siemens Integrated Control<br>System (SICS)                               |
| SCADA system .....           | SGRE SCADA  |
| <b>Tower</b>                 |   |
| Type .....                   | Tubular steel / Hybrid  |
| Hub height .....             | 100 m to 165 m and site-<br>specific                                      |
| Corrosion protection .....   | Painted   |
| Surface gloss .....          | Semi-gloss, <30 / ISO-2813  |
| Color .....                  | Light grey, RAL 7035 or<br>White, RAL 9018                                |
| <b>Operational Data</b>      |   |
| Cut-in wind speed .....      | 3 m/s   |
| Rated wind speed .....       | 11.0 m/s (steady wind<br>without turbulence, as<br>defined by IEC61400-1) |
| Cut-out wind speed .....     | 25 m/s  |
| Restart wind speed .....     | 22 m/s  |
| <b>Weight</b>                |   |
| Modular approach .....       | Different modules<br>depending on restriction                             |

Tabella 2.1.1: Specifiche tecniche aerogeneratore

## 2.2 Viabilità e piazzole

La viabilità e le piazzole del parco eolico sono elementi progettati considerando la fase di costruzione e la fase di esercizio dell'impianto eolico.

In merito alla viabilità, come detto sopra, si è cercato di utilizzare il sistema viario esistente adeguandolo al passaggio dei mezzi eccezionali. Tale indirizzo progettuale ha consentito di minimizzare l'impatto sul territorio e di ripristinare tratti di viabilità comunale e interpoderali che si trovano in stato di dissesto migliorando l'accessibilità dei luoghi anche alla popolazione locale.

Nei casi in cui tale approccio non è stato applicabile, sono stati progettati tratti di nuova viabilità seguendo il profilo naturale del terreno senza interferire con il reticolo idrografico presente in sito.

Nella **Figura 2.2.1** riportiamo una sezione stradale tipo di riferimento per i tratti di viabilità da adeguare

e quelli di nuova realizzazione.

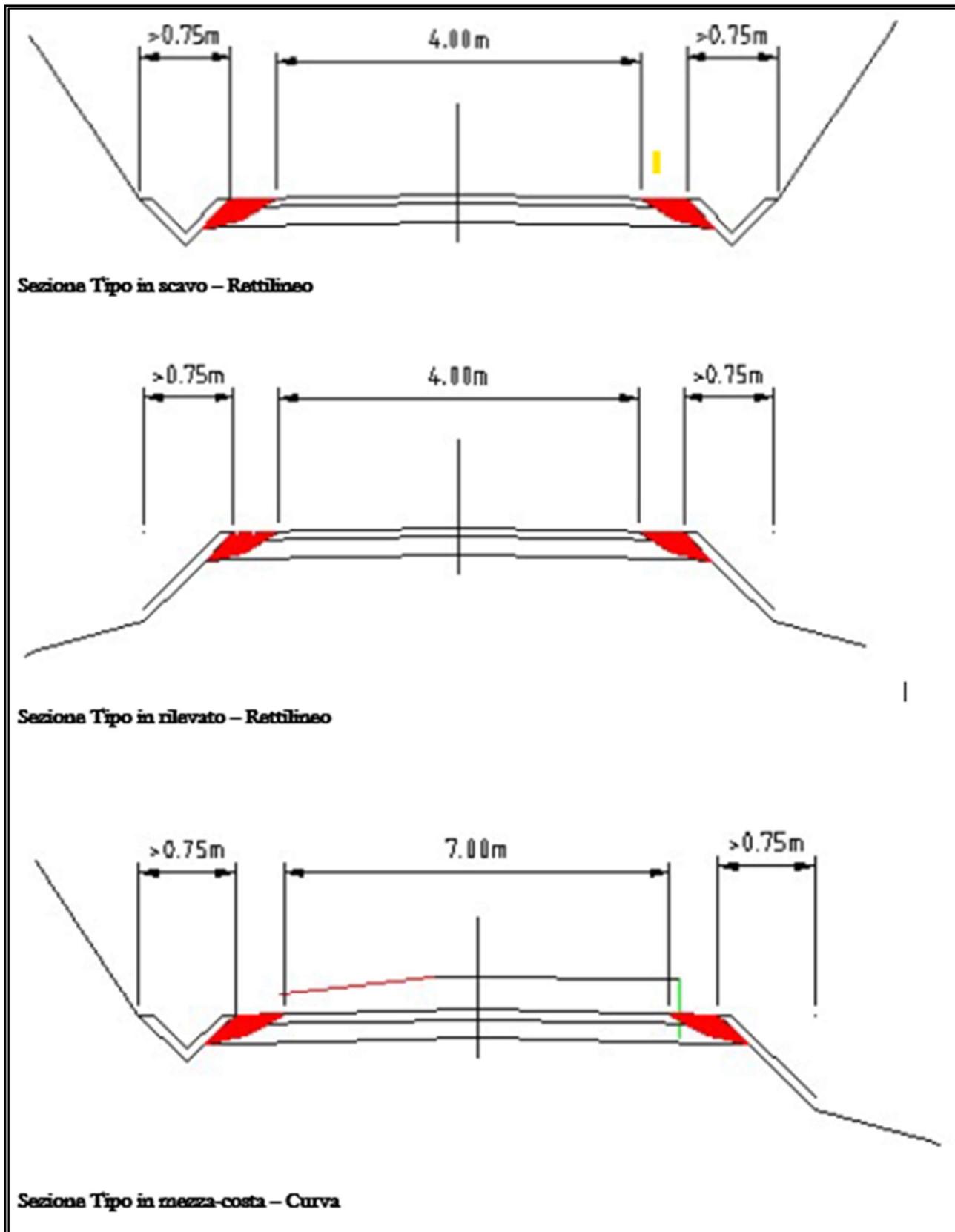
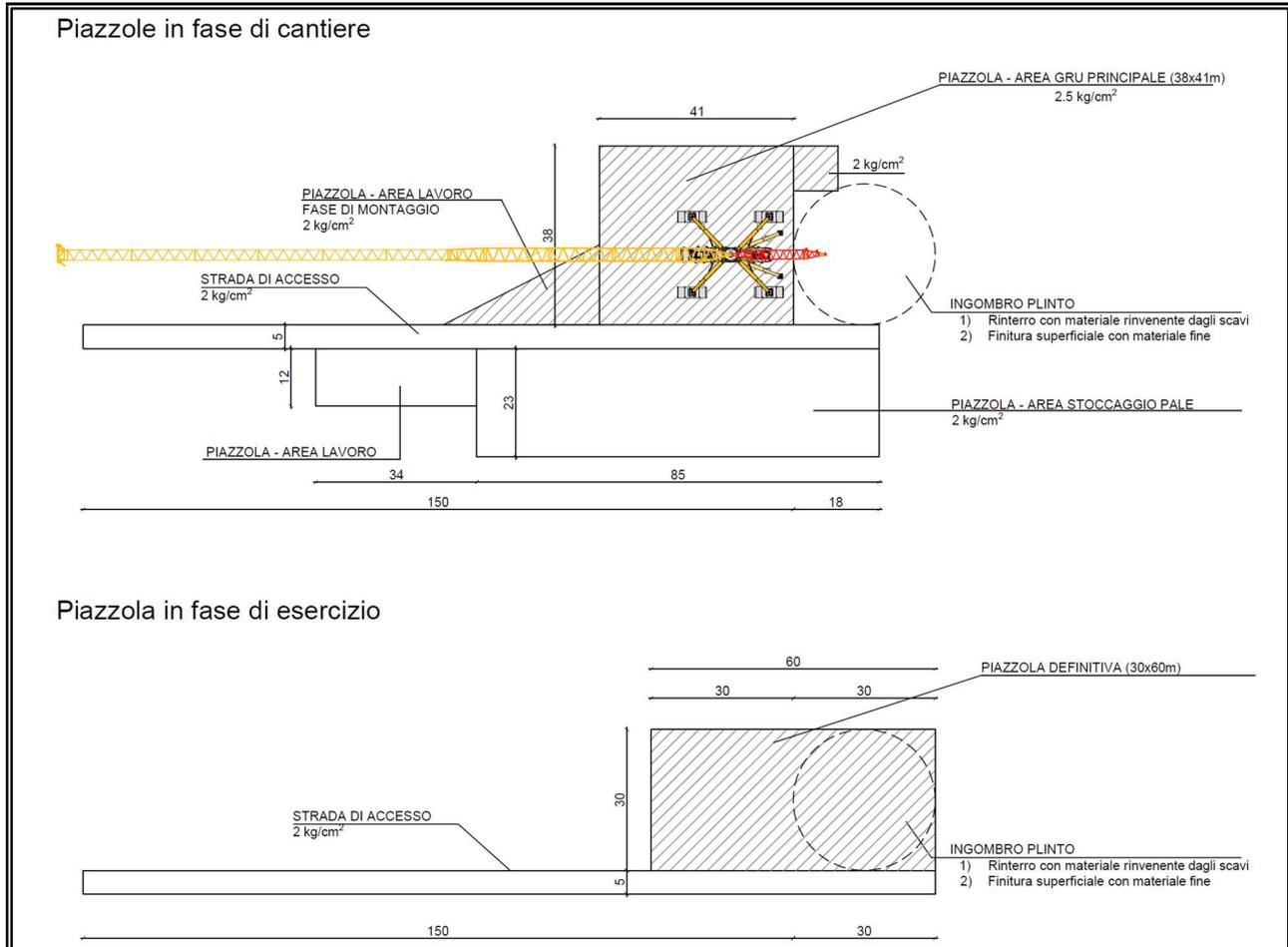


Figura 2.2.1: Sezioni tipo viabilità parco eolico

La progettazione delle piazzole da realizzare per l'istallazione di ogni aerogeneratore prevede due configurazioni, la prima necessaria all'istallazione dell'aerogeneratore e la seconda, a seguito di opere di

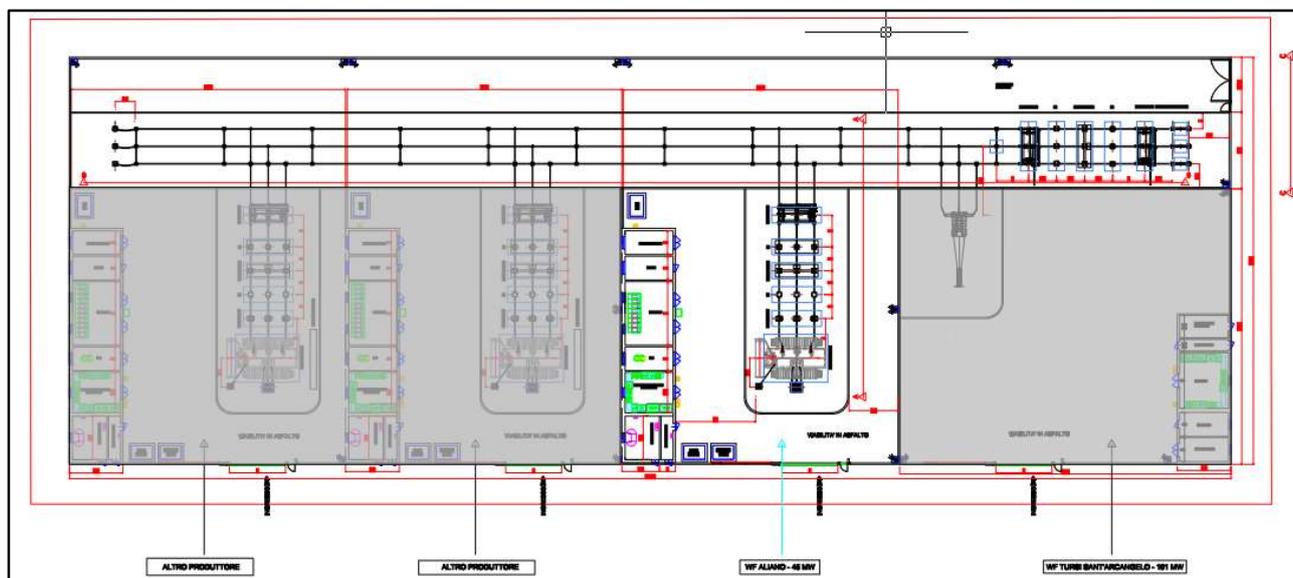
ripristinano parziale, per la fase di esercizio e manutenzione dell'impianto (**Figura 2.2.2**).



**Figura 2.2.2:** Planimetria piazzola tipo per la fase di installazione e fase di esercizio e manutenzione

### 2.3 Sottostazione elettrica di trasformazione utente (SEU)

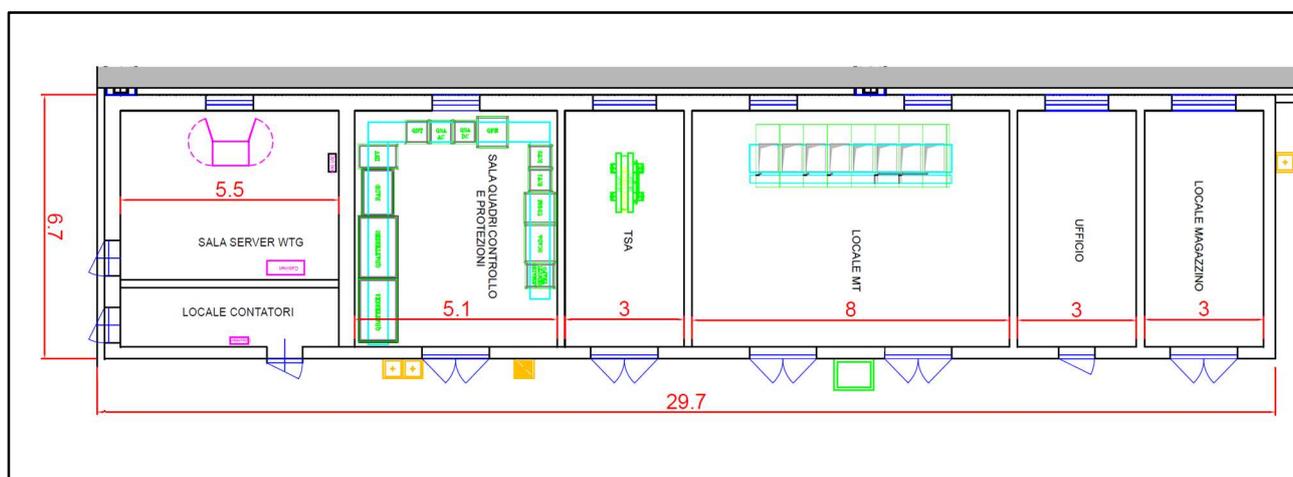
Nella sua configurazione, la Sottostazione Elettrica di Utente prevede un collegamento alla stazione Terna attraverso un cavo AT interrato, che partirà dallo stallo AT presente nella nuova SEU sino a giungere allo stallo dedicato presso la SE Terna. Di seguito uno stralcio della planimetria elettromeccanica della Sottostazione Elettrica di Utente che è localizzata all'interno della stazione di condivisione con altri produttori.



**Figura 2.3.1:** Layout sottostazione elettrica di trasformazione lato Utente (SEU)

Presso la Sottostazione Elettrica Utente è prevista la realizzazione di un edificio, di dimensioni in pianta di  $29,7 \times 6,7 \text{ m}^2$ , all'interno del quale siano ubicati i quadri MT, i trasformatori MT/BT, i quadri ausiliari e di protezione oltre al locale misure e servizi.

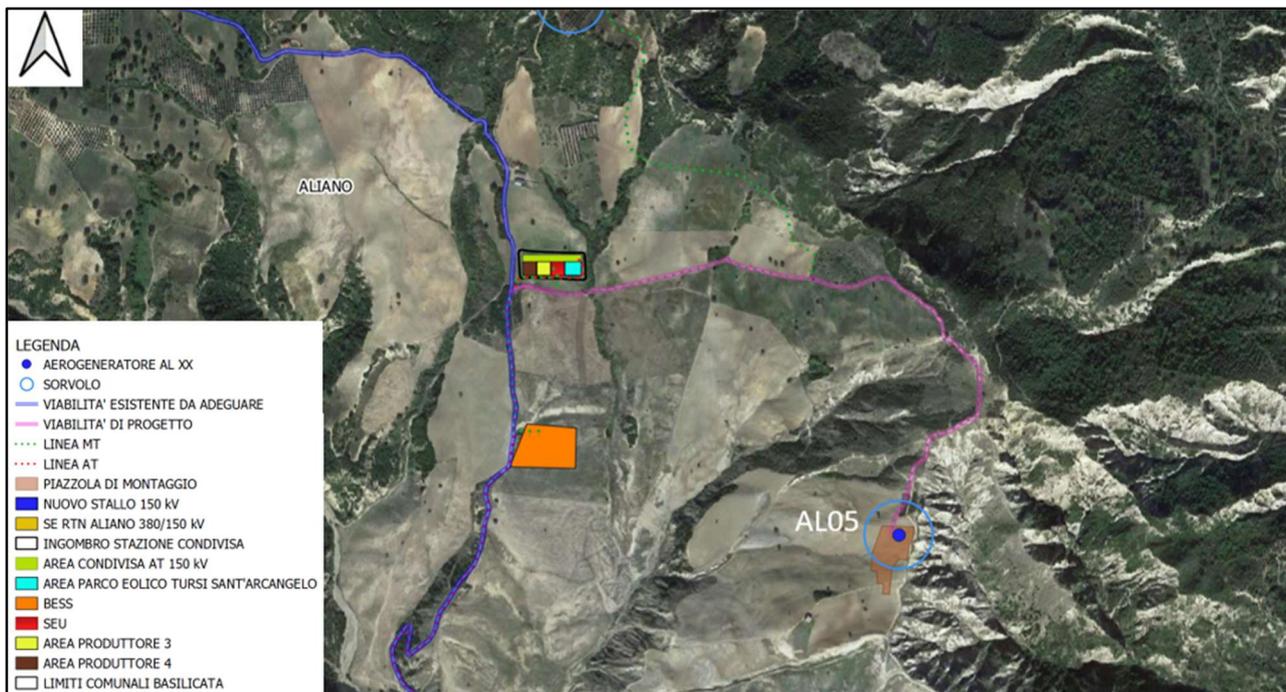
L'intera area è delimitata da una recinzione perimetrale, realizzata con moduli in calcestruzzo prefabbricati di altezza pari a 2,5 m, ed è dotata di ingresso pedonale e carrabile.



**Figura 2.3.2:** Pianta edificio di controllo SEU

## 2.4 BESS

L'impianto eolico è connesso ad un sistema di accumulo di energia BESS (Battery Energy Storage System) di potenza pari a 14 MWp localizzato nelle immediate vicinanze della Stazione Elettrica Utente, come rappresentato dalla figura seguente.



**Figura 2.4.1:** Localizzazione SEU 150/33 kV e BESS su ortofoto

Il BESS è un sistema costituito da apparecchiature e dispositivi in grado di immagazzinare a livello elettrochimico l'energia al fine di convertirla in energia elettrica in media tensione.

In particolare, il sistema BESS è costituito da un insieme di celle elettrochimiche connesse elettricamente tra loro in serie e parallelo in modo da formare i singoli moduli batterie, i quali, a loro volta, sono connessi elettricamente tra loro in serie e parallelo e assemblati in un unico sistema (armadio batteria).

Le batterie adoperate sono agli ioni di litio e presentano un'aspettativa di vita pari alla vita di impianto prevista in condizioni operative standard all'aperto.

Un sistema di controllo batterie (BMS, Battery Management System) assicura la gestione, il controllo e il monitoraggio locale degli assemblati-batterie, mentre il PCS (Power Conversion System) assicura la conversione bidirezionale della corrente da AC/DC.

La gestione e il controllo locale dell'impianto è assicurato dal Sistema di Controllo Integrato (SCI).

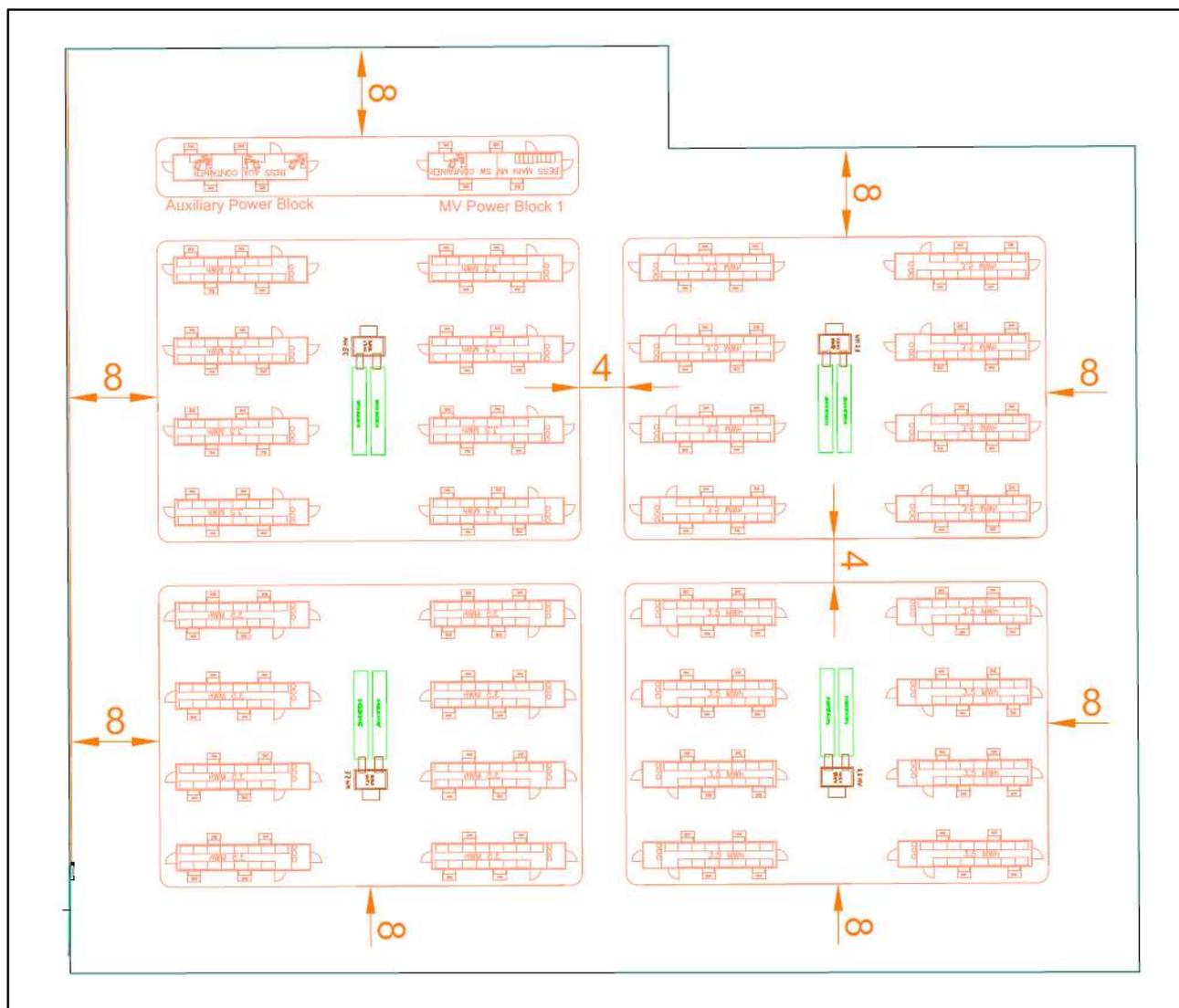


Figura 2.4.2: Esempio di configurazione BESS di potenza 14 MW

## 2.5 Linee elettriche di collegamento MT

L'impianto "Parco Eolico Aliano" è caratterizzato da una potenza complessiva di 45 MW, ottenuta da 5 aerogeneratori di potenza di 6,2 MW ciascuno, per un totale di 31 MW, e dall'impianto di accumulo di 14 MW.

Gli aerogeneratori sono collegati elettricamente tra loro mediante cavi in media tensione a 33 kV in modo da formare 2 sottocampi (Circuiti A, B) di 2 o 3 WTG (Wind Turbine Generator); ognuno di tali circuiti è associato ad un colore diverso per maggiore chiarezza, come esplicitato dalla seguente tabella:

| Sottocampo o Circuito | Aerogeneratori     | Potenza totale [MW] |
|-----------------------|--------------------|---------------------|
| CIRCUITO A            | AL01 – AL02        | 12,4                |
| CIRCUITO B            | AL03 – AL04 – AL05 | 18,6                |

Tabella 2.5.1: Suddivisione in circuiti dell'impianto

I cavi sono collocati in trincee ad una profondità di posa di 1 m dal piano di calpestio, su un sottofondo di sabbia di spessore di 0,1 m, e la distanza di separazione dei circuiti adiacenti in parallelo sul piano

orizzontale è pari a 0,20 m

La figura seguente, nella quale le misure sono espresse in mm, mostra la modalità di posa; maggiori dettagli sono apprezzabili nell'elaborato "ALOE070\_Distribuzione MT - sezioni tipiche delle trincee di cavidotto".

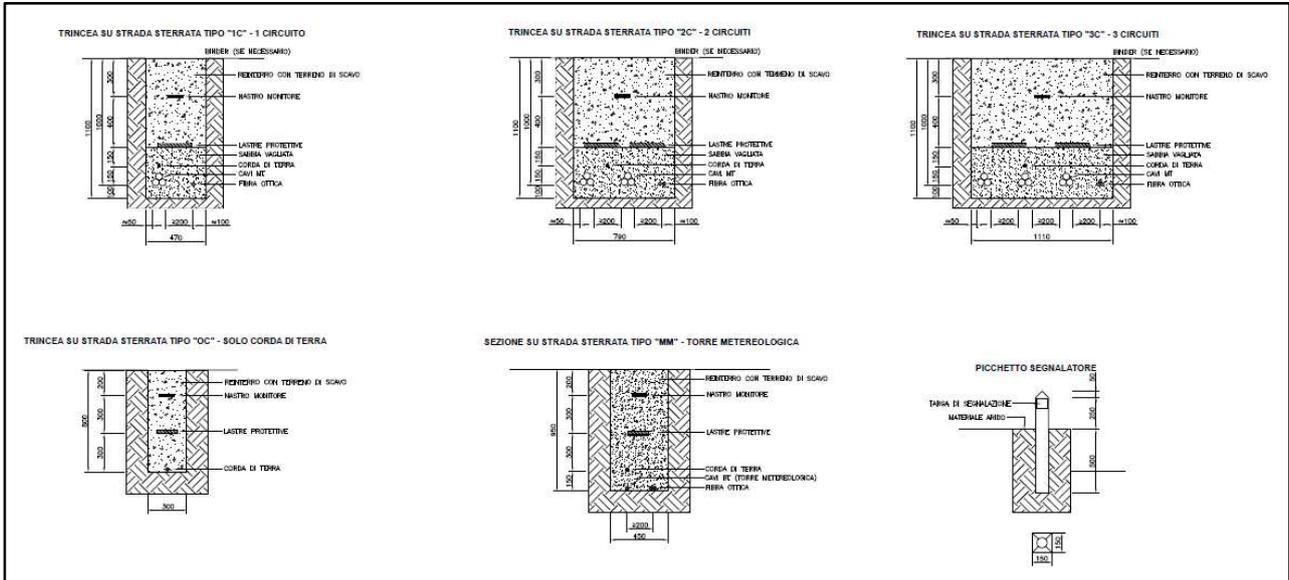


Figura 2.5.1: Sezioni tipiche delle trincee cavidotto su strada sterrata

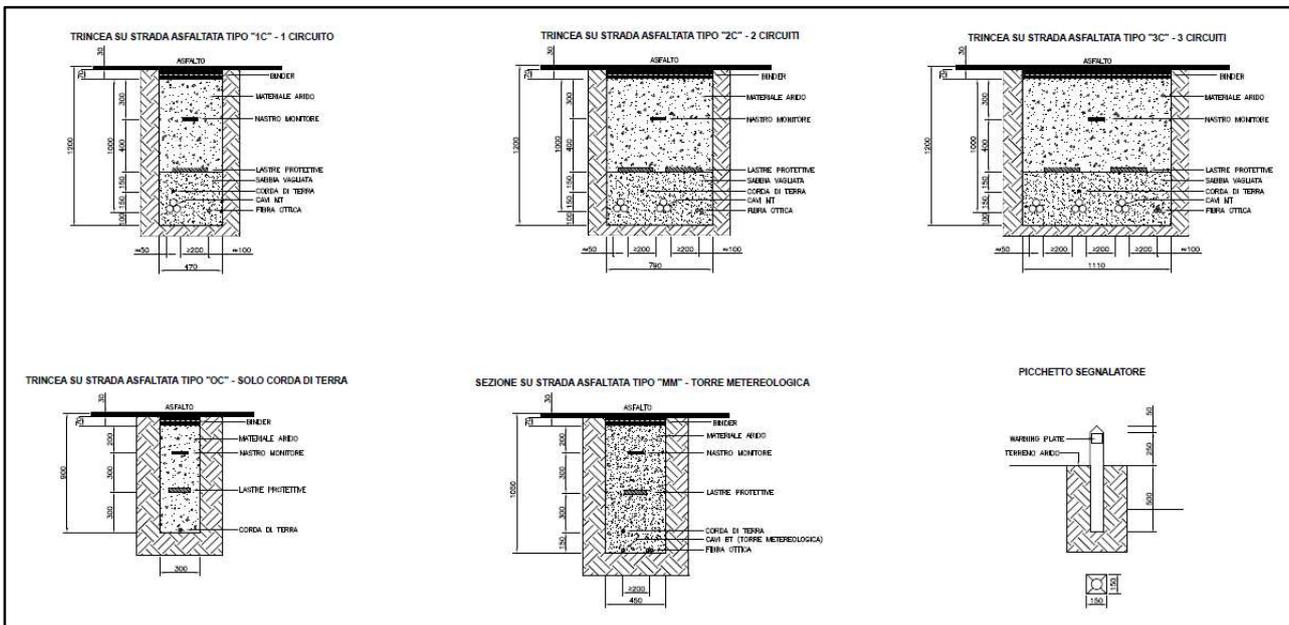


Figura 2.5.2: Sezioni tipiche delle trincee cavidotto su strada asfaltata

## 2.6 Stazione di condivisione

Il progetto prevede la realizzazione della stazione in condivisione, contenente la SEU prima descritta e ubicata nel Comune di Aliano, al fine di collegare l'impianto eolico di Aliano e gli impianti da fonte rinnovabile di altri produttori con il medesimo stallo della Stazione Elettrica di Trasformazione RTN Terna (SE) 380/150 kV nel Comune di Aliano (MT).

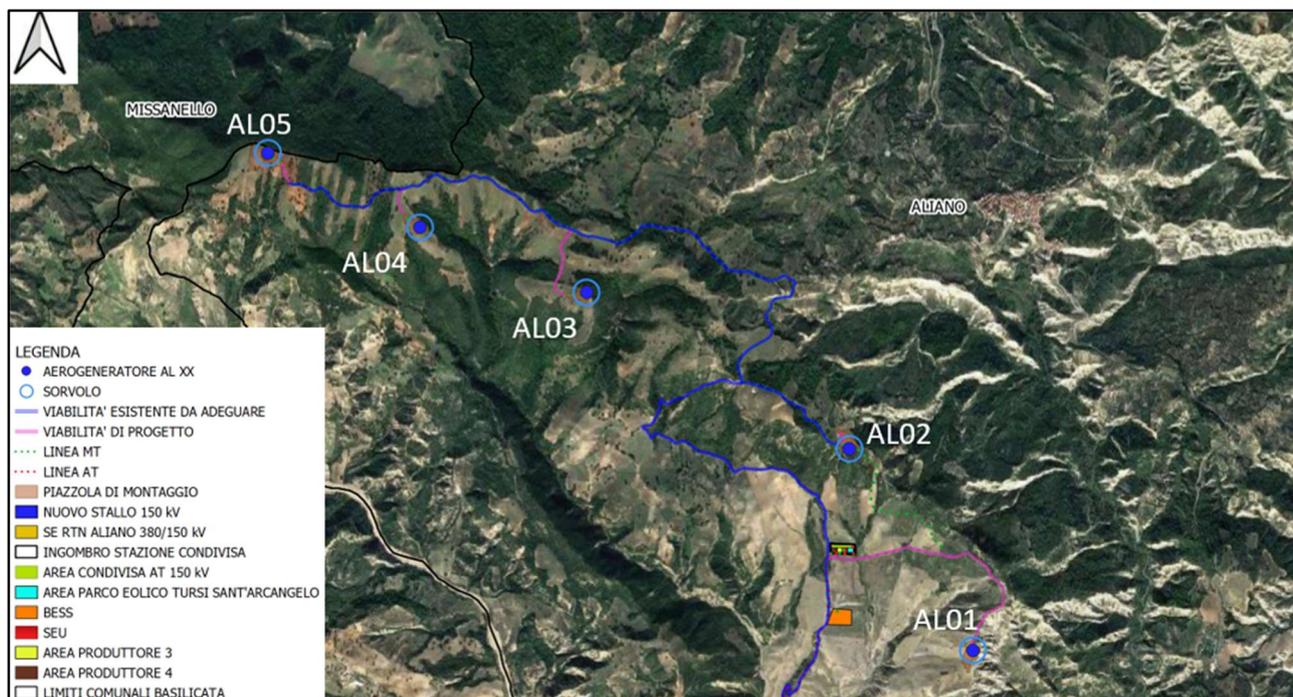


Figura 2.6.1: Localizzazione della stazione in condivisione su immagine satellitare



Figura 2.6.2: Area Sottostazione di condivisione Aliano

La stazione è caratterizzata da 4 stalli di arrivo cavo collegati ad una sbarra comune e da uno stallo necessario alla connessione a 150 KV con la stazione RTN.

Il sistema di controllo, di misura e di protezione è previsto nell'edificio presente in stazione e, grazie all'utilizzo cavi in fibra ottica, permette il controllo automatizzato dell'intera stazione, operazione peraltro possibile dalla sala quadri anche nell'eventualità in cui la teletrasmissione sia in uno stato di non servizio nel caso di manutenzione.

La stazione in condivisione occupa un'area di dimensioni in pianta di circa 146 m x 52 m, come

rappresentato nella figura seguente (maggiori dettagli sono riportati nell'elaborato di progetto "ALOE087 Sottostazione elettrica condivisa – planimetria e sezioni elettromeccaniche").

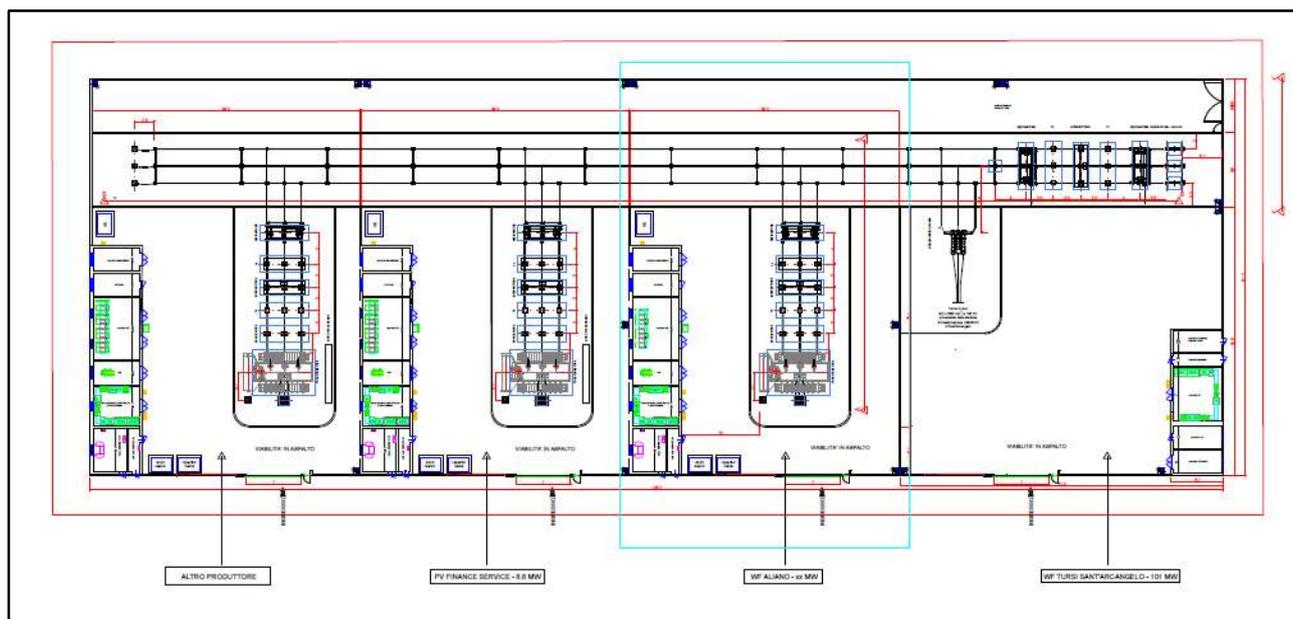


Figura 2.6.3: Planimetria elettromeccanica della Sottostazione elettrica condivisa

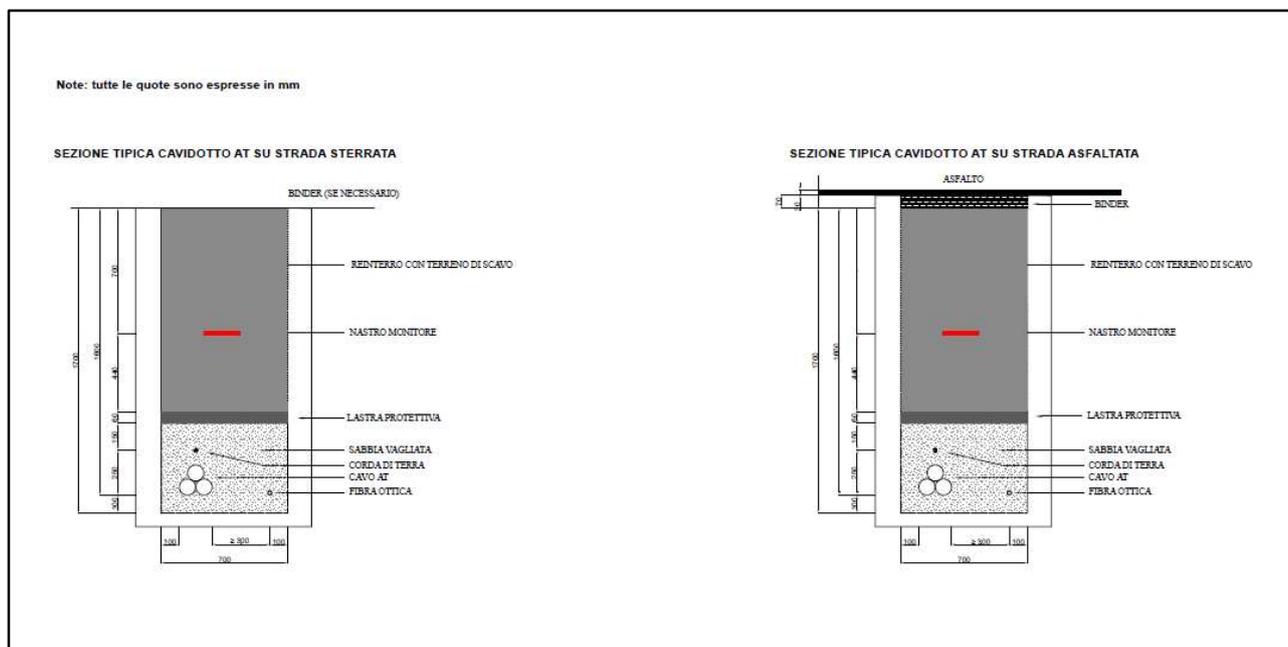
### 2.7 Linea AT di collegamento alla RTN

Il collegamento tra la stazione di condivisione e il nuovo stallo della Stazione Elettrica di Trasformazione 380/150 kV (SE) denominata "Aliano" è realizzato tramite una linea interrata a 150 kV di lunghezza di circa 6000 m.

I cavi sono caratterizzati da una posa a trifoglio, sono posati a 1,60 m dal piano di calpestio e su un letto di sabbia di 0,1 m, sono ricoperti da uno strato di 0,4 m di sabbia, al di sopra del quale una lastra protettiva in cemento ne assicurerà la protezione meccanica.

A 0,7 m dal piano di calpestio un nastro monitor ha lo scopo di segnalare la presenza dei cavi al fine di evitarne eventuali danneggiamenti seguenti ad eventuali scavi da parte di terzi.

La terna di cavi in AT è distante sul piano orizzontale almeno 0,3 m dal cavo in fibra ottica, mentre nel letto di sabbia è previsto anche un cavo unipolare di protezione, così come rappresentato nel dettaglio dell'elaborato di progetto "ALOE089\_Sezione tipica della trincea cavidotto AT".

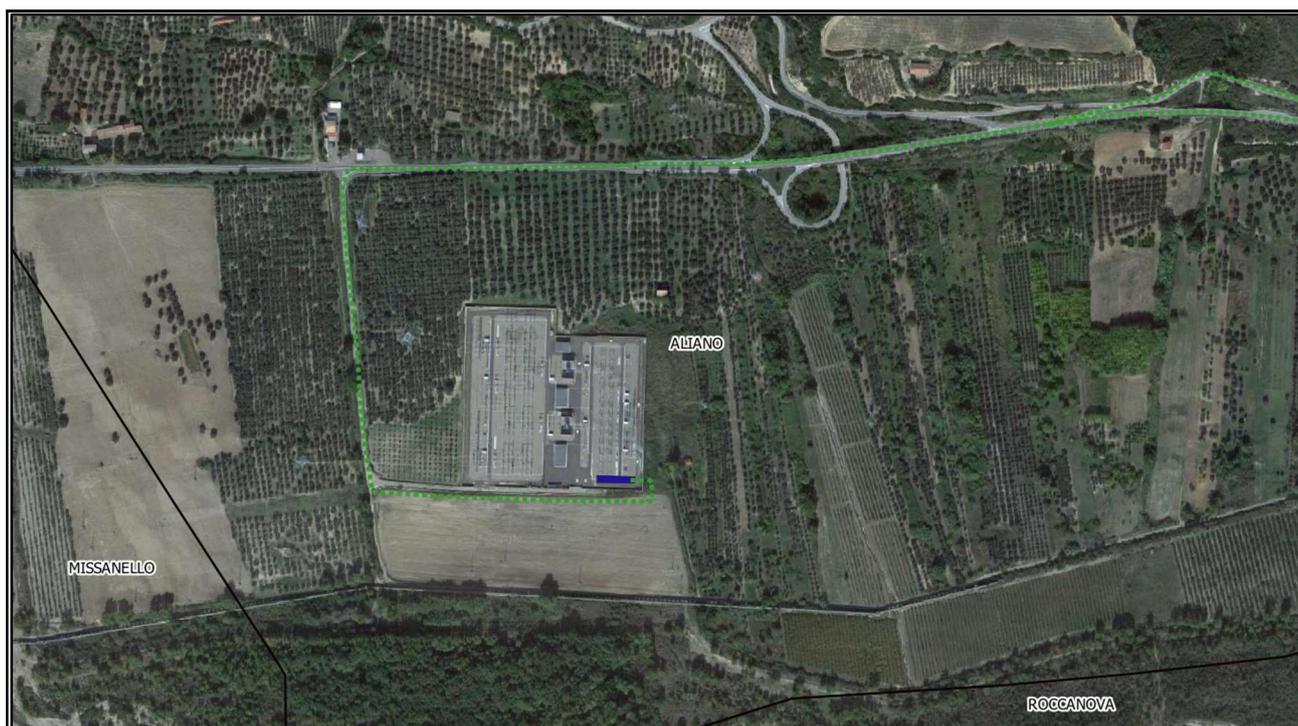


**Figura 2.7.1:** Sezione tipica del cavidotto AT di connessione tra la stazione di condivisione e il nuovo stallo della stazione elettrica di trasformazione 380/150 kV denominata “Aliano”

La scelta dei particolari cavi AT e delle relative condizioni di posa potranno comunque subire modifiche, non sostanziali, in fase di progettazione esecutiva, a seconda delle condizioni operative riscontrate.

## 2.8 Stallo arrivo produttore

Come indicato nella STMG di Terna, lo stallo di arrivo produttore a 150 kV nella stazione di trasformazione 380/150 kV di Aliano costituisce l'impianto di rete per la connessione (**Figura 2.8.1**).



**Figura 2.8.1:** Individuazione su ortofoto dello stallo AT nella stazione Terna

---

### **3. STUDI CONDOTTI SUGLI INCIDENTI**

---

Esistono una serie di studi in merito alla probabilità di verificarsi un incidente dovuto al distacco di una pala o di una parte della stessa.

In particolare, un primo studio danese è stato condotto tra il 1998 ed il 1999, ha riguardato 2130 rotori, le rispettive pale e navicelle per un totale di 18 mesi, ovvero  $1.5 \times 2130 = 3195$  anni di funzionamento e produzione totale di 540 MW.

In queste condizioni si sono verificati 7 incidenti in 3195 anni di funzionamento, equivalenti a 1 incidente ogni  $3195/7 = 456$  anni.

Come si evince dallo studio, la probabilità di incidente è di per sé molto bassa e la probabilità che l'incidente arrechi danno a persone è molto più bassa se si tiene conto della bassissima probabilità di occupazione di  $1 \text{ m}^2$  di terreno da parte di una persona, soprattutto in ambito rurale.

Un ulteriore studio danese conferma l'esito del primo; relativamente ad un periodo di 120 mesi nel decennio 1993 – 2013 e a 1912 rotori, rispettive pale e navicelle, la probabilità di rottura riguarda 0.00083 impianti all'anno ed in ambito rurale la stessa diventa  $6 \times 10^{-5}$  all'anno.

In generale la frequenza con cui si verificano tali incidenti è ulteriormente diminuita nell'ultimo decennio grazie ad un crescente sviluppo tecnologico delle macchine ed ai relativi sistemi di sicurezza.

---

### **4. CAUSE DI ROTTURA DELLA PALA O PARTE DI ESSA**

---

Nell'ambito della progettazione ed esercizio di un impianto eolico uno degli aspetti da tenere in considerazione è la rottura accidentale di una pala o di parte della stessa; tuttavia, eventi di questo genere sono da considerarsi piuttosto rari, in quanto risulta essere bassa sia la probabilità del verificarsi degli stessi che eventuali conseguenze sfavorevoli nel caso dovessero avvenire.

I rischi di rottura dipendono essenzialmente da:

- 1) masse di ghiaccio che si formano sull'elemento rotante;
- 2) rottura meccanica dell'elemento rotante;
- 3) verificarsi di fulminazioni.

Nella presente trattazione la prima causa può essere ritenuta trascurabile, date le condizioni meteorologiche presenti nella zona interessata dagli aerogeneratori del parco eolico in questione.

La seconda causa di malfunzionamento può ritenersi un evento molto raro in quanto:

- I. ogni singolo aerogeneratore è dotato di un sistema di controllo e supervisione delle pale, in grado di gestire, in maniera automatica, in tempo reale ed a distanza, una serie di funzioni quali l'avvio, l'arresto in ogni condizione di emergenza, la produzione.  
Tale sistema è in grado di assicurare la protezione della singola turbina e di funzionare in maniera del tutto autonoma;
- II. ogni singola pala è connessa al mozzo tramite un collegamento rigido, in modo quasi da azzerare la probabilità di distacco della pala o di parte della stessa;
- III. le singole pale sono progettate utilizzando materiali in fibra di vetro e carbonio, rivestite con altri materiali quali poliestere o fibre epossidiche, che contribuiscono ad abbassare ulteriormente la probabilità di distacco;
- IV. un minuzioso programma di manutenzione assicura per la singola pala la verifica di eventuali piccole fratture, in presenza delle quali si opta per la riparazione o eventuale sostituzione del pezzo danneggiato.

Rispetto alle due cause discusse, quella che più frequentemente potrebbe verificarsi riguarda le fulminazioni.

Per ovviare a questa problematica il sistema torre tubolare – navicella - rotore viene protetto con parafulmini e, in conformità alla norma CEI 81-1, la classe di protezione è la Classe I, la più alta, che garantisce in termini probabilistici una protezione del 98 %.

Questo implica che solo nel 2 % dei casi si possono avere danni della turbina nel caso la fulminazione.

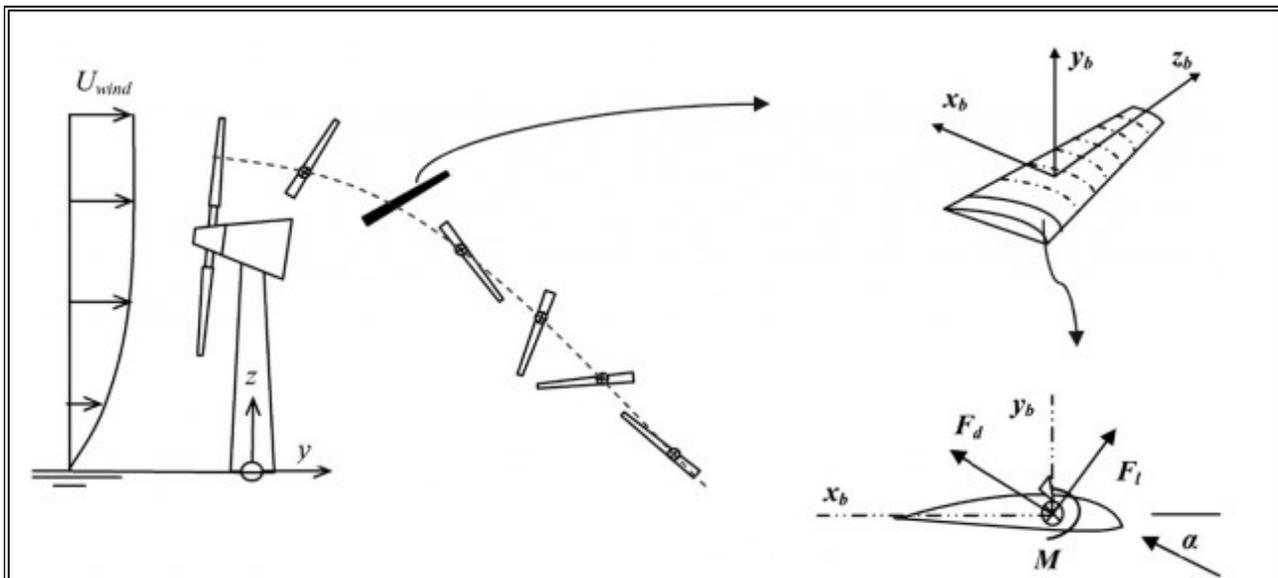
In conseguenza di queste considerazioni si può ritenere che la probabilità che si verifichi una rottura accidentale del sistema sia trascurabile.

## **5. STUDIO DELLA GITTATA**

Ai fini della valutazione del fattore di rischio dovuto al distacco della pala o di parte di essa, si rende necessario la valutazione della stima della gittata massima dell'oggetto in questione.

Non considerando le caratteristiche aerodinamiche della pala, la condizione di maggiore gittata si verifica quando la stessa assume la posizione di 45° nel caso di distacco.

In tal caso si verifica il moto detto comunemente "a giavellotto".



**Figura 5.1:** Traiettoria teorica pala in caso di rottura

Tuttavia, la situazione appena descritta è solo teorica e con probabilità di verificarsi quasi nulla; infatti, in situazioni reali subentrano alcune forze, quale quella di resistenza viscosa, quella di resistenza del vento, che si oppongono al moto della pala o di un frammento della stessa, riducendo la distanza di volo ed il tempo di volo.

Di seguito si discute appunto del tempo e della distanza di volo e di alcune relative considerazioni in quanto necessarie ai fini del calcolo della gittata massima.

Al momento del distacco la **traiettoria di volo** iniziale della pala o parte della stessa distaccata è determinata principalmente dall'angolo che la stessa traiettoria forma con l'asse orizzontale, oltre che dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia.

Il **tempo di volo** è il tempo che intercorre tra il distacco della pala o di parte della stessa e il suo successivo impatto al suolo.

Esso dipende prevalentemente da:

- I. dalla posizione della pala o di parte della stessa rispetto al suolo;
- II. dalla componente verticale della velocità iniziale della pala o di parte della stessa, valutata in corrispondenza del suo baricentro ed immediatamente dopo il distacco;
- III. dall'accelerazione verticale della pala o di parte della stessa;
- IV. dalle forze di attrito agenti sulla pala o su parte della stessa.

La **distanza percorsa** dalla pala o di parte della stessa è la distanza orizzontale durante il tempo di volo.

Essa dipende prevalentemente da:

- I. velocità del vento nel momento in cui avviene la rottura ed il conseguente distacco;
- II. componente orizzontale della velocità iniziale della pala o di parte della stessa, valutata in corrispondenza del suo baricentro ed immediatamente dopo il distacco;
- III. tempo di volo;
- IV. forze di attrito agenti sulla pala o su parte della stessa.

## **6. ANALISI TEORICA DEL MOTO DI ROTAZIONE COMPLESSO**

---

Come precedentemente accennato, il caso di moto “a giavellotto” in seguito a rottura della pala o di parte della stessa risulta essere meramente teorico con probabilità trascurabile di verificarsi, date le caratteristiche aerodinamiche della pala, il suo peso (superiore a 2 t) ed a causa di fattori esterni quali l'azione del vento.

Inoltre, esso non tiene conto delle condizioni iniziali esistenti al momento dell'eventuale distacco quali rollio, l'imbarcata ed il beccheggio della pala.

Sulla scorta di tali considerazioni, il modello che meglio approssima la situazione reale del moto della pala o di un suo frammento è il moto rotazionale complesso, che permette di tenere in considerazione i moti di rotazione intorno ai tre assi cartesiani.

Nel caso di rottura, per il principio della conservazione della quantità di moto, l'elemento distaccato tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al piano della pala.

Le azioni indotte dal vento incidente sull'elemento distaccato determinano la rotazione intorno agli altri assi, generando altri due momenti intorno agli altri assi.

Inoltre, l'angolo di distacco e le forze inerziali agenti sulla pala o sul frammento della stessa determinano la traiettoria iniziale.

Ai fini della descrizione del moto rotazionale complesso è necessario tener in conto sia le forze di inerzia che quelle viscosive unitamente alla forza di gravità.

A tale proposito è stato condotto uno studio da parte della Pb Power Ltd, per conto della società Vestas Wind System, finalizzato all'analisi ed al conseguente calcolo della gittata dell'oggetto distaccato in tre diverse ipotesi relative al moto in questione:

1. si prendono in considerazione le forze di inerzia, trascurando quelle viscosive;
2. si prendono in considerazione le forze viscosive, trascurando quelle di inerzia;
3. si prendono in considerazione le forze di inerzia e viscosive (moto rotazionale complesso).

Lo studio è stato condotto prendendo in esame due aerogeneratori, caratterizzati da una diversa

---

lunghezza della pala, velocità di rotazione massima a regime, altezza della torre.

Questa distinzione avviene in quanto la massima gittata della pala o di un suo frammento dipende da:

- posizione dell'oggetto al momento del distacco;
- velocità periferica dell'oggetto al momento del distacco, conseguenza del numero di giri del rotore;
- profilo aerodinamico della pala o di una sua parte;
- peso del frammento;
- dimensione del frammento.

Per esempio, minore è il peso di un frammento più le forze di attrito viscoso limitano il moto dello stesso.

Il primo tipo di aerogeneratore indagato è caratterizzato da un'altezza della torre di 67 m, lunghezza della pala di 39 m, velocità di rotazione massima a regime di 19.2 rpm (giri al minuto), il secondo da un'altezza della torre di 80 m, lunghezza della pala di 44 m, velocità di rotazione massima a regime di 14.9 rpm.

Per il primo tipo di aerogeneratore, per cui è stata valutata la velocità di rotazione del rotore al momento della rottura della pala di 20 giri al minuto, si è ottenuto il seguente risultato:

1. La gittata calcolata è pari a 131.6 m nell'ipotesi 1.
2. La gittata calcolata è pari a 113 m nell'ipotesi 2.
3. La gittata calcolata è pari a 110 m nell'ipotesi 3.

Per il secondo tipo di aerogeneratore, per cui è stata valutata la velocità di rotazione del rotore al momento della rottura della pala di 16.39 giri al minuto, si è ottenuto il seguente risultato:

1. la gittata calcolata è pari a 108 m nell'ipotesi 1.

Pertanto, i risultati ottenuti impongono due considerazioni in merito al valore della gittata calcolato:

- I. il valore della gittata, indipendentemente dall'ipotesi effettuata sul moto della pala o di un suo frammento, dipende dalla velocità di rotazione massima a regime in maniera più marcata rispetto alla sua dipendenza dalle dimensioni, dall'altezza della torre.

Infatti, per il secondo tipo di aerogeneratore, caratterizzato da un'altezza della torre e lunghezza della pala superiore rispetto al primo, la gittata calcolata è inferiore, essendo tale grandezza fortemente influenzata dalla più bassa velocità di rotazione massima a regime;

- II. nell'ipotesi di moto rotazionale complesso, il valore ottenuto della gittata è inferiore rispetto a quello che si ottiene nell'ipotesi di non considerare il moto come rotazionale complesso, ma di condurre un'analisi di moto dipendente solo da valori cinematici e geometrici.

Quindi tutto ciò porta alla valutazione della gittata nel caso di moto dipendente solo da valori cinematici e geometrici, essendo tale grandezza superiore rispetto all'ipotesi di moto rotazionale complesso.

## 7. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

In questa parte di trattazione si intende valutare la gittata massima di una pala distaccata considerando solo parametri cinematici e geometrici per l'aerogeneratore di progetto.

Inizialmente si analizza il moto bidimensionale di un punto materiale tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Successivamente si allargherà l'analisi al caso della pala dell'aerogeneratore di progetto sotto opportune ipotesi.

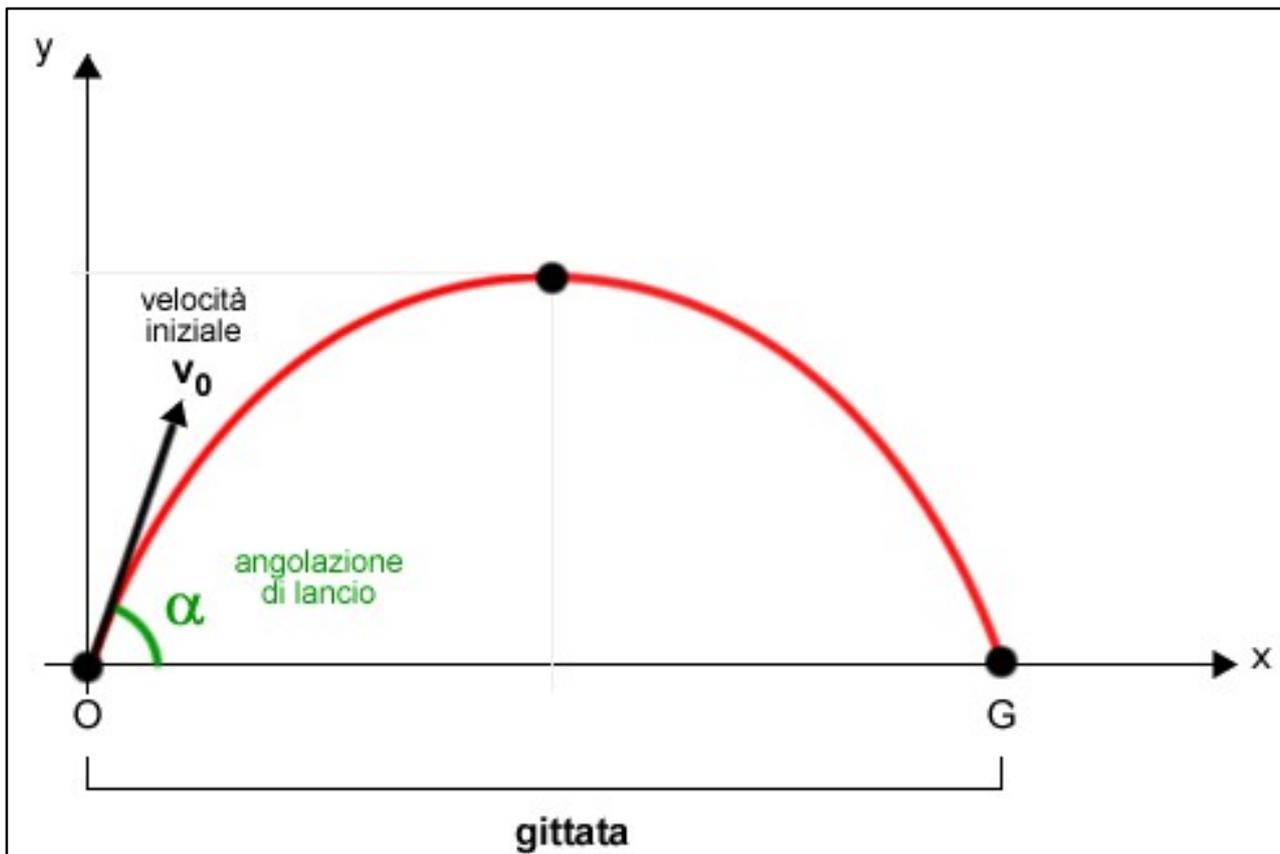
Fissato un sistema di riferimento con l'origine degli assi  $O$  centrata nel punto di partenza del corpo  $(x_0, y_0)$ , con l'asse delle  $Y$  positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle  $X$  nello stesso verso del moto orizzontale del punto materiale, le componenti dell'accelerazione saranno:

$$a_x = 0$$

$$a_y = -g$$

$$\text{essendo } g = -9,81 \text{ m/s}^2$$

La figura seguente rappresenta la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale  $v_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\alpha$ :



**Figura 1:** Gittata di un grave

Assumendo che il moto lungo x sia rettilineo uniforme e che lungo y sia uniformemente accelerato le componenti della velocità  $v_0$  lungo x e y valgono rispettivamente:

$$v_{x0} = v_0 \cos\alpha$$

$$v_{y0} = v_0 \sin\alpha$$

Per le ipotesi fatte

$$v_x = v_{x0}$$

$$x = x_0 + v_{x0} t \tag{1}$$

$$v_y = g t + v_{y0}$$

$$y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{y0} t + y_0 \tag{2}$$

imponendo  $y = 0$  nella (2) si ottiene la gittata, ovvero la distanza percorsa dal punto materiale prima dell'impatto a terra

$$0 = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{y0} t + y_0$$

Assumendo, per semplicità di trattazione,  $y_0 = 0$ , si ottengono le due soluzioni

- $t_0 = 0$  istante di lancio del corpo
- $t_1 = 2 v_{y0} / g = 2 v_0 \sin\alpha / g$  istante di impatto del corpo

sostituendo il valore di  $t_1$  nell'espressione (1) si ottiene

- $x = x_0 + 2 v_0^2 \sin\alpha \cos\alpha / g$

tenendo presente che  $2 \sin\alpha \cos\alpha = \sin(2\alpha)$  e assumendo che  $x_0 = 0$

si ottiene:

- $x = v_0^2 \sin(2\alpha) / g$

da cui deriva che la gittata per il grave, nelle ipotesi fatte, dipende dalla velocità iniziale, dall'angolo di inclinazione della traiettoria e dalle coordinate iniziali di lancio.

Generalizzando l'analisi al caso di una pala eolica, le caratteristiche geometriche e la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, consentono, con buona approssimazione, di ritenere che il baricentro sia posizionato ad  $1/3$  rispetto alla lunghezza della pala, ovvero

$$r_b = L / 3 = 85 / 3 \text{ m} = 28.33 \text{ m} \text{ essendo } L = \text{diametro rotorico} / 2 = 170 \text{ m} / 2 = 85 \text{ m}.$$

Conseguentemente l'altezza di lancio vale:

- $y_0 = H + H_g$

dove  $H = 135 \text{ m}$  (altezza mozzo) e  $H_g = r_b \sin\alpha$  (distanza lungo  $y$  del baricentro della pala dal mozzo al momento del distacco).

Nelle ipotesi semplificative fatte, imponendo  $y = 0$  nella (2) si ottiene:

- $t = (v_{0y} \pm \sqrt{v_{y0}^2 + 2 g y_0}) / g$  (3)

Detto  $n$  il numero di giri al minuto compiuti dal corpo in movimento circolare e considerato che, ad ogni giro, l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$ , per  $n$  giri si hanno  $2\pi n$  radianti al minuto, ottenendo così la velocità angolare al minuto del corpo in movimento.

La velocità angolare in radianti al secondo è:

- $\omega = (2\pi n / 60) \text{ rad/s}$

Dall'ipotesi di moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio;

dopo  $n$  giri al minuto lo spazio percorso vale  $2\pi n r_b$  metri/minuto.

Pertanto, la velocità periferica in metri al secondo del baricentro della pala corrisponde a:

- $v_0 = \omega r_b = (2\pi n/60) r_b = 35,60 \text{ m/s}$

essendo la velocità la velocità di rotazione massima  $n = 12 \text{ giri/min}$  nel caso in questione.

In definitiva, sono state considerate le seguenti ipotesi:

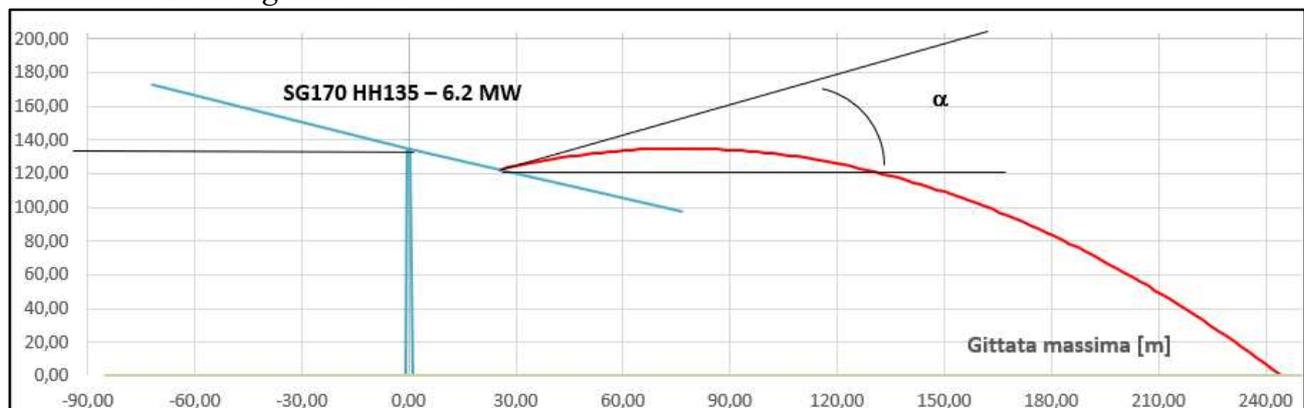
- moto del sistema di tipo rigido non vincolato;
- $a_x = 0$  e  $a_y = -g$ ;
- le forze di resistenza dell'aria sono trascurate;
- $v_0 = 35,60 \text{ m/s}$ ,  $r_b = 28,33 \text{ m}$ ,  $n = 12 \text{ giri/min}$ ;
- $H = 135 \text{ m}$ ,  $L = 85 \text{ m}$ ;
- $x_0 = 0$  e  $y_0 = H + r_b \sin\alpha$ .

Pertanto, si ottiene, nell'ipotesi di distacco, la gittata massima sostituendo la (3) nella espressione (1).

La tabella seguente fornisce i principali risultati del calcolo della gittata massima.

| CALCOLO GITTATA MAX        |       |                                  |               |
|----------------------------|-------|----------------------------------|---------------|
| DATI                       |       | RISULTATI                        |               |
| $g \text{ [m/s}^2\text{]}$ | 9,81  | $v_0 \text{ [m/s]}$              | 35,60         |
| $L \text{ [m]}$            | 85    | $\alpha \text{ [}^\circ\text{]}$ | <b>26,17</b>  |
| $r_b \text{ [m]}$          | 28,33 | $v_{0x} \text{ [m/s]}$           | 30,00         |
| $n \text{ [giri/min]}$     | 12    | $v_{0y} \text{ [m/s]}$           | 19,17         |
| $H \text{ [m]}$            | 135   | $G_{MAX} \text{ [m]}$            | <b>244,23</b> |

**Tabella 7.1:** Calcolo gittata massima



**Figura 7.2:** Rappresentazione geometrica della traiettoria della pala/frammento nel caso di gittata massima

---

## 8. CONCLUSIONI

---

Nel caso di distacco in corrispondenza di  $\alpha = 26,17^\circ$  la pala raggiunge la sua gittata massima pari a 244,23 m dal centro della torre, ovvero ad una distanza alla quale non sono presenti abitazioni o ricettori sensibili.

Il risultato è stato ottenuto sulla base delle ipotesi elencate nel paragrafo precedente, non considerando il moto rotazionale complesso della pala nel caso di eventuale distacco; tuttavia, come discusso in precedenza, il valore della gittata massima nel caso teorico è superiore rispetto a quello che si otterrebbe nel caso in cui si prendessero in considerazione le forze di attrito viscoso.

La rottura di un frammento di pala risulta verificarsi con una probabilità inferiore rispetto al distacco della pala e, qualora si verificasse, nella quasi totalità dei casi l'evento avviene progressivamente in seguito ad una iniziale flessione della struttura e successivo inevitabile urto con la torre (solitamente la causa prevalente di tale fenomeno è dovuta a fulminazioni di natura atmosferica).

La previsione di eventuali traiettorie di tali frammenti non è prevedibile utilizzando particolari modelli matematici ma solo da un punto di vista statistico.

Facendo riferimento allo studio *“Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan”*, la probabilità che un frammento di pala superi la gittata di 50 m dalla torre è dell'ordine di 0,00002.

Nel caso in cui dovessero staccarsi frammenti si tratterebbe comunque di oggetti di piccole dimensioni, il cui moto sarebbe ostacolato dalla prevalente resistenza dell'aria.