



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.99.IT.W.15590.00.012.00

PAGE

1 di/of 19

TITLE:
IT

AVAILABLE LANGUAGE:

IMPIANTO EOLICO "TELTI"

Comuni di Telti e Calangianus (OT)

Relazione sull'analisi di possibili incidenti



File: GRE.EEC.R.99.IT.W.15590.00.012.00 - Relazione sull'analisi di possibili incidenti.docx

00	16/09/22	Issued		GF Name (Contactor)	GF Name (Contactor)
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED

GRE VALIDATION

Name (GRE)	Name (GRE)	A. Puosi (GRE)
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT 	GRE CODE																		
	GROUP	FUNCION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISIO N									
	GR	EEC	R	9	9	I	T	W	1	5	5	9	0	0	0	0	1	2	0

CLASSIFICATIO N	UTILIZATION SCOPE
--------------------	----------------------

This document is property of Enel Green Power S.p.A. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power S.p.A.



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.99.IT.W.15590.00.012.00

PAGE

2 di/of 19

INDEX

1. INTRODUZIONE	3
1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE	3
1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE	3
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	4
3. GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO	8
3.1. CARATTERISTICHE DEGLI AEROGENERATORI DEL NUOVO IMPIANTO IN PROGETTO	9
4. ANALISI DEI POSSIBILI INCIDENTI	11
4.1. INCIDENTI LEGATI ALLA ROTTURA DELLE PALE DELL'AEROGENERATORE.....	11
4.2. INCIDENTI LEGATI ALLA ROTTURA DELLA TORRE E AL COLLASSO DELLA STRUTTURA.....	12
4.3. INCIDENTI LEGATI AL LANCIO DI GHIACCIO	13
4.4. INCIDENTI LEGATI A POSSIBILI FULMINAZIONI	13
4.5. INCIDENTI LEGATI AD IMPATTO CON AVIFAUNA E CORPI ESTRANEI	14
5. ANALISI DI RISCHIO DEGLI INCIDENTI	16
6. SINTESI POSSIBILI INCIDENTI ED AZIONI MITIGATIVE.....	19

1. INTRODUZIONE

Il presente elaborato, facente parte integrante del Progetto definitivo del parco eolico denominato "Telti", proposto dalla Enel Green Power Italia S.r.l., nei territori di Telti e Calangianus (OT), esamina le circostanze incidentali potenzialmente verificabili nell'ambito delle condizioni di funzionamento dell'impianto. Tali eventi, in particolare, sono riferibili al verificarsi di cedimenti strutturali che possano determinare il distacco o il collasso degli elementi rotanti o delle strutture di sostegno, all'impatto dei rotori con l'avifauna o con corpi estranei, alla formazione di ghiaccio ed al rischio di fulminazioni.

Il documento, commissionato alla I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l. (di seguito anche IAT) da Enel Green Power Italia S.r.l. (di seguito anche EGPI) nell'ambito del contratto quadro per servizi di ingegneria autorizzata JA10080752, è stato predisposto in riferimento al quadro di conoscenze riferibili all'attuale stato dell'arte della tecnologia eolica nonché delle esperienze gestionali del Gruppo Enel in rapporto alle numerose centrali eoliche installate ed esercite a livello globale.

1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE

Enel Green Power (EGP) è stata fondata nel dicembre 2008 e, all'interno del Gruppo Enel, gestisce e sviluppa attività di generazione di energia da fonti rinnovabili a livello globale.

EGP opera con oltre 1.200 impianti in tutti e 5 i continenti ed è presente con asset operativi o in costruzione in 21 Paesi, gestendo attività di sviluppo in altri 5 Paesi. La capacità rinnovabile installata, detenuta ed esercita da EGP, è di oltre 54 GW attraverso un mix di generazione che include le principali fonti rinnovabili tra cui eolico, solare, idroelettrico e geotermico.

EGP riveste un ruolo fondamentale nel processo di transizione energetica, ponendosi come uno tra i principali operatori nel settore delle rinnovabili a livello mondiale.

L'obiettivo aziendale è quello di accompagnare il Pianeta verso una nuova era di energia sostenibile e decarbonizzata, accessibile a tutti.

Enel Green Power è inoltre uno dei membri fondatori di RES4MED - Renewable Energy Solutions for the Mediterranean and beyond, associazione nata nel 2012 per la promozione delle energie rinnovabili e delle infrastrutture di energia elettrica necessaria per il loro trasporto nell'area mediterranea.

1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE

Come evidenziato in sede introduttiva, la presente relazione costituisce il documento sulla valutazione dei possibili incidenti che potenzialmente possono essere riconducibili all'operatività degli aerogeneratori che verranno installati nell'impianto eolico "Telti".

Il capitolo 2 descrive in generale il sito ed il layout degli aerogeneratori di nuova costruzione.

Il capitolo 3 descrive in generale le caratteristiche tecniche e costruttive di un aerogeneratore moderno di grossa taglia ed espone brevemente il suo funzionamento.

Nel capitolo 4 vengono descritti i possibili di incidenti riconducibili agli aerogeneratori, individuati per diverse classi di incidente.

Il capitolo 5 affronta il tema della probabilità di accadimento degli incidenti individuati, mentre nel capitolo 6 vengono discusse le scelte progettuali che sono state adottate per mitigare sia la probabilità del verificarsi degli eventi incidentali, sia le eventuali ripercussioni dei possibili incidenti.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il proposto parco eolico ricade nella porzione centro-occidentale della regione storica denominata *Gallura*, al margine con la regione storica dell'*Alta Gallura*. In particolare, gli 11 aerogeneratori in progetto sono localizzati nel settore occidentale del territorio comunale di Telti nella provincia del Nordest Sardegna.

Le opere da realizzare riguardano anche il comune di Calangianus, interessato insieme al comune di Telti, dal passaggio del cavidotto AT a 150kV.

In funzione della direzione di provenienza dei venti dominanti, il layout di impianto si sviluppa secondo due linee ideali in direzione nord-ovest sud-est e un raggruppamento a nord-est ottimizzando, per quanto possibile, l'accessibilità alle postazioni eoliche appoggiandosi alla rete dell'esistente viabilità comunale.

L'inquadramento degli aerogeneratori nei luoghi di intervento, secondo la toponomastica locale, è riportato in Tabella 2.2.

La *Gallura* è una regione storica della Sardegna il cui territorio corrisponde alla porzione nord-orientale dell'Isola: dalla Maddalena a nord, passando per Olbia ad est, per poi estendersi sino al territorio pianeggiante di Oschiri ad ovest, quello montuoso di Buddusù e Alà dei Sardi a sud e Budoni e San Teodoro a sud-est.

In particolare, confina con le seguenti regioni storiche: l'*Alta Gallura* a nord-ovest, il *Nuorese* e la *Baronia* a sud, il *Montacuto* a ovest.

All'interno della regione storica della Gallura sono compresi i seguenti centri urbani: La Maddalena, Palau, Arzachena, Sant'Antonio di Gallura, Olbia, Golfo Aranci, Telti, Oschiri, Berchidda, Monti, Loiri Porto San Paolo, Buddusù, Alà dei Sardi, Padru, San Teodoro e Budoni.

Sotto il profilo geomorfologico il territorio di questa regione a carattere pianeggiante, collinare e a tratti montuoso, è costituito per la maggior parte da terreni granitici, che ne caratterizzano la morfologia, in cui a terrazzi orografici si mescolano brevi dorsali e piccoli ripiani recanti blocchi granitici. Le emergenze orografiche principali sono date dal *Monte Limbara* (la cui *Punta Balestrieri* raggiunge i 1.362 metri di altitudine), dal *Monte Nieddu* (971 metri), in territorio di Padru, e dal *Monte Salici* (che raggiunge i 911 metri) nell'attuale *Alta Gallura*.

Gli aerogeneratori saranno installati su due linee ideali e parallele in direzione nord-ovest sud-est e un raggruppamento a nord-est. Nel dettaglio, l'impianto è disposto in tre porzioni di territorio così sintetizzabili (da nord verso sud-ovest):

- il raggruppamento a nord-est, formato dagli aerogeneratori TL-01 e TL-02, è localizzato ai piedi del rilievo collinare denominato *M. Cantoni* (372m);
- la linea centrale, costituita dagli aerogeneratori TL-03, TL-05, TL-06, TL-10 e TL-11, che si sviluppa in direzione nord-ovest sud-est dalla località *Multa Longa*, ad est del *M. della Neula*, sino alla località *Pedra Maggiore*;
- infine, la porzione ad ovest, dove si sviluppa una seconda linea di aerogeneratori con TL-04, TL-07, TL-08 e TL-09, che lambisce il confine con il territorio comunale di Calangianus a partire dal *M. Cunconi* sino alla località *Cariganu*.

Come desumibile dal Piano Forestale Ambientale Regionale, l'area in oggetto si trova all'interno del Distretti Forestali "n. 01 - Alta Gallura", caratterizzato principalmente da un substrato granitico.

Dal punto di vista biogeografico il distretto sopra citato ricade interamente all'interno del distretto siliceo del sottosectore costiero e collinare, ad eccezione di Capo Figari e dell'Isola di Tavolara che ricadono, invece, nel distretto nord-orientale del sottosectore dei monti calcarei della Sardegna centro-orientale (Arrigoni, 1983).

Dal punto di vista dei caratteri idrografici l'area è collocata all'interno del bacino idrografico del *Padrongiano*, delimitato a ovest dalle propaggini orientali del *Massiccio del Limbara*, a sud dalle propaggini settentrionali dei *Monti di Alà*, a nord e ad est dal mare. Il *Rio Padrongiano*, a regime torrentizio, ha origine nella parte orientale del complesso del *Limbara* dalla confluenza del *Rio di Enas* e del *Rio S. Simone* e sfocia nel *Golfo di Olbia* dopo un percorso di 35 km circa. L'altimetria del bacino varia con quote che vanno da 0 m (s.l.m.) in corrispondenza della foce del *Fiume Padrongiano* ai 1114 m (s.l.m.) in corrispondenza del versante orientale dei *Monti del Limbara*.

Sotto il profilo dell'infrastrutturazione viaria, il sito è raggiungibile attraverso un sistema di viabilità secondaria innestato su alcune direttrici principali: la SP138 Bis, a sud-ovest, dalla quale parte una strada secondaria che, proseguendo verso nord, permette di raggiungere TL-09, TL-08 e TL-07; la SP147, che attraverso un tratto di strada interpodereale permette di raggiungere le postazioni TL-10 e TL-11; e, infine, la SS 127 Settentrionale Sarda dalla quale

si diparte una rete di viabilità secondaria verso sud-ovest, permettendo di raggiungere gli aerogeneratori TL-06, TL-05 e TL-04, e verso nord-est che conduce agli aerogeneratori TL-03, TL-02 e TL-01.

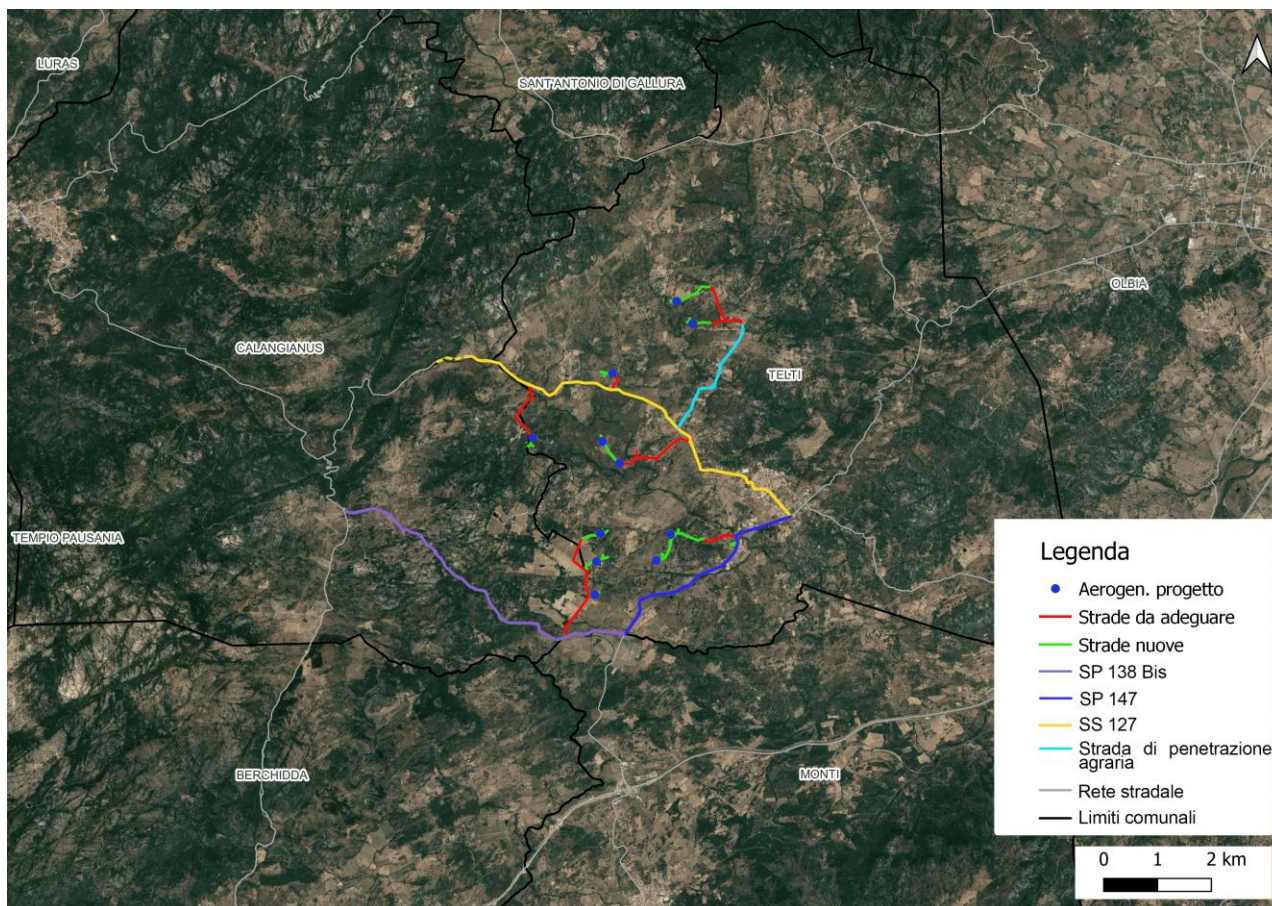


Figura 2.1: Sistema della viabilità di accesso all'impianto

Cartograficamente, l'area del parco eolico è individuabile nella Carta Topografica d'Italia dell'IGMI in scala 1:25000 nel Foglio 443 Sez. I – Calangianus e Sez. II – Monti e nel Foglio 444 Sez. IV Olbia ovest; nella Carta Tecnica Regionale Numerica in scala 1:10000 alle sezioni 443120 – Monte sa Eltica, 444050 – Serra di Monte Pino e 44490 – Telti.

Rispetto al tessuto edificato degli insediamenti abitativi più vicini (GRE.EEC.X.99.IT.W.15590.05.020.00), il sito di intervento presenta, indicativamente, la collocazione individuata in Tabella 2.1.

Tabella 2.1: Distanze dagli aerogeneratori rispetto ai più vicini centri abitati

Centro abitato	Posizionamento rispetto al sito	Distanza minima dal sito (km)
Priatu (S. Antonio di Gallura)	N	2,94
Putzolu (Olbia)	N-E	7,27
Telti	E	1,64
La Palazzina (Monti)	S-E	6,02
Monti	S	5,20
Berchidda	S-O	14,47
Calangianus	N-O	8,98

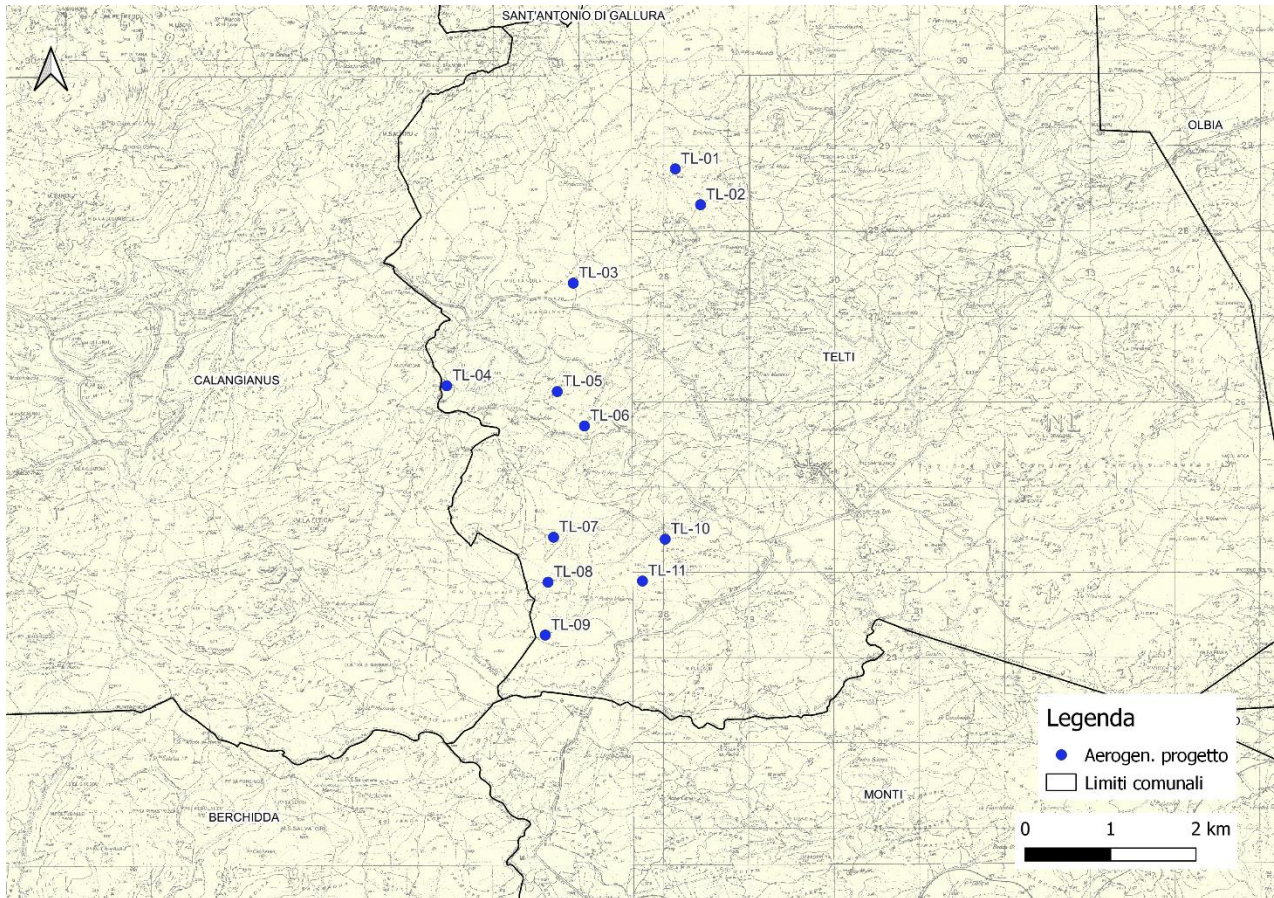


Figura 2.2: Ubicazione degli aerogeneratori in progetto su IGM storico

L'inquadratura catastale delle installazioni eoliche in progetto è riportata negli elaborati GRE.EEC.D.99.IT.W.15590.00.023.00 mentre l'inquadratura catastale del tracciato cavidotti è riportata nell'elaborato GRE.EEC.D.99.IT.W.15590.10.005.00.

L'impianto sarà servito da una viabilità interna di collegamento tra gli aerogeneratori, prevalentemente incardinata sulla viabilità comunale esistente tra le località *M. Cantoni* a nord-est per TL-01 e TL-02, *Lu Grandinatu* per l'aerogeneratore TL-03, *M. Cunconi* per TL-04, *La Itichedda* per TL-05 e TL-06, *Serra Uddastru* e *Pedra Maggiore* per TL-10 e TL-11 e, infine, *Cariganu* per i restanti tre aerogeneratori, funzionale a consentire il processo costruttivo e le ordinarie attività di manutenzione in fase di esercizio.

Tabella 2.2: Inquadratura delle postazioni eoliche nella toponomastica locale

ID Aerogeneratore	Località
TL-01	Monte Cantoni
TL-02	Monte Cantoni
TL-03	Multa Longa
TL-04	Monte Cunconi
TL-05	La Itichedda
TL-06	La Itichedda
TL-07	Campo di Ficu
TL-08	Perda Maggiore
TL-09	Cariganu
TL-10	Serra Uddastru
TL-11	Pedra Maggiore

Le coordinate degli aerogeneratori espresse nel sistema Gauss Boaga – Roma 40 sono le seguenti.

Tabella 2.3: Coordinate aerogeneratori in Gauss Boaga – Roma 40

Aerogeneratore	GB Est	GB Nord
TL-01	1 528 090	4 528 543
TL-02	1 528 385	4 528 124
TL-03	1 526 895	4 527 206
TL-04	1 525 411	4 526 004
TL-05	1 526 707	4 525 936
TL-06	1 527 025	4 525 533
TL-07	1 526 664	4 524 230
TL-08	1 526 599	4 523 704
TL-09	1 526 567	4 523 085
TL-10	1 527 971	4 524 208
TL-11	1 5277 05	4 523 717

3. GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO

Un aerogeneratore (o turbina eolica) è, in generale, costituito dai seguenti sottosistemi principali:

- il rotore eolico, che trasforma l'energia cinetica del vento in energia meccanica mediante alcune pale, opportunamente sagomate secondo un profilo aerodinamico e montate su un asse orizzontale o verticale rispetto al terreno;
- l'apparato di conversione dell'energia meccanica in energia elettrica, basato su un generatore elettrico rotante azionato dal rotore eolico attraverso un sistema di trasmissione, che spesso comprende un moltiplicatore di giri per ottenere la velocità appropriata per il generatore;
- il convertitore statico di frequenza e tensione, se necessario per ottenere una potenza elettrica con caratteristiche diverse da quelle in uscita dal generatore ed appropriate all'impiego.

Nelle macchine ad asse orizzontale, come quelle che verranno impiegate nell'impianto eolico oggetto della presente relazione, il rotore ha di norma tre pale, generalmente costruite in vetroresina con eventuali rinforzi in fibra di carbonio. Le pale sono a passo variabile, cioè il loro angolo di calettamento al mozzo può essere variato da un servomeccanismo comandato dal sistema di controllo dell'aerogeneratore. Gli aerogeneratori ad asse orizzontale comprendono, oltre al rotore, i seguenti componenti strutturali principali:

- la navicella o gondola, in cui sono alloggiati gli alberi di trasmissione, il moltiplicatore di giri, il generatore, eventuali altri componenti elettrici e le apparecchiature ausiliarie e di controllo; la navicella viene orientata dal sistema di controllo per mantenere l'asse del rotore allineato alla direzione del vento;
- il sostegno, generalmente metallico con struttura tubolare o a traliccio, che ha la funzione di mantenere il rotore ad un'altezza opportuna rispetto al suolo (la velocità del vento tende ad aumentare con l'altezza) ed appoggia, a sua volta, su una fondazione in calcestruzzo armato.

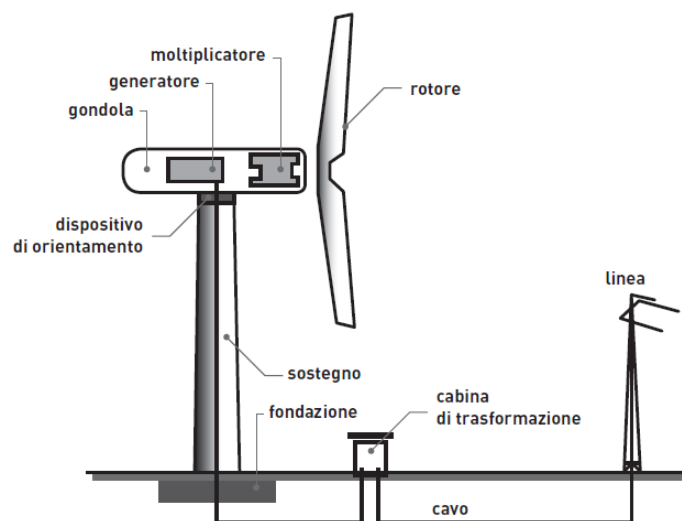


Figura 3-1: Elementi tipici di un aerogeneratore

La figura successiva mostra un dettaglio del rotore e della navicella:



Figura 3-2: Caratteristiche dettagliate dei componenti presenti in una turbina eolica

Il meccanismo di funzionamento della macchina è il seguente: la vena fluida impatta contro le pale della turbina, mettendo in moto rotatorio il rotore. Il rotore, che è calettato al generatore elettrico attraverso l'albero lento, il moltiplicatore di giri e l'albero veloce, trasferisce l'energia cinetica al generatore, il quale a sua volta la converte in energia elettrica.

Il trasformatore presente in navicella innalza la tensione dell'energia prodotta e attraverso un sistema di cavidotti l'energia prodotta viene immessa nella rete nazionale.

3.1. CARATTERISTICHE DEGLI AEROGENERATORI DEL NUOVO IMPIANTO IN PROGETTO

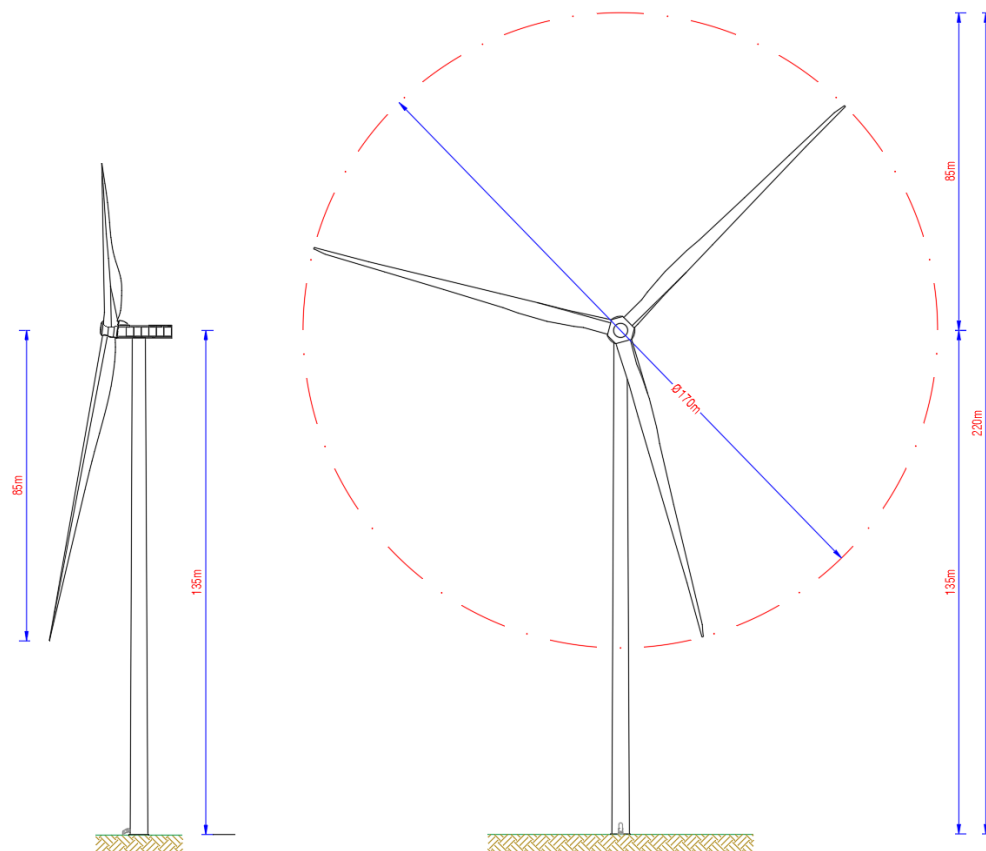
Gli aerogeneratori che verranno installati nel nuovo impianto oggetto di questo studio saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste sarà pari a 6,0 MW. Il tipo e la taglia definitiva del modello dell'aerogeneratore da installare saranno comunque individuati in seguito della fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva.

Si riportano di seguito le principali caratteristiche tecniche di un aerogeneratore con potenza nominale pari a 6,0 MW:

Tabella 4: Caratteristiche tecniche aerogeneratore

Potenza nominale	6,0 MW
Diametro del rotore	170 m
Lunghezza della pala	83,5 m
Corda massima della pala	4,5 m
Area spazzata	22.698 m ²
Altezza al mozzo	135 m
Classe di vento IEC	IIIA
Velocità cut-in	3 m/s
V nominale	10 m/s
V cut-out	25 m/s

Nell'immagine seguente è rappresentata una turbina con rotore di diametro pari a 170 m e potenza fino a 6,0 MW:


Figura 3-3: Vista e caratteristiche di un aerogeneratore da 6,0 MW della tipologia dimensionale prevista in progetto

Ogni aerogeneratore è equipaggiato di generatore elettrico asincrono, di tipo DFIG (Directly Fed Induced Generator) che converte l'energia cinetica in energia elettrica ad una tensione nominale di 690 V. È inoltre presente su ogni macchina il trasformatore MT/BT per innalzare la tensione di esercizio da 690 V a 33.000 V.

4. ANALISI DEI POSSIBILI INCIDENTI

Nell'ambito della progettazione del nuovo impianto eolico, uno dei molteplici aspetti che è stato preso in considerazione è la valutazione degli effetti sull'ambiente circostante derivanti da un evento incidentale dovuto a varie tipologie di cause scatenanti.

Le cause che stanno all'origine degli incidenti possono essere di vario genere, da cause di tipo naturale, come ad esempio tempeste, raffiche di vento eccessive e formazione di ghiaccio a cause di tipo umano, come errori e comportamenti imprevisti.

La maggior frequenza di incidenti si verifica nella fase di funzionamento, poiché essa è caratterizzata da un'estensione temporale molto ampia (la vita utile di un impianto varia dai 25 ai 30 anni) e da una più complessa combinazione di azioni, le quali hanno implicazioni sul comportamento strutturale e funzionale dell'aerogeneratore.

Le tipologie di incidenti che sono state analizzate sono le seguenti:

- Incidenti legati alla rottura delle pale dell'aerogeneratore;
- Incidenti legati alla rottura della torre e al collasso della struttura;
- Incidenti legati al lancio di ghiaccio;
- Incidenti legati a possibili fulminazioni;
- Incidenti legati alla collisione con l'avifauna e con corpi aerei estranei.

4.1. INCIDENTI LEGATI ALLA ROTTURA DELLE PALE DELL'AEROGENERATORE

La rottura delle pale di un aerogeneratore è una delle cause più frequenti di guasto dell'aerogeneratore. Esso può includere sia la rottura dell'intera pala alla radice, sia la rottura di un frammento di essa. Le pale sono costruite in materiale molto più leggero rispetto a quello della torre. Infatti, le pale sono principalmente costituite da vetroresina con inserti in carbonio mentre la torre è prevalentemente costituita da acciai, permettendo che non vi siano troppe sollecitazioni di natura aerodinamica sulla torre e garantendo maggior equilibrio alla struttura.

La rottura di una pala, spesso avvenuta alla radice di essa, è un evento che ha due cause principali:

1. Rottura del giunto di collegamento tra mozzo e pala. È sovente, infatti, che la rottura avviene tra il longherone (corpo strutturale della pala) ed il mozzo;
2. Fenomeni di fatica sul profilo di pala causati dalla discontinuità della struttura.

Diversi studi¹ condotti a livello internazionale tra il 1990 e il 2014 hanno evidenziato che la probabilità di rottura di una pala in un anno è compresa tra lo 0,1% e lo 0,7%. La variabilità dei dati è dovuta al differente numero di campioni, a differenti tassi di guasto e differenti ore di manutenzione dovute alla rottura. Uno studio² americano del 2013, su un campione di circa 10,000 aerogeneratori, caratterizzati dall'essere operativi da anni diversi, ha evidenziato che circa il 2% delle turbine (nei 10 anni di funzionamento) richiedono la sostituzione della pala, considerando però anche tutte le sostituzioni che avvengono nei primi due anni di funzionamento dovute a problemi durante il trasporto e la costruzione.

Lo studio evidenzia inoltre che la causa maggiore di rottura delle pale è dovuta all'impatto

¹ Branner K., Ghadirian A., "Database about blade faults", 2014

² Lantz E. (NREL), "Operations Expenditures: Historical Trends and Continuing Challenges", 2013

con i fulmini. Per questo motivo le normative tecniche prevedono dei sistemi di protezione per gli aerogeneratori, come ad esempio dei sistemi di drenaggio della corrente proveniente dal fulmine. Nel caso però la corrente fulminea superi quella progettuale si possono verificare dei danneggiamenti alla pala e conseguente rottura.

La rottura alla radice della pala causa il suo distacco ed un conseguente volo della pala fino al raggiungimento a terra. Questo fattore deve essere strettamente considerato nella progettazione di un impianto eolico. Una volta ipotizzato il distacco di pala, si va quindi ad analizzare il moto di caduta da essa percorsa. La complessa struttura geometrica ed aerodinamica della pala porta a dover studiare in modo più approfondito il fenomeno del distacco di pala. Infatti, non è possibile dapprima definire che l'angolo a cui vi è la distanza massima percorsa è 45° , come per un classico moto parabolico (moto del proiettile).

Un importante fattore è la **Gittata**, cioè la distanza percorsa da un corpo lasciato in aria lungo l'asse delle ascisse. Essa dipende fortemente dall'angolo di distacco, dalle caratteristiche della pala come dimensione, peso e profilo aerodinamico, dalla velocità di rotazione del corpo, dalla velocità del vento e dalle forze di attrito che agiscono sulla pala durante il volo.

Il calcolo della Gittata è necessario per la finalizzazione del posizionamento delle turbine. Il calcolo, affrontato con maggior dettaglio nel documento "GRE.EEC.C.99.IT.W.15590.00.009.00 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale" necessita di alcune ipotesi semplificative per descrivere il moto parabolico della pala:

- Viene considerato il distacco della totalità della pala in modo istantaneo. Questa ipotesi è assolutamente conservativa dato che non si considera la resistenza posta dalla pala;
- Viene considerata la rotazione massima (massimi giri al minuto) per la turbina al momento del distaccamento;
- Sono considerati solamente gli effetti gravitazionali sul moto e non gli effetti di attrito di aria e vento. Questa ipotesi è conservativa, dato che causa un incremento del valore della gittata massima della pala distaccata. Non sono considerati inoltre gli effetti di portanza sul profilo della pala;
- Il moto della pala al momento del distacco è un moto complesso, che dipende strettamente dalle dimensioni della pala, dal suo peso e dalle forze aerodinamiche in gioco. Il modello teorico che meglio descrive il moto della pala è il "moto rotazionale complesso", che permette di descrivere il moto della pala tridimensionalmente. In questa analisi, trascurando gli effetti di aria e vento, il moto della pala distaccata viene descritto nel punto del centro di massa (baricentro), posto a $1/3$ della lunghezza di pala, al fine di descrivere un moto dipendente solamente dagli effetti gravitazionali;
- Nessuna mutazione della velocità del vento durante il volo. La velocità del vento durante il volo è pari a quella al momento del distacco e pari alla velocità massima di funzionamento.

Dall'elaborato GRE.EEC.C.99.IT.W.15590.00.009.00 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale si evince che la massima gittata per l'aerogeneratore di riferimento è circa pari a circa 240 metri. Tutte le turbine in progetto sono a distanza da elementi sensibili maggiore della gittata massima.

Inoltre, le numerose ipotesi semplificative di calcolo rispetto al caso reale causano anche un aumento del valore reale di gittata massima.

Infine, la probabilità che il rotore, distaccandosi, percorra esattamente la direzione ottimale per l'impatto con l'elemento sensibile è molto bassa e garantisce una riduzione del rischio a priori.

4.2. INCIDENTI LEGATI ALLA ROTTURA DELLA TORRE E AL COLLASSO DELLA STRUTTURA

La rottura di una pala o di un frammento di essa, descritta al paragrafo 4.1, è a sua volta una delle cause principali della rottura della torre e del collasso della struttura. La rottura di pala genera un moto irregolare nel rotore che può provocare il contatto con altri elementi

dell'aerogeneratore o con il terreno.

Il moto irregolare del rotore causa una perdita della stabilità strutturale dell'aerogeneratore e una serie di deformazioni/inflessioni sull'aerogeneratore. Questo può portare a:

1. Ribaltamento della navicella;
2. Deformazione della torre.
3. Ribaltamento dell'intero sistema torre-fondazione.

Questo terzo elemento è sicuramente il più impattante, poiché causa la caduta dell'intera torre, alta più di 100 metri con possibile impatto su elementi sensibili, dato lo scalzamento dell'intera fondazione.

Vi sono ulteriori cause naturali che possono causare il collasso della struttura quali terremoti o ulteriori catastrofi naturali. Queste cause non sono prevenibili ma la corretta mitigazione del rischio può ridurre sostanzialmente la probabilità di accadimento dell'incidente ed il danno ad esso associato.

Al fine di mitigare questo rischio, genericamente non si va ad agire direttamente sulla struttura dell'aerogeneratore ma è importante:

- Definire un corretto dimensionamento delle fondazioni, valutando tutti i carichi in gioco e la struttura del suolo;
- Porre gli aerogeneratori a distanza di sicurezza da elementi sensibili. Infatti, tramite Decreto Ministeriale del 10 settembre 2010, sono state imposte distanze di sicurezza da abitazioni e da strade provinciali/nazionali, al fine di evitare l'impatto con esse in caso di collasso della struttura;
- Mantenere conformità tra quanto definito in fase di progettazione e quanto applicato in fase di esecuzione.

4.3. INCIDENTI LEGATI AL LANCIO DI GHIACCIO

L'impianto eolico oggetto di questo studio è situato in un'area collinare con elevazione massima intorno ai 400 metri s.l.m. Data l'elevazione, l'area è difficilmente caratterizzata da climi freddi durante l'inverno e la formazione di ghiaccio lungo le pale e la conseguente potenziale caduta di frammenti di ghiaccio da un'altezza che varia tra i 40 e i 200 metri, è da ritenersi un evento molto improbabile.

Il percorso della massa di ghiaccio al momento della caduta non è facilmente prevedibile a priori dati i numerosi fattori in gioco: peso della massa di ghiaccio, posizione della massa lungo la pala, angolo e velocità della pala al momento del distacco della massa di ghiaccio, altezza dell'aerogeneratore e velocità del vento.

Tuttavia, nell'area dell'impianto in oggetto non si segnala la presenza né di frequentazione umana stabile né di elementi sensibili che potrebbero subire l'impatto con la massa di ghiaccio.

Il rischio in esame può essere quindi definito come molto basso, considerando la combinazione delle condizioni climatiche e l'assenza di persone stabili in sito e di elementi sensibili vicini.

4.4. INCIDENTI LEGATI A POSSIBILI FULMINAZIONI

L'impatto di un fulmine su un aerogeneratore può causare i seguenti incidenti:

- Incendio, dovuto anche alla presenza di sostanze infiammabili (es. materiale pale, olio di raffreddamento nella navicella). L'incendio non causa un'interruzione istantanea del

rotore, che continua a girare fino a quando l'incendio provoca la rottura ed il totale danneggiamento delle pale.

- Rottura della pala o di un frammento di essa. L'incendio può causare la rottura di pala, provocando il volo di quest'ultima ed il possibile impatto con elementi sensibili nella zona. Maggiori dettagli sono riportati al paragrafo 4.1 e nel documento GRE.EEC.C.99.IT.W.15590.00.009.00 - Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale.

Per ovviare a tale pericolo, gli aerogeneratori sono dotati di sistemi anti-fulmini formati da un sistema di recettori metallici applicato sulle pale, che permettono la messa a terra della corrente proveniente dal fulmine stesso. La norma CEI 81-1 evidenzia che questi sistemi di protezione devono essere della classe più elevata (Classe I).

Nel caso di accadimento, una possibile misura di mitigazione a questo rischio, non prevenibile a monte, è la scelta del posizionamento degli aerogeneratori. Garantire un'ottima viabilità nell'area di impianto e garantire la giusta distanza di sicurezza da strade e fabbricati, limita al massimo lo sviluppo dell'incendio e permette alle Autorità di intervenire in maniera semplice e rapida nell'area di incendio, riducendo al minimo l'impatto su persone ed elementi sensibili.

4.5. INCIDENTI LEGATI AD IMPATTO CON AVIFAUNA E CORPI ESTRANEI

L'impatto che ha un impianto eolico sull'avifauna locale è uno dei maggiori punti di studio in fase di localizzazione e progettazione dell'impianto eolico.

Dal punto di vista dei rapporti del progetto con i più prossimi siti oggetto di tutela per la presenza di avifauna di interesse conservazionistico si rileva come l'area individuata per la realizzazione dell'impianto eolico non ricada all'interno di:

- Siti di Importanza Comunitaria (SIC). La ZSC/SIC più vicina, denominata "Monte Limbara", è distante circa 3,7 km dall'aerogeneratore più vicino;
- Zone di Protezione Speciale (ZPS), la più vicina delle quali è denominata "Isole del Nord - Est tra Capo Ceraso e Stagno di San Teodoro" dista circa 19,0 km dall'aerogeneratore più vicino
- Aree IBA; la più vicina al sito di progetto è denominata "Arcipelago di Tavolara, Capo Ceraso e Capo Figari" i cui confini distano circa 18,3 km dall'aerogeneratore più vicino.

Ad ogni modo, in qualsiasi area di installazione, non può escludersi la probabilità di collisione delle pale con l'avifauna locale. Gli effetti potenziali del progetto sulle risorse avifaunistiche saranno in ogni caso oggetto di una attività di monitoraggio dell'avifauna, da condursi sia prima della costruzione dell'impianto, che durante gli anni di funzionamento.

Uno studio³ del 2009 condotto dall'Energy Policy Department dell'University of Sussex, ha evidenziato che, su un campione di 339 aerogeneratori (274 MW) negli USA, la mortalità di avifauna per impatto con turbine eoliche è molto bassa, pari in media a 0,28 morti per ogni GWh prodotto. Lo studio ha stimato che le morti di uccelli causate da impianti a combustibile fossile sono pari a 5,2 morti per ogni GWh prodotto, a causa di deforestazioni, collisioni con elementi delle centrali, fumi tossici in ambiente e, principalmente, accelerazione del cambiamento climatico.

Vi è inoltre, seppur con probabilità molto bassa, il possibile rischio di impatto con altri corpi estranei (es. droni).

³ Sovacool B.K., "Contextualizing avian mortality: A preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity", 2009



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.99.IT.W.15590.00.012.00

PAGE

15 di/of 19

Inoltre, la campitura a bande rosse sulle turbine ed il sistema di illuminazione notturno garantiscono un aumento della visibilità anche di notte ed un'ulteriore riduzione del rischio di impatto.

5. ANALISI DI RISCHIO DEGLI INCIDENTI

Il livello rischio legato ad un incidente è funzione del danno provocato, e della probabilità di accadimento dell'evento come da relazione illustrata di seguito:

$$R = f(P, D) = P \times D$$

Dove:

- R è il rischio
- P è la probabilità di accadimento dell'evento
- D è la magnitudo del danno causato dall'evento

L'analisi quantitativa del rischio è effettuata assegnando un numero da 1 a 4 sia alla probabilità che al danno. Si può quindi definire una matrice di rischio per identificarne la portata come fatto di seguito:

4	4	8	12	16
3	3	6	9	12
2	2	4	6	8
1	1	2	3	4
Probabilità / Rischio	1	2	3	4
	Danno / Magnitudo (D)			

Figura 5-1: Matrice di Rischio

La classificazione dei livelli è la seguente:

1. Probabilità:

- **P=1** -> evento molto improbabile (concatenamento di una serie di eventi molto improbabili; evento che praticamente non si è mai verificato);
- **P=2** -> evento poco probabile, accaduto raramente;
- **P=3** -> evento probabile, con già alcuni riscontri nella letteratura;
- **P=4** -> evento molto probabile.

2. Danno

- **D=1** -> danno lieve;
- **D=2** -> danno di modesta entità;
- **D=3** -> danno grave;
- **D=4** -> danno molto grave.

Dal prodotto di probabilità e danno si ottiene quindi il livello di rischio associato a tale evento.

Essendo alcuni tra questi eventi non del tutto eliminabili o prevenibili a priori, l'obiettivo delle ricerche in ambito di sicurezza è quello di ridurre al minimo sia la probabilità di accadimento (ove possibile) sia il danno da esso procurato, tramite l'implementazione di normative e linee guida specifiche di settore.

Applicato agli incidenti analizzati in questo elaborato, l'accadimento di un dato evento e le conseguenze a elementi sensibili ad esso correlate dipende da una concatenazione di eventi di seguito riportati:

- Probabilità che l'evento accada sulla turbina eolica;
- Probabilità che, accaduto l'evento, esso causi un danno ad un elemento sensibile.
- Fattori che possano alterare la probabilità quali fattori strutturali della turbina (usura, vita utile ecc.) e fattori atmosferici (vento, tempesta, ecc.)

Può essere quindi definita una serie generica di eventi legati agli incidenti analizzati:

1. Rottura della pala e distacco con moto parabolico e impatto con elemento sensibile ad una distanza minore della gittata massima;
2. Rottura della torre, collasso della struttura ed impatto elemento sensibile ad una distanza minore della altezza massima dell'aerogeneratore;
3. Formazione e caduta di massa di ghiaccio con conseguente impatto con elemento sensibile;
4. Fulminazione dell'aerogeneratore con conseguente incendio o rottura di pala e impatto con elemento sensibile;
5. Impatto possibile con avifauna e corpi estranei.

Per quanto riguarda l'impianto oggetto di questo studio, si definiscono di seguito i livelli di danno e probabilità per ciascuno degli eventi sopracitati:

1. Rottura della pala e distacco con moto parabolico e danno ad elemento sensibile. Il **danno** risulterebbe pari a **"4 - danno molto grave"**, ma la **probabilità** risulta essere pari a **"1 - evento molto improbabile"**, dato che si è mantenuta, da tutti gli elementi sensibili identificati, una distanza maggiore della gittata massima. **Il livello di rischio** risulta quindi essere pari a **4**;
2. Rottura della torre, collasso della struttura e danno ad elemento sensibile. Il **danno** risulterebbe pari a **"4 - danno molto grave"** ma la **probabilità** risulta essere pari a **"1 - evento molto improbabile"**, dato che si è mantenuta da tutti gli elementi sensibili identificati una distanza maggiore della altezza massima della turbina, come riportato anche nelle linee guida del 10 settembre 2010. **Il livello di rischio** risulta quindi essere pari a **4**;
3. Formazione e caduta di massa di ghiaccio con conseguente impatto con elemento sensibile. Il **danno** risulterebbe come **"3 - danno grave"** ma la **probabilità** risulta essere pari a **"1 - evento molto improbabile"**, date le condizioni climatiche e dato che si sono mantenute distanze di sicurezza da elementi sensibili. **Il livello di rischio** risulta quindi essere pari a **3**;
4. Fulminazione dell'aerogeneratore con conseguente incendio o rottura di pala e impatto con elemento sensibile. Il **danno** risulterebbe come **"4 - danno molto grave"** ma la **probabilità** pari a **"1 - evento molto improbabile"**. Infatti, nel dimensionamento del parco eolico, oltre a mantenere le distanze da elementi sensibile, come definito dalle

normative tecniche, è prevista l'installazione di sistemi anti-fulminazione che riducono ulteriormente la probabilità dell'evento. **Il livello di rischio** risulta quindi essere pari a **4**;

5. Impatto possibile con avifauna e corpi estranei. Il **danno** risulterebbe come "**2 – danno di modesta entità**" e la **probabilità** pari a "**2 – evento poco probabile**". Il livello di **rischio** risulta pari a **4**. Sono previste alcune misure di sicurezza per la visibilità degli aerogeneratori, quali illuminazione notturne e campiture rosse sulle pale. Infatti, la disposizione sparsa degli aerogeneratori, gli ampi spazi tra un aerogeneratore e l'altro e la presenza di altri impianti esistenti garantiscono che non vi sia una sensibile maggiorazione dell'impatto sull'avifauna né su altri corpi estranei (es. droni), essendo la presenza di impianti eolici nella zona già ben assimilata dall'ambiente circostante.

La sintesi delle azioni mitigative è riportata nel capitolo 6.

6. SINTESI POSSIBILI INCIDENTI ED AZIONI MITIGATIVE

Le azioni mitigative sono state analizzate in fase di progettazione dell'impianto eolico e sono riportate di seguito in tabella:

Tabella 5: Sintesi possibili incidenti ed azioni mitigative

Evento	Livello Rischio	Azione Mitigativa
Incidente associato alla rottura della pala	4 (D=4, P=1)	Il posizionamento degli aerogeneratori a distanze di sicurezza da elementi sensibili, considerando anche gli studi sulla gittata massima della pala distaccata, dettagliati nel documento "GRE.EEC.R.73.IT.W.13824.00.039.00 – <u>Relazione sulla gittata massima degli elementi rotanti</u> " garantiscono una minimizzazione del rischio.
Incidente associato alla rottura della torre e collasso della struttura	4 (D=4, P=1)	Un corretto dimensionamento delle fondazioni ed una corretta esecuzione del progetto in fase di costruzione garantiscono una riduzione del rischio. Inoltre, il rischio è ulteriormente mitigato dal mantenimento di distanze maggiori della altezza massima della turbina da elementi sensibili, al fine di prevenire l'impatto in caso di collasso della struttura.
Incidente associato a fulminazione	4 (D=4, P=1)	Evento mitigato dal mantenimento di distanze di sicurezza da elementi sensibili e dall'installazione di sistemi anti-fulminazione.
Incidente a caduta massa di ghiaccio	3 (D=3, P=1)	Evento mitigato da condizioni climatiche che non permettono formazione di ghiaccio e da mantenimento di distanze di sicurezza da elementi sensibili.
Impatto con avifauna e corpi estranei	4 (D=2, P=2)	Evento mitigato da due fattori. Si prevede infatti l'installazione di sistemi per il rispetto delle corrette misure di sicurezza per la visibilità degli aerogeneratori, quali illuminazione notturne e campiture rosse sulle pale. Le previste attività di monitoraggio dell'avifauna da consursi in fase pre-operazionale e durante la fase di esercizio potranno consentire di identificare eventuali criticità legate ai potenziali fenomeni di collisione delle pale con l'avifauna e di individuare, ove opportune, mirate misure di mitigazione.