



Comune di LUCERA



REGIONE PUGLIA

PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO "LUCERIA"

Nel Comune di Lucera

N.33 aerogeneratori di potenza fino a 6MW

CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DEGLI ELEMENTI ROTANTI VERIFICA AI SENSI DEL D.M. 10-9-2010

Committente:



AEP s.r.l.

P.zza Giovanni Paolo II, 8
71017 Torremaggiore (FG)
aepvento@pec.it

Visti:

Progettazione:



Tecnico Competente:

Ing. Francesco Di Cosmo



Elaborazione: **MAGGIO 2022**

PREMESSA

In riferimento al D.M. 10-9-2010 "*Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili*", allegato 4, punto 7.1 - "*Analisi dei possibili incidenti*" - riporta testualmente: "***E' opportuno prendere in esame l'idoneità delle caratteristiche delle macchine, in relazione alle condizioni meteorologiche estreme del sito. In tal senso: - andrebbe valutata la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentate***".

La presente relazione, dunque, in ottemperanza al D.M. su citato riguarda il calcolo della gittata in caso di rottura di un frammento degli elementi rotanti nell'ipotesi che la rottura avvenga in modo fragile e che i sistemi di controllo quali freno aerodinamico e sistema parafulmine siano completamente fuori servizio.

Il frammento considerato riguarda un pezzo della pala con rottura a m.5 dalla punta della pala, condizione di calcolo che produce la massima gittata nell'ipotesi cautelativa di previsione, ma anche di bassissima probabilità di accadimento stante la tipologia costruttiva degli attuali aerogeneratori.

Per la quantificazione della gittata massima si utilizzerà il modello della "***rotazione complessa del corpo rigido***" basandosi sulle seguenti ipotesi:

1. Il distacco del frammento, e quindi la gittata, è funzione dell'angolo di distacco che l'asse della pala forma con l'orizzontale;
2. Si ipotizza che la sezione di distacco della pala dal resto della struttura sia netta, ovvero che la rottura avvenga in modo fragile senza considerare l'effettiva struttura fibrosa e filamentosa del corpo della pala, immersa in una matrice di resina epossidica.
3. Si tiene conto della resistenza indotta dall'attrito del frammento con l'aria.
4. Si tiene conto della rotazione del pezzo durante il volo.

Il calcolo che segue è stato condotto in maniera molto approfondita, considerando i diversi aspetti fisici ed è stato svolto con molto rigore, tuttavia nella realtà il verificarsi delle cause che portano ad una rottura di un frammento di pala e del conseguenziale urto sono molto improbabili. Con ciò si vuole rappresentare che diversi studi probabilistici hanno concluso che la probabilità che un veicolo possa essere colpito da un frammento di pala, a seguito della sua rottura a 5 metri dalla punta, ha valori estremamente elevati tali da rendere quasi nullo il rischio stesso.

LE VERIFICHE E LE VALUTAZIONI

Oggetto del presente studio sono la verifica delle distanze del D.M. 10-9-2010 rispetto alle strade statali e provinciali e le valutazioni del rischio della gittata massima rispetto a ricettori e strade secondarie, si elencano nell'ordine:

- A. **la verifica** del rispetto del D.M. 10-9-2010 che con l'allegato 4, punto 7.2 impone: *"la distanza di ogni turbina eolica da una strada provinciale o nazionale deve essere superiore all'altezza massima dell'elica comprensiva del rotore e comunque non inferiore a 150 m dalla base della torre"*;
- B. la **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto alle strade nazionale e provinciali;
- C. la **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto ai recettori;
- D. la **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto alle strade di livello inferiore alle strade provinciali – **NON è richiesta dal D.M. 10-9-2010 - poiché il rischio dovuto alla concomitanza degli eventi, rottura del frammento di pala a 5 metri dalla punta e la probabilità di caduta dello stesso su un recettore o un veicolo in transito su una strada secondaria è estremamente basso;**
- E. eventuale **valutazione del rischio** rispetto ad una rottura accidentale degli elementi rotanti e la probabilità di intercettare un recettore o un veicolo su una strada.

GLI AEROGENERATORI

Lo studio che segue viene condotto per l'aerogeneratore avente le seguenti caratteristiche:

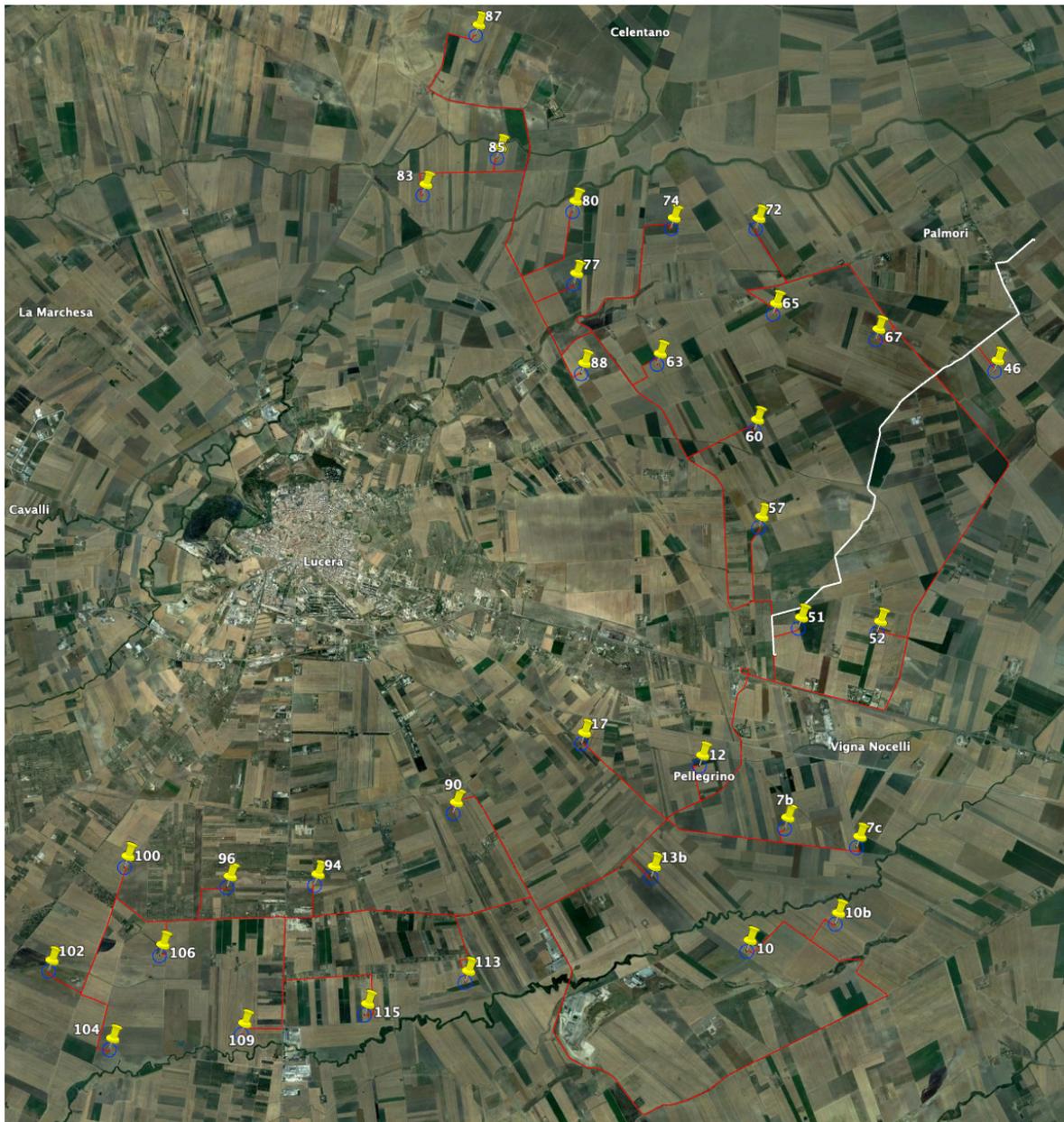
Modello	Potenza MW	Altezza mozzo m	Diametro rotore m	Numero di giri al minuto rpm	Altezza massima complessiva m
Siemens Gamesa 6.0 -170	6,0	145	170	10	230

INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area prevista per l'installazione dell'impianto eolico è ubicata a sud-est del centro abitato di Lucera (FG). L'aerogeneratore n.90 è il più vicino al centro abitato di Lucera e dista circa km 3,3.

Il progetto prevede la costruzione di:

- un impianto eolico di **33** aerogeneratori con cabina di trasformazione **0,6/30kV** ubicati nel Comune di Lucera.



- i cavidotti di interconnessione in M.T. (30kV) interni all'impianto
- una cabina di raccolta e trasformazione 30/150kV, ubicata nei pressi dell'aerogeneratore 51
- il cavidotto esterno che parte dalla cabina di interconnessione fino al punto di consegna dell'energia prodotta, previsto nella Stazione Primaria del GSE (Terna SpA). In sostanza il cavidotto esterno sarà costituito da una dorsale principale (in colore bianco nella ortofoto precedente) a 150kV che parte dalla cabina di raccolta e trasformazione 30/150kV e arriva alla sottostazione di consegna al GSE ubicata nel Comune di Lucera in località "Palmori".

La numerazione e le coordinate geografiche sono le seguenti:

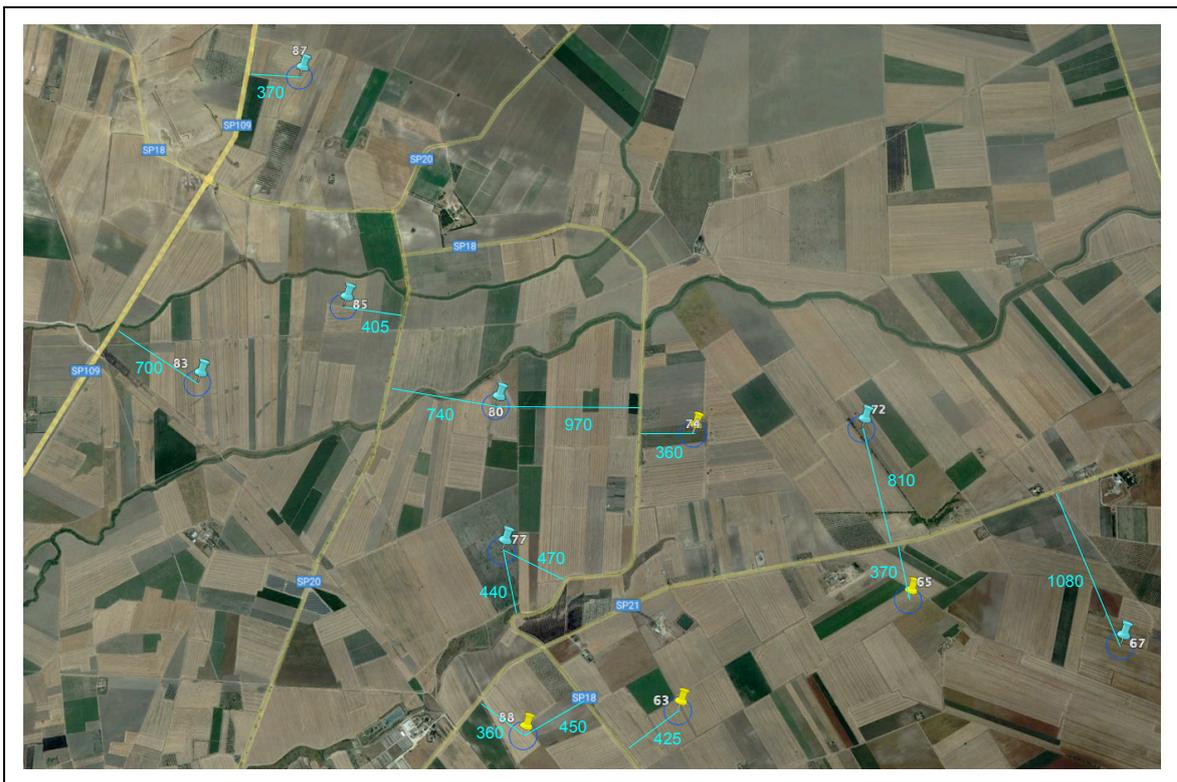
Numero WTG	UTM33N – WGS84	
	Est	Nord
7b	534.358	4.591.416
7c	535.301	4.591.174
10	533.865	4.589.815
10b	535.021	4.590.175
12	533.235	4.592.230
13b	532.608	4.590.771
17	531.679	4.592.518
46	537.156	4.597.527
51	534.535	4.594.060
52	535.580	4.594.012
57	534.009	4.595.403
60	533.948	4.596.707
63	532.648	4.597.595
65	534.198	4.598.284
67	535.570	4.597.944
72	533.963	4.599.451
74	532.824	4.599.448
77	531.522	4.598.683
80	531.501	4.599.673
83	529.483	4.599.892
85	530.475	4.600.406
87	530.167	4.602.106
88	531.636	4.597.461
90	530.006	4.591.595
94	528.205	4.590.646
96	527.056	4.590.614
100	525.710	4.590.868
102	524.755	4.589.511
104	525.573	4.588.504
106	526.198	4.589.721
109	527.287	4.588.709
113	530.191	4.589.399
115	528.885	4.588.967

Nella figura che segue sono rappresentati gli aerogeneratori, i ricettori più prossimi, le strade nazionali e provinciali.

VERIFICA A - IL RISPETTO DEL D.M. 10-9-2010

Il rispetto del D.M. 10-9-2010 che all'allegato 4, punto 7.2 impone: *"la distanza di ogni turbina eolica da una strada provinciale o nazionale deve essere superiore all'altezza massima dell'elica comprensiva del rotore e comunque non inferiore a 150 m dalla base della torre"*.

Dunque, gli aerogeneratori devono rispettare la distanza minima di m.230 dalle strade provinciali, regionali e nazionali.





Come si può vedere dalla rappresentazione delle distanze su ortofoto nessun aerogeneratore dista meno di 230 metri dalle strade provinciali, regionali o nazionali.

Si può affermare che la prescrizione del D.M. 10-9-2010 è ampiamente rispettata.

CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Si calcola ora la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale del frammento di pala, considerando tale frammento il pezzo estremo con rottura a 5 metri. Si trascurano le gittate per rottura a 10 metri o al mozzo che producono distanze inferiori e, pertanto, la valutazione risulterebbe maggiormente verificata.

Lo studio che segue considera il seguente aerogeneratore:

Modello	Potenza MW	Altezza mozzo m	Diametro rotore m	Numero di giri al minuto rpm	Altezza massima complessiva m
Siemens Gamesa 6.0-170	6,0	145	170	10	230

Equazioni del moto - rotazione complessa del corpo rigido

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono:

$$x = 0$$

$$y = -gt^2$$

dove $g = 9,8\text{m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto soluzione di queste equazioni è

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

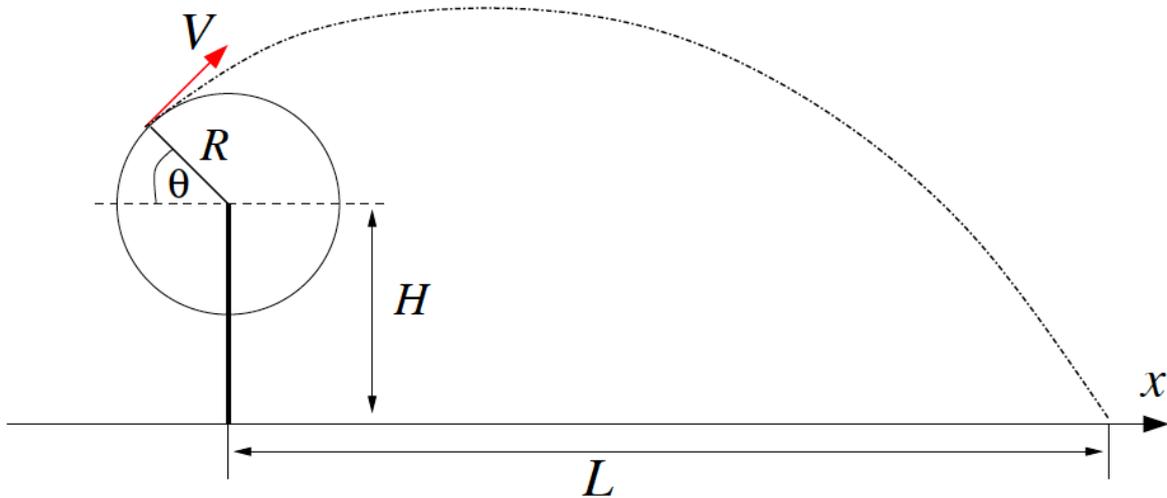
$$y(t) = y_0 + v_y t - \frac{1}{2}gt^2$$

dove $(X_0; Y_0)$ è la posizione iniziale del punto materiale, e $(V_x; V_y)$ è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $y(T) = 0$. Dalla legge del moto si ottiene

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0g}$$

dove è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Geometria del problema e calcolo della gittata



La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo θ , dalla velocità tangenziale V del frammento di pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned}x_0 &= -R \cos(\theta) \\y_0 &= H + R \sin(\theta) \\v_x &= V \sin(\theta) \\v_y &= V \cos(\theta)\end{aligned}$$

La gittata L è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo del frammento di pala.

Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata L in termini di V e di θ :

$$L = \frac{V \sin(\theta)}{g} \left[V \cos(\theta) + \sqrt{V^2 \cos^2(\theta) + 2(H + R \sin(\theta))g} \right] - R \cos(\theta)$$

Si noti che, fissato un generico angolo θ , la gittata aumenta quadraticamente con V , salvo i casi particolari $\theta = \pm 90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V , oppure è pari ad R .

La formula sopra indicata è funzione dell'angolo di distacco al momento della rottura.

Nella ipotesi che la rottura avvenga nel punto più alto ($\theta = 90^\circ$ nei grafici) il frammento si distaccherà con velocità parallela al suolo. Questo non è il caso

della massima gittata, come si evince dalla formula, ma anche dall'analogia con elementari problemi di balistica. Nel caso di un cannone che spara in pianura, la massima gittata si ha per $\theta = 45^\circ$ e non quando il proiettile parte parallelamente al suolo.

Nel caso di una torre eolica la determinazione dell'angolo di massima gittata è leggermente più complesso, ma non è mai pari a 90° . La sua determinazione impone di trovare il massimo della funzione al variare dell'angolo θ .

In ogni caso tale relazione è puramente teorica, poiché non tiene conto:

- 1) della riduzione di velocità del pezzo in volo per l'attrito con l'aria
- 2) della rotazione in volo del pezzo che si distacca
- 3) del vento che sposterà il pezzo secondo la sua direzione al quanto variabile spazialmente e sostanzialmente introducendo una ulteriore forza Z_0 perpendicolare al piano di rotazione delle pale
- 4) delle forze che si generano al momento della rottura poiché considera una rottura istantanea
- 5) della morfologia del territorio.

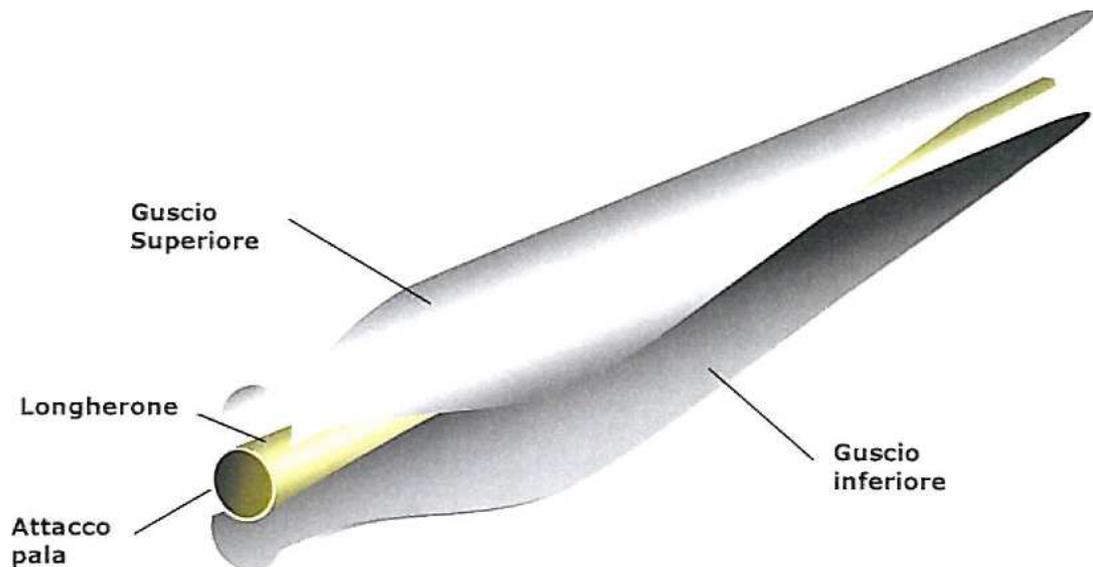
Al fine di addivenire ad una gittata massima più prossima a quella reale, tralasciando esclusivamente l'analisi del punto 5), si hanno le seguenti riduzioni, capaci di riportare il calcolo teorico ad un valore più prossimo a quello reale:

- 1) riduzione della velocità media del pezzo in volo del **30%** per attrito con l'aria;
- 2) riduzione della gittata del **10%** per tener conto della rotazione del pezzo in volo, della forza Z_0 praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea.

Nello studio che segue si opera con una riduzione del **30%** dovuta alle forze di attrito con l'aria del frammento in volo e di un ulteriore **10%** per tener conto della rotazione del pezzo in volo, della forza Z_0 praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea.

Giustificazioni sull'abbattimento del 40% della velocità media del frammento.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.



La rottura all'estremità della pala non risulta che si sia mai verificata se non nella ipotesi di concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra, In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. E' possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

Nel calcolo che segue si applicherà la relazione teorica con la sola riduzione del 40% della velocità media del frammento, per tener conto della rotazione del pezzo in volo, della forza Z_0 praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea.

L'aggiornamento tecnologico da parte dei produttori nella costruzione della pala ha ridotto il rischio di rottura accidentale della pala e/o frammento di essa attraverso l'utilizzo di soluzioni costruttive e materiali speciali innovativi tendenti a ridurre la rottura della pala attraverso uno stacco netto della stessa dal mozzo o di porzione di essa. Tra queste soluzioni e materiali annoveriamo l'utilizzo delle resine più recenti, di tutti i tipi, che ha migliorato le proprietà

rispetto a quelle usate in passato, riducendo le possibilità di incidente in generale per le pale; per ridurre anche gli effetti delle conseguentemente più rare rotture i produttori hanno aumentato la plasticità del materiale base e la resistenza della tessitura delle fibre di vetro di rinforzo. In questo modo si riduce anche la caratteristica di fragilità della rottura.

L'incidente per rottura dell'estremità della pala è escluso dai calcoli svolti secondo la norma IEC61400-1, ma si considera per assurdo che possa avvenire in circostanze eccezionali al di fuori di quelle normate.

L'effetto è, una volta assorbita l'energia necessaria per produrre la rottura, che quella rimanente generi per la parte eventualmente distaccata una traiettoria che, dall'intorno del punto più basso, parte in direzione circa orizzontale.

Il percorso in queste condizioni non può che essere una frazione, approssimativamente diminuita del 70% di quanto sarebbe stato quello per lancio balistico dalla parte superiore della rotazione. In questo la resistenza dell'aria offre il suo contributo .

Si ritiene quindi che l'abbattimento della velocità media del frammento del 40% per tener conto dell'attrito con l'aria, della rotazione del pezzo in volo, della forza Z_0 praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea, sia più che ragionevole e ampiamente motivata dall'utilizzo delle nuove soluzioni tecnologiche e di materiali costruttivi della pala innanzi suddette, oltre che dall'analisi delle probabilità che tale evento di rottura del frammento, già di per se legato alla probabilità di fulminazione, sia tale da produrre anche un possibile incidente dovuto alla concomitanza di cadere proprio sul recettore, o ancora peggio, sul veicolo di passaggio sulla strada secondaria.

Le forze di attrito, come noto, dipendono da due componenti: una resistenza da attrito viscoso ed una resistenza da pressione.

$$F_{attr.int.} = F_{skin\ friction} + F_{Pressure\ drag}$$

La prima è determinata dalle forze di attrito interne dovute all'elevato gradiente di velocità nello strato di contorno presso il corpo in moto (gli strati di fluido adiacenti al corpo hanno la velocità del corpo mentre gli strati più laterali rispetto al corpo sono in quiete).

La seconda è determinata dalla differenza di pressione tra la parte anteriore e quella posteriore del corpo in moto immerso nel fluido, cioè, è dovuta al fatto che il corpo penetrando nel fluido lo comprime ed il fluido esercita una sorta di risposta a questa compressione forzata.

LA RESISTENZA DA PRESSIONE

La resistenza alla penetrazione di un corpo in un fluido che deriva dalla differenza di pressione tra la parte anteriore e quella posteriore del corpo dipende dalla densità del fluido, dalla velocità V relativa tra il corpo ed il fluido e dalla sezione trasversale perpendicolare al flusso A secondo la relazione:

$$F_{\text{pressure drag}} = - C_d \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

dove:

$F_{\text{pressure drag}}$ = Forza di attrito da pressione [N]

C_d = drag coefficient

ρ = densità aria [Kg/m³]

v = velocità relativa all'aria [m/s]

A = area frontale caratteristica del frammento di pala [m²]

LA RESISTENZA VISCOSA

La forza di attrito viscoso dipende dalla viscosità del mezzo, dalla velocità relativa e da un elemento di tipo lineare del corpo:

$$F_{\text{skin friction}} = K \mu v l$$

dove:

K = una costante adimensionale dipendente dalla forma del corpo

μ = viscosità del mezzo

l = dimensione lineare caratteristica dell'oggetto

v = velocità relativa al mezzo

LA COMBINAZIONE DEI DUE EFFETTI

La forza di resistenza subita dal corpo in moto nel fluido è data da una combinazione complicata dei due effetti di resistenza alla pressione e resistenza viscosa.

Ma, nel caso di basse velocità, la componente di attrito, che dipende dalla prima potenza della velocità, sarà preponderante rispetto alla resistenza alla pressione che dipende dal quadrato della velocità. Ad alte velocità, ovviamente, accadrà l'opposto.

Poiché i concetti di alta e bassa velocità, sono piuttosto generici, per stabilire in quale delle due situazioni ci si trovi, si introduce un criterio di valutazione basato sul rapporto dei due effetti (numero di Reynolds):

$$Re = (\rho v l) / \mu$$

Il numero adimensionale (Re), detto numero di Reynolds, gioca un ruolo assolutamente fondamentale in aerodinamica perché è il termine che determina il tipo di regime nel quale ci si trova ad operare.

Quindi, per movimenti lenti, quando $Re < 1$ (regime laminare) si trascura la resistenza alla pressione e si tiene conto solo della viscosità mentre, al contrario, per grandi numeri di Reynolds (>100) (regime turbolento) si prende in considerazione solo la resistenza alla pressione e si trascura l'attrito interno.

Nel caso specifico, ossia di una pala eolica, il numero di Reynolds viene così calcolato:

$$Re = (\rho v_{\max} c) / \mu$$

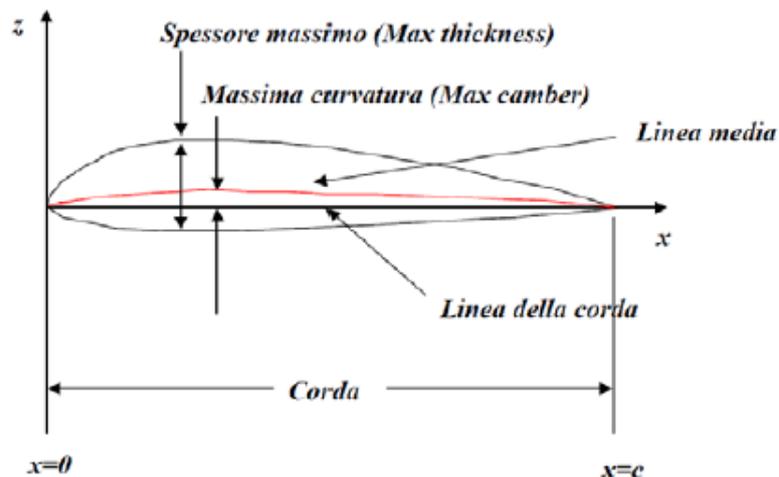
dove:

$$\rho = 1.174 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$v_{\max} \cong 40,5 \text{ [m/s]} \text{ (pala intera)} - 97,8 \text{ [m/s]} \text{ (frammento 5 m)}$$

$$c \text{ (corda alare)} \cong 3,7 \text{ [m]} \text{ (pala intera)} - 1,2 \text{ [m]} \text{ (frammento 5 m)}$$

$$\mu = 1.85 \cdot 10^{-5} \text{ [kg/(s m)]}$$



per un valore pari, considerando la temperatura di 25 °C:

$$Re = 9,5E 10^6 - \text{distacco della pala intera}$$

$$Re = 7,4E 10^6 - \text{distacco frammento 5 m}$$

Appare evidente come ci troviamo abbondantemente, per entrambi i casi, in regime turbolento, quindi va considerata esclusivamente la resistenza alla pressione ($F_{\text{pressure drag}}$) che corrisponde ad una riduzione della velocità teorica di oltre il 40% come si evince dalla forza di pressione che si oppone.

$$F_{\text{pressure drag}} = - C_d \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

dove:

$$F_{\text{pressure drag}} = \text{Forza di attrito da pressione [N]}$$

$$C_d = \text{drag coefficient}$$

$$\rho = \text{densità aria [Kg/m}^3\text{]}$$

$$v = \text{velocità relativa all'aria [m/s]}$$

$$A = \text{area frontale caratteristica del frammento di pala [m}^2\text{]}$$

Il calcolo per rottura a m.5 dalla punta della pala e per l'aerogeneratore da installare.

Modello	Potenza MW	Altezza mozzo m	Diametro rotore m	Numero di giri al minuto rpm	Altezza massima complessiva m
Siemens Gamesa 6.0-170	6,0	145	170	10	230

Angolo al momento del distacco	Altezza mozzo	lunghezza pala	distanza baricentro del pezzo staccato a 5m dalla punta	raggio al punto di rottura	velocità massima di rotazione delle pale	tempo per effettuare un giro completo alla massima velocità	velocità iniziale del frammento	coeff. ridotti per attrito con aria	velocità del frammento ridotta per l'attrito con l'aria	forza di gravità	Gittata
θ	H	l	d	R	rpm	t	V1		v	g	L
gradi	m	m	m	m	giri al min	60/giri al min	m/s		m/s		m
5,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	0
10,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	34
15,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	91
20,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	145
25,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	195
30,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	242
35,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	282
40,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	317
45,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	346
50,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	368
55,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	383
60,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	392
65,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	396
70,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	394
75,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	387
80,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	377
85,00	145,00	85,00	3,33	81,67	10,00	6,00	85,48	0,40	51,29	9,80	364

Dunque, nella peggiore delle ipotesi, la gittata massima assume un valore per rottura del frammento a 5 metri dalla punta della pala di **396 metri**.

VALUTAZIONE B – LA GITTATA RISPETTO AL D.M. 10-9-2010

Gli aerogeneratori sono tutti ad una distanza dalle strade nazionali, regionali e provinciali maggiore di m. 396, con eccezioni degli aerogeneratori:

n. WGT	Distanza Circa in m.	strada
87	370	SP 109
74	360	SP 18
65	370	SP 21

88	360	SP 21
90	350	SP 116
94	370	SP 109
100	370	SP 18

Anche in questo caso remoto, di rottura a 5 metri dalla punta della pala, gli aerogeneratori rispettano le distanze di sicurezza con eccezione degli aerogeneratori n.87, n.74, n.65, n.88, n.90, n.94 e n.100.

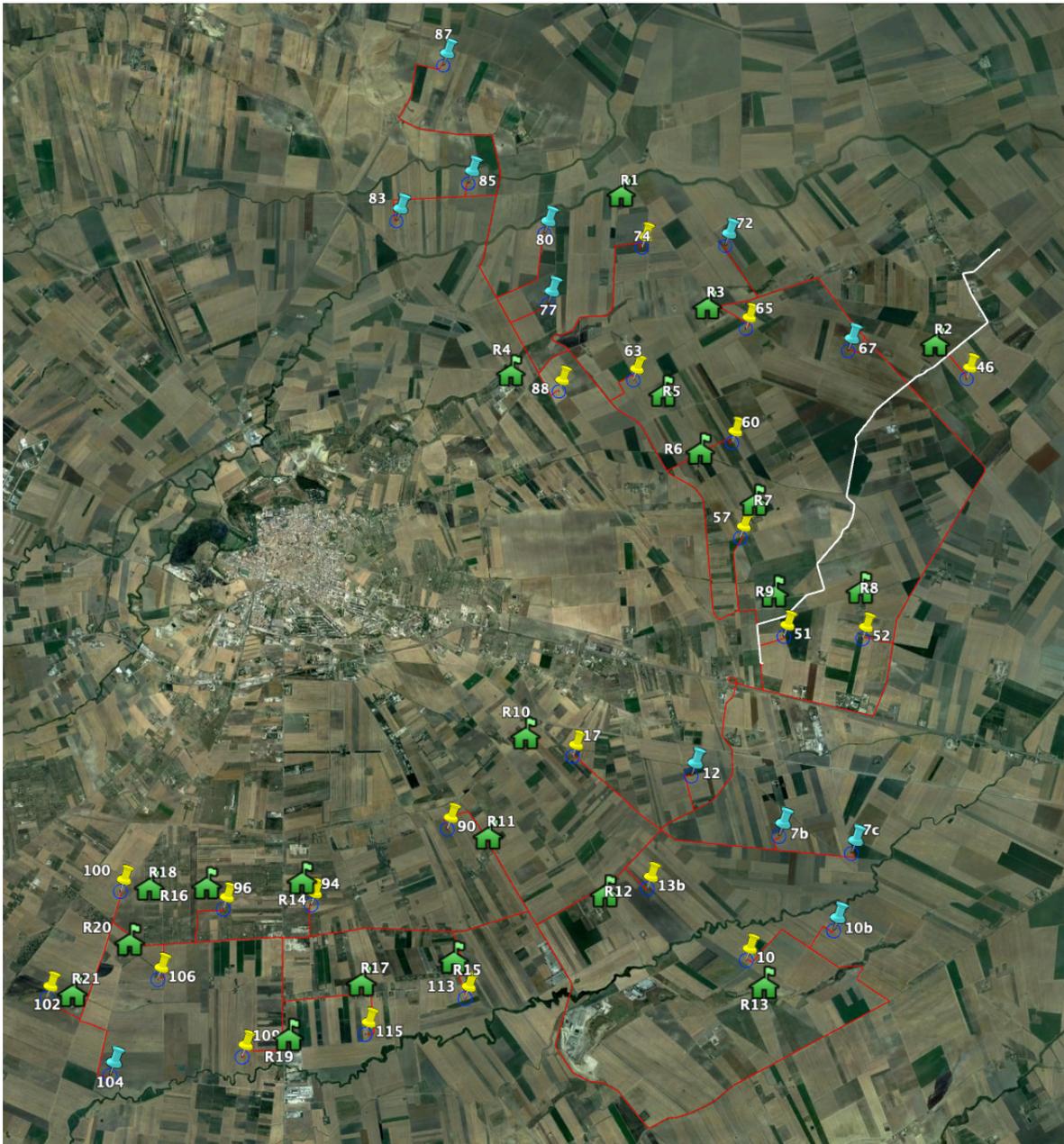
Va evidenziato che il D.M. 10-9-2010 prescrive solo una distanza minima pari alla lunghezza delle eliche con il rotore che al massimo è [m.230](#).

Nel seguito trattandosi di sicurezza e, dunque, di un bersaglio non stabile ma mobile quale deve considerarsi una autovettura in transito su una strada provinciale, si procederà ad una valutazione del rischio di collisione, verificando la sua percentuale di probabilità.

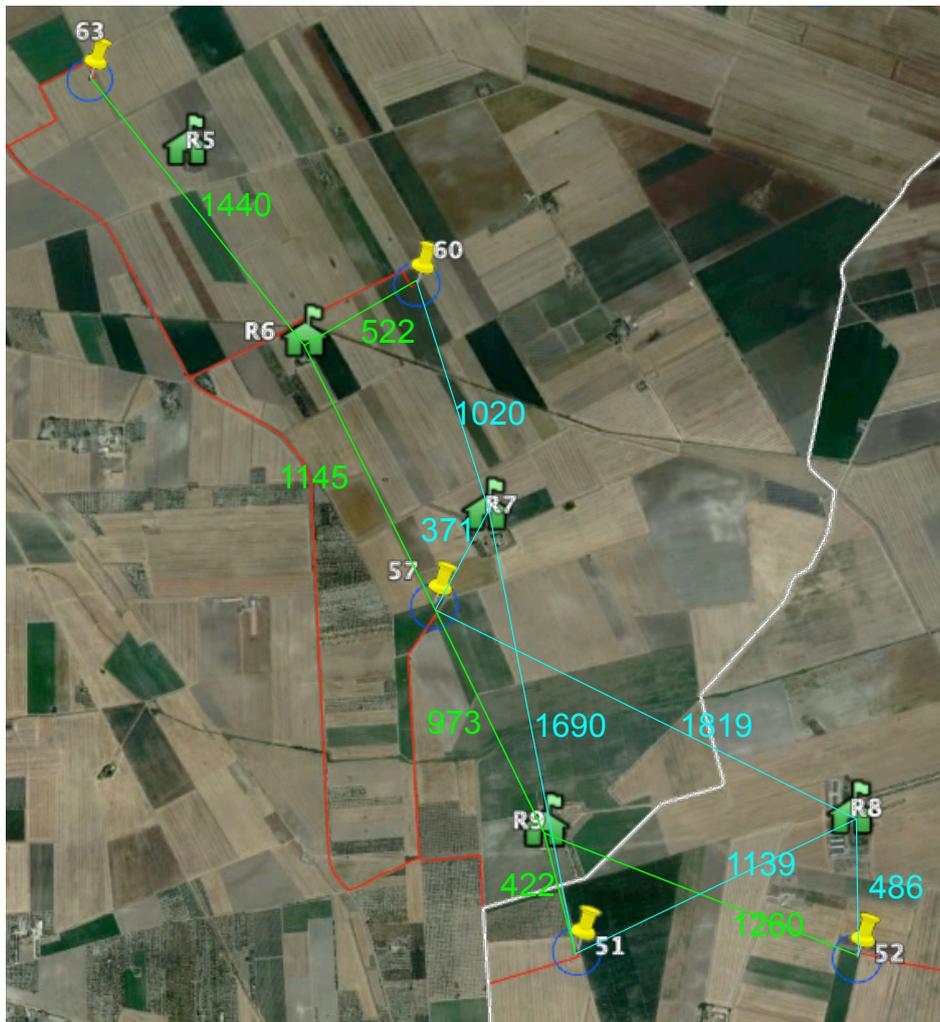
Dunque la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale è sicuramente positiva rispetto alle strade nazionali, regionali e provinciali. Si dimostrerà nel proseguo che anche per i restanti aerogeneratori n.87, n.74, n.65, n.88, n.90, n.94 e n.100 la sicurezza è garantita trattandosi di un rischio altamente accettabile.

VALUTAZIONE C – LA GITTATA RISPETTO AI RECETTORI

La valutazione della gittata massima del frammento degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto ai ricettori vede la seguente situazione.



Per ogni ricettore, nelle seguenti ortofoto si evidenziano le distanze dai tre aerogeneratori più vicini.





Dalla verifica delle distanze dai ricettori si osserva che non vi sono situazioni critiche per nessuno degli aerogeneratori con eccezione delle seguenti situazioni

n. WGT	Distanza Circa in m.	Ricettore
57	371	R7
113	363	R15
94	188	R14

96	258	R16
102	350	R21

Tutti i ricettori sono a distanze superiori alla gittata massima di m.396 con eccezione degli aerogeneratori n.57, n.113, n.94, n.96 e n.102.

Considerato che il valore calcolato della gittata massima è m.396 si può affermare che non vi sono rischi e che il punto 7.1, dell'allegato 4, al D.M. 10-9-2010 è rispettato con eccezione dell'aerogeneratore degli aerogeneratori n.57, n.113, n.94, n.96 e n.102 per i quali si rimanda alla valutazione del rischio.

VALUTAZIONE D – LA GITTATA RISPETTO ALLE STRADE SECONDARIE

La **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale (del frammento a 5 metri dalla punta della pala), rispetto alle strade di livello inferiore alle strade provinciali – **NON è richiesta dal D.M. 10-9-2010** - poiché il rischio dovuto alla concomitanza degli eventi, rottura del frammento di pala a 5 metri dalla punta e caduta dello stesso sul punto in cui transita il veicolo in una strada scarsamente percorsa è estremamente basso.

VALUTAZIONE E – VALUTAZIONE DEL RISCHIO

L'obiettivo di questa sezione del documento è quello di effettuare un confronto con i criteri di accettabilità del rischio che vengono comunemente adottati.

Il rischio non è una grandezza fisica misurabile di tipo tradizionale ma può, tuttavia, essere assimilata ad una grandezza di natura deterministica, probabilistica o possibilistica.

La classica definizione di Rischio Individuale (RI) che si trova in letteratura è la seguente:

“frequenza a cui ci si aspetta che un individuo sia sottoposto a un certo livello di danno a causa di un incidente in un'industria a rischio di incidente rilevante”.

Di solito si considera il rischio di morte e normalmente è espresso come morti all'anno per persona, ossia come numero di impatti con esiti fatali all'anno. Il RI è quello a cui è sottoposto un singolo individuo in un dato periodo di tempo e riflette la severità del pericolo e il tempo in cui l'individuo è in prossimità dell'impianto. La valutazione e limitazione del rischio individuale è molto simile in molti Paesi Europei e non Europei e, in particolare, il valore di RI accettabile varia tra valori di 10^{-5} morti/anno e 10^{-6} morti/anno (impatti fatali/anno).

In tale panorama il livello di riferimento per valutare l'alterazione delle condizioni di sicurezza è il rischio naturale, cioè quello cui è esposto ogni individuo per il solo fatto di vivere a contatto con il mondo naturale. Secondo lo studio citato, analizzando i dati e partendo da un valore di rischio (espresso in morti per anno) di circa 10^{-6} / 10^{-5} per catastrofi naturali, 10^{-6} / 10^{-3} per attività non lavorative, 10^{-5} / 10^{-3} per attività lavorative, 10^{-4} / 10^{-2} per senescenza e malattie, si è arrivati all'adozione piuttosto comune di un livello di riferimento del rischio individuale tollerabile generato da attività umane create da terzi pari a 10^{-6} .

Nella tabella seguente sono riassunti i valori di RI considerati accettabili e non accettabili per i Paesi che hanno deciso di adottare un criterio basato sul rischio. Dall'analisi di questa tabella si evince come la maggior parte dei Paesi presi in esame consideri accettabile un valore di rischio individuale inferiore a 10^{-6} morti/anno (impatti fatali/anno). Questo non stupisce anche perché secondo uno studio di G. Bello il livello di riferimento per l'accettabilità dei rischi individuali dovrebbe essere dell'ordine di 10^{-6} in quanto questo valore è inferiore da 1 a 10 volte al rischio di morire a causa di una catastrofe naturale, da 1 a 100 volte inferiore al rischio di essere vittima di un'attività non lavorativa, da 10 a 1000 volte inferiore al rischio lavorativo, da 100 a 1000 volte inferiore al rischio di senescenza e malattia per soggetti nella fascia d'età media. Sul valore limite di inaccettabilità, invece, il valore varia tra 10^{-3} e 10^{-5} e in alcuni Paesi il limite non è specificato.

	RI (morti/anno/per sona) Soglia di Accettabilità	RI (morti/anno/persona) Soglia di Non Accettabilità
Olanda	10^{-6}	10^{-5}
UK	10^{-6}	10^{-4} (pubblico)- 10^{-3} (lavoratori)
Canada	10^{-6}	10^{-4}
Australia	10^{-6}	Non Utilizzato
Russia	10^{-6}	10^{-4}
Hong Kong	10^{-5}	Non Utilizzato

Per la situazione italiana, riassumendo, la soglia di accettabilità per il rischio individuale pari a 10^{-6} morti/anno, già utilizzata negli altri Paesi, si può considerare abbastanza ragionevole, basti pensare che in Italia ogni anno, solo per l'incidentalità stradale, si ha in media un rischio individuale di morte pari a circa 2×10^{-4} morti/anno/persona (dati ISTAT per il 2001).

In considerazione di tutto quanto sopra, e della scelta di procedere all'analisi del rischio mediante la definizione del rischio individuale, si precisa che i valori di rischio individuale cui si farà riferimento sono quelli che esprimono la stima del pericolo che un individuo corre a seconda della sua posizione nella zona d'impatto determinata dal raggio di massima gittata per un elemento di 5 m dalla punta ed il valore di soglia di accettabilità del rischio individuale,

andando quindi a determinare l'area di raggio, dalla base torre, entro la quale il rischio eccede tale valore (10^{-6} morti/anno).

Poiché trattasi di calcoli che, seppure non complessi, risultano lunghi e con una elevata mole di variabili, l'esito degli stessi viene riportata in forma tabellare.

Valutazione della collisione con bersaglio mobile (veicolo su strada)

Gli aerogeneratori sono tutti ad una distanza dalle strade nazionali, regionali e provinciali maggiore di m. 396, con eccezioni degli aerogeneratori:

n. WGT	Distanza Circa in m.	strada
87	370	SP 109
74	360	SP 18
65	370	SP 21
88	360	SP 21
90	350	SP 116
94	370	SP 109
100	370	SP 18

Dunque con una ubicazione inferiore alla gittata massima si provvede a sviluppare il calcolo della probabilità che il frammento avrebbe nell'intercettare un veicolo mobile su una strada provinciale.

Pertanto l'analisi delle probabilità deve contemplare la probabilità che si producono contemporaneamente tutti i seguenti eventi:

1. Probabilità che il fulmine colpisca la pala
2. Probabilità che il fulmine colpisca la pala a 5 metri dalla punta
3. Probabilità che il frammento si rompa per rottura improvvisa (nella realtà ciò non avviene)
4. Probabilità che il frammento colpisca la strada provinciale o nazionale
5. Probabilità che il frammento colpito da fulminazione cada nel punto in cui nello stesso istante transita il veicolo.

Si comprende facilmente l'eccezionalità di un simile evento o meglio della concomitanza di 5 fattori che contestualmente devono accadere affinché si verifichi la collisione.

Tutte le pale prodotte dai maggiori produttori di aerogeneratori, comunque, sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine, costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra.

In questo modo, si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

Frammenti di pala, infatti, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (tipica la fulminazione atmosferica) o imperizia umana, sono stati ritrovati a non più di 60-70m dalla base dell'aerogeneratore.

Gli aerogeneratori dove il rischio risulta più alto è rappresentato dall'aerogeneratore n.90 per una distanza di m.350 dalla SP116. Trattandosi in tutti i casi di strade provinciali, si conduce la verifica l'aerogeneratore n.90 maggiormente a rischio.

La valutazione del rischio per l'aerogeneratore n.90 ha prodotto i seguenti valori:

Distanza dalla Torre	350	m	WTG 90	SP 116
N. Veicoli/h =	50	veic./h		
Numero Occupanti/Veicolo =	2			
Lunghezza tratto stradale inter. =	730	m		
Larghezza tratto stradale inter. =	4	m		
Velocità veicoli =	60	km/h		
Area unitaria impatto (25)=	25	m ²		
Impulso della Forza =	4,62E+04	N		
Risck of Impact	8,18E-12	N. impatti anno	<	1,00E-06

Il rischio risulta inferiore a 10^{-6} , dunque un rischio ampiamente trascurabile per l'aerogeneratore n.90 e quindi ancora maggiormente accettabile per tutti gli aerogeneratori.

Valutazione della collisione con bersaglio fisso

Considerato che le distanze degli aerogeneratori dai ricettori fissi sono sempre ampiamente superiori alla gittata massima rinveniente per una rottura accidentale degli elementi rotanti a 5 metri dalla punta della pala si ritiene che non vi siano rischi con eccezione dei seguenti aerogeneratori

n. WGT	Distanza Circa in m.	Ricettore
57	371	R7
113	363	R15
94	188	R14
96	258	R16
102	350	R21

per i quale si procede alla valutazione del rischio.

L'unico caso che può provocare la rottura improvvisa della punta della pala è indotto da eventuale fulminazione. Pertanto l'analisi delle probabilità deve contemplare la probabilità che si producono contemporaneamente tutti i seguenti eventi:

1. Probabilità che il fulmine colpisca la pala
2. Probabilità che il fulmine colpisca la pala a 5 metri dalla punta
3. Probabilità che il frammento si rompa per rottura improvvisa
4. Probabilità che il frammento colpito da fulminazione cada sul ricettore

L'aerogeneratore n.94, dista circa m.188 dal ricettore R14 che risulta il più penalizzante. L'analisi del rischio comporta le seguenti risultanze

Distanza dalla Torre	188	m	WTG 94	Recettore R14
Lunghezza frammento pala	5	m		
Densità abitativa =	100	ab/kmq		
Tempo di permanenza giornaliero =	4	h/g		
Area unitaria impatto =	1	mq/persona		
Energia cinetica Impatto =	1,87E+06	J		
Annual Risk of Impact	5,03E-10	N. impatti anno	<	1,00E-06

La valutazione del rischio di collisione per la turbina n.94 con il ricettore R14 risulta ampiamente inferiore a 10^{-6} , dunque, accettabile. Maggiormente lo sarà per gli altri aerogeneratori.

CONCLUSIONI

In conclusione, da quanto sopra, discende che gli aerogeneratori non destano il ben che minimo rischio relativo a possibili incidenti per distacco di pala o frammenti di essa.