

ESTUDI DE DESCÀRREGUES ELÈCTRIQUES ATMOSFÈRIQUES SOBRE AEROGENERADORS

MEMORIA

Autor: Pau Pinós Basseda

Director: Joan Montanyà Puig

Convocatòria: Juny 2013



**Màster Interuniversitari UB-UPC
d'Enginyeria en Energia**

Índex

1	Objecte	3
2	Introducció.....	3
3	Tempestes.....	5
3.1	Mecanisme d'electrificació del núvol	6
3.2	Descàrregues Elèctriques Atmosfèriques. El Llamp.....	7
4	Descàrregues elèctriques atmosfèriques.....	8
4.1	Definició i propietats de les descàrregues atmosfèriques.....	9
4.2	Problemàtica i afectació sobre aerogeneradors.....	9
5	Norma UNE-EN 62305. Protecció contra el llamp.....	10
5.1	Paràmetres de la corrent del llamps.....	10
5.2	Danys causats pels llamps.....	13
5.3	Avaluació del risc per impactes de llamps	13
5.4	Nivells de protecció contra el llamp (NPR)	14
6	Norma UNE-EN 61400-24.....	15
6.1	Valoració de la freqüència que els llamps poden afectar a un aerogenerador	15
7	Simulacions d'impactes de llamps sobre aerogeneradors.....	20
8	Descripció de la zona d'estudi.....	21
9	Estimació d'impactes sobre aerogeneradors en l'àrea d'estudi	22
9.1	Càlcul d'impactes teòrics segons norma UNE.....	23
9.2	Càlcul d'impactes reals segons base de dades.....	23
9.3	Proposta de càlcul d'impactes per la globalitat del parc eòlic.....	26
9.4	Proposta de càlcul individual per aerogenerador dins del parc.....	27
9.4.1	Càlcul per l'agrupació d'aerogeneradors 1.....	27
9.4.2	Càlcul per l'agrupació d'aerogeneradors 2.....	31
9.5	Línies elèctriques soterrades interiors dels parcs.....	32
10	Conclusions.....	33
11	Referències.....	36
12	Plànols.....	37

1 Objecte

L'objecte del present projecte és estudiar i descriure els efectes de les descàrregues atmosfèriques sobre aerogeneradors i aprofundir en l'aplicació de la norma UNE EN 61400-24 Aerogeneradors. Part 24: Protecció contra el llamp.

L'estudi s'ha realitzat sobre el parc eòlic de Serra de Rubió ubicat als termes municipals de Rubió (Anoia), Castellfollit del Boix (Bages) i Òdena (Anoia), amb un total de 50 aerogeneradors de 1,5MW de potència nominal cadascun formant un total de 75MW instal·lats. La ubicació del parc es pot observar en el plànol de situació (Plànol 1).

En el present projecte, s'estudia la ubicació dels aerogeneradors, es quantifica el número d'impactes teòrics que en resulta de l'aplicació de la norma UNE EN 61400 i es compara amb l'estimació d'impactes reals sobre els aerogeneradors segons la base de dades disposada amb les coordenades de caiguda dels llamps i les seves principals característiques en el període 2007 - 2011. D'aquesta manera, i tenint en compte els dos valors obtinguts, els teòrics (segons UNE) i els reals (segons la base de dades i ubicació de les màquines), es pretén validar el mètode de càlcul proposat per la norma així com si n'és el cas, proposar una nova metodologia de càlcul que s'ajusti més a la realitat observada en el parc objecte del present estudi.

2 Introducció

El sistema elèctric actual està format per un conjunt de fonts de generació elèctrica força diversa que conforma el mix energètic. Les energies renovables en el nostre sistema elèctric tenen una aportació important i requereixen d'una gestió més específica i en el cas de l'energia eòlica el pes sobre el mix energètic es considerable.

El fenomen de les tempestes i les descàrregues elèctriques atmosfèriques associades poden condicionar al conjunt del sistema elèctric de diverses maneres i amb efectes diversos sobre el sistema i les seves infraestructures. En aquest projecte, s'estudia els efectes sobre els aerogeneradors, per l'elevada exposició d'aquestes infraestructures a aquets fenomen i els danys i pèrdues elevades que pot produir.

L'energia eòlica generada pels grans parcs ha tingut en els últims 15 anys una evolució sostinguda fins a situar-se entre les principals fonts d'energia elèctrica que formen el mix energètic del sistema elèctric peninsular. En l'actualitat representa el 21% de la potència

instal·lada amb un total de 21.091 MW com s'observa en el següent gràfic elaborat a partir de les dades de potència instal·lada dels informes anuals que publica l'operador del sistema elèctric (REE) a la seva pàgina web.

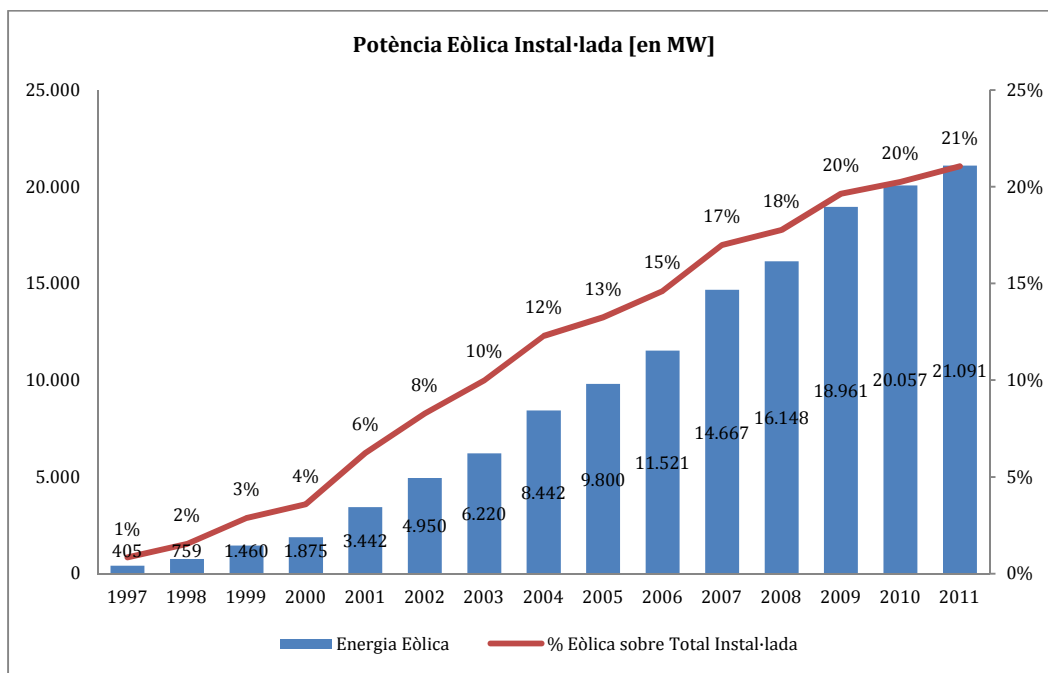


Figura 1. Evolució de la potència eòlica instal·lada al sistema elèctric peninsular (1997 - 2011)

D'aquesta manera la integració de l'energia eòlica en el sistema elèctric es una tasca important i que cal destinar-hi recursos per tal que es faci amb la màxima seguretat pel sistema elèctric i que es pugui evacuar la màxima energia eòlica possible minimitzant les aturades de producció.

En aquest sentit, un dels diversos aspectes que caldrà tenir en compte per maximitzar la generació eòlica es l'estudi, prevenció i protecció dels efectes de les descàrregues elèctriques atmosfèriques sobre aerogeneradors, ja que els danys causats per impactes directes o indirectes poden ser importants. El present projecte no té l'objectiu de quantificar els danys ni les pèrdues, això podria quedar per estudis posteriors, però si que determinarà la freqüència d'impactes sobre aerogeneradors segons la norma i segons l'estimació d'impactes reals i se'n comparará el resultats.

Un cop fet els dos estudis i de la comparativa d'aquests, es pretén validar el mètode de càlcul que s'exposa en la norma UNE i si es el cas, proposar-ne una alternativa per tal que s'ajusti mes a la realitat observada.

Un dels objectius que es proposa es determinar, en funció de la ubicació dels aerogeneradors dins del parc eòlic, quins tindran probabilitats d'impactes mes elevades,

per tal de tenir-ho en compte en els dissenys previs de ubicació dels aerogeneradors i alhora de determinar els nivells de protecció de cadascun d'ells. D'aquesta manera, conegudes les posicions amb mes probabilitats de rebre impactes, es podria tenir en consideració alhora de trobar un criteri de ubicació de les màquines dins del parc que pugui servir per la fase de disseny del parc així com en la seva explotació i pugui minimitzar els efectes de les descàrregues elèctriques atmosfèriques.

3 Tempestes.

El fenomen de les descàrregues elèctriques atmosfèriques, té l'origen en les tempestes, fenòmens meteorològics bastant imprevisibles i de conseqüències sovint desastroses. L'evolució tecnològica de la societat i la dependència de l'energia elèctrica, fa que fenòmens com les tempestes puguin causar danys materials i pèrdues econòmiques importants.

El principal generador de llamps és el típic núvol de tempesta, el cumulonimbus, que es forma en condicions d'instabilitat atmosfèrica, quan grans masses d'aire calent i humit s'elevan i es condensen, produint aquest tipus de núvols, plens de vapor d'aigua, aigua líquida i gel. Aquest tipus de núvols pot arribar a assolir altituds de 12 km.

En la següent figura, s'observen les fases d'una tempesta. En el procés de formació del núvol es produeix una separació de càrregues formant un dipol intern. La càrrega negativa s'acumula a altituds entre 6 i 8 km amb temperatures entre -10°C i -20°C i la càrrega positiva es concentra a major altitud. Sovint, però, es poden acumular a la base del núvol càrregues positives formant un tripol.

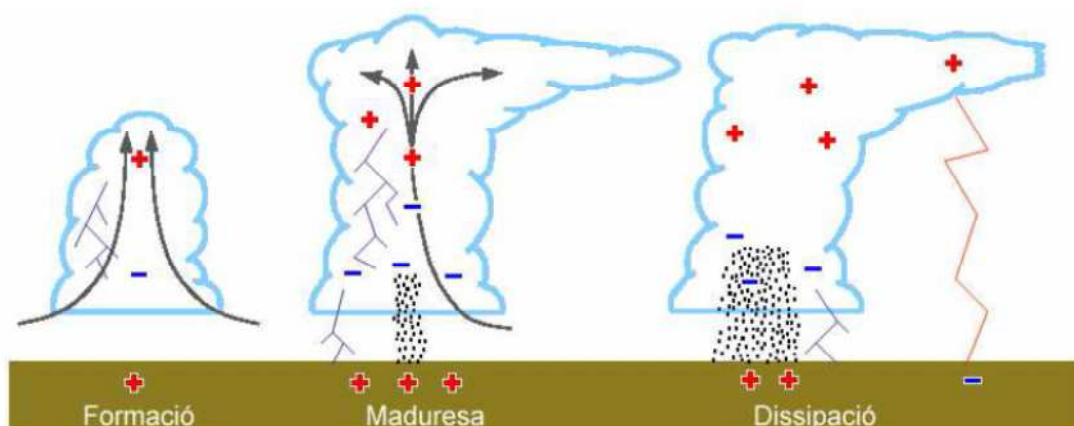


Figura 2. Fases d'evolució d'una tempesta.

A la superfície del terra, per inducció electrostàtica, s'hi acumulen càrregues de polaritat contrària a les càrregues que s'acumulen a la base del núvol.

L'acumulació d'aquestes càrregues oposades, crea un camp magnètic. Quan aquest supera un cert valor, es desencadena una descàrrega elèctrica entre regions de càrrega diferent dins del núvol o entre el núvol i terra.

L'estadi de maduresa de la tempesta s'assoleix quan es produeix el màxim desenvolupament vertical del núvol, moment en que les descàrregues entre regions del núvol que s'havien iniciat, arriben als seus màxims i apareixen les primeres descàrregues entre el núvol i la terra.

La fase final de la tempesta es la de dissipació, on culmina l'activitat elèctrica entre el núvol i la terra. Durant aquesta fase, es dona la màxima repercussió sobre la superfície de la terra, donant lloc als llamps, calamarsa, pluja intensa, etc.

3.1 Mecanisme d'electrificació del núvol

El mecanisme d'electrificació d'un núvol es un fenomen que avui en dia encara no es perfectament conegut. Existeixen algunes teories que s'ocupen d'alguns processos que intervenen en l'electrificació, però manca una teoria general que expliqui l'elevada electrificació dels núvols de tempesta.

Teoria de la convecció. En aquesta teoria, el transport de les càrregues elèctriques positives des de la superfície cap a les parts altes del núvol es degut als forts corrents ascendents dels processos convectius. El transport de les càrregues negatives cap a les parts inferiors del núvol es donen pels corrents descendents de la part externa del núvol, formant així una estructura dipolar.

Teoria de la precipitació. En aquesta teoria, la transferència de càrrega elèctrica, s'explica a partir dels xocs entre partícules de precipitació polaritzades. Les partícules d'aigua descendents es carreguen negativament a causa de les col·lisions, mentre que els cristalls de gel ascendents es carreguen positivament.

Teoria no inductiva. Aquesta teoria, igual que la teoria de la precipitació, es basa en les col·lisions entre partícules, però amb la diferència que la polaritat de la càrrega transmesa depèn de la temperatura ambient. El model del núvol tripolar, s'explica en base a aquesta teoria, on hi ha càrregues positives en les zones inferiors del núvol, mentre que per sota d'una temperatura de -10°C (alçades de 6-7km) les partícules de gel es carreguen negativament i en zones de menor alçada les partícules es carreguen positivament.

3.2 Descàrregues Elèctriques Atmosfèriques. El Llamp.

Tot i que es un fenomen de molt curta durada, el llamp engloba una sèrie de processos que es detallen a continuació:

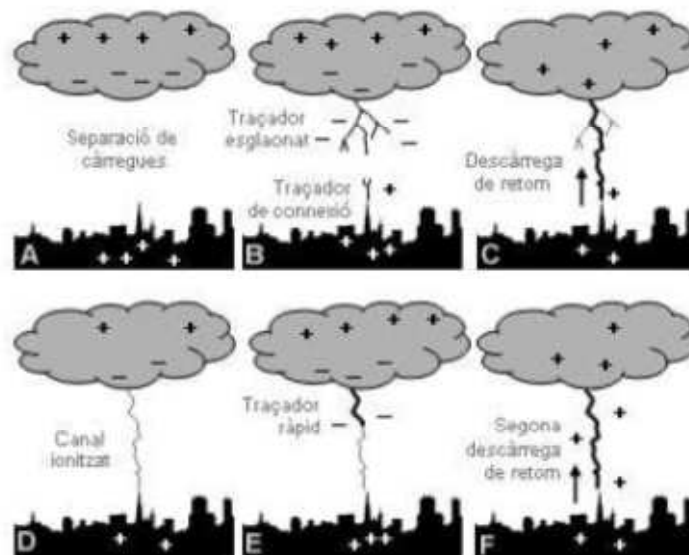


Figura 3. Processos de la formació de llamps en núvols de tempesta.

En la fase (A), el núvol es polaritza i la superfície terrestre es carrega per inducció. En (B) es genera un traçador descendent (traçador esglaonat), que a través d'una sèrie de petits impulsos forma la típica estructura ramificada dels llamps, iniciant en aquest procés la descàrrega elèctrica. En (C) el traçador esglaonat s'acosta cap a la superfície de la terra alhora que es forma un traçador ascendent, anomenat traçador de connexió. Tots dos traçadors es troben, formant així un canal ionitzat altament conductor, pel qual es genera la descàrrega de retorn. Aquesta descàrrega de retorn es desplaça a una velocitat d'un terç de la velocitat de la llum, originant la circulació d'un corrent elèctric molt elevat, amb una durada aproximadament de 100 microsegons. La forta descàrrega elèctrica, genera un sobtat augment de temperatura (amb un pic de fins a 30.000K). Aquest augment de temperatura, provoca un augment sobtat de pressió que desencadena el tro.

Si el procés acaba aquí, tenim un llamp de descàrrega simple. Es poden produir més descàrregues si encara hi ha càrrega disponible, provocant descàrregues secundàries.

Aquestes descàrregues secundàries (F) són lleugerament diferents de la primera. S'inicien amb un traçador ràpid (E), que baixa sense pausa pel canal ionitzat de la primera descàrrega (D). S'han arribat a observar llamps múltiples de fins a 15 descàrregues.

En un 30% del casos el traçador ràpid (E) no segueix tot el camí ionitzat i es bifurca prop de la superfície. D'aquesta manera, les successives descàrregues d'un mateix llamp poden impactar en diversos punts. El temps entre descàrregues successives és d'unes desenes de mil·lisegons. En termes mitjans, entre descàrregues de retorn sol aparèixer un corrent continu de l'ordre de 100 a 500 A i un pic de corrent de descàrrega que pot arribar fins a uns 200kA en pocs microsegons.

4 Descàrregues elèctriques atmosfèriques.

Com ja s'ha explicat, el llamp és un intercanvi d'energia elèctrica que es compon de diverses descàrregues parcials i amb una durada total aproximadament de mig segon. Les descàrregues es produeixen per les diferències de potencials que es creen entre els núvols, entre núvol i terra o entre el núvol i les capes altes de l'atmosfera. Les diferències de potencials es creen en els processos de formació de les tempestes i poden carregar positiva o negativament els núvols. Es distingeixen doncs tres tipus de llamps, els que es produeixen entre un núvol i terra (NT), entre núvols (NN) o entre el núvol i les capes altes de l'atmosfera. Quan la diferència de potencial es suficient, es produeix la descàrrega elèctrica que pot ser positiva o negativa i tenir un sentit ascendent o descendent. D'aquesta manera, poden distingir els següents tipus de llamps.

- Llamps núvol – núvol
- Llamps núvol – terra ascendents positius
- Llamps núvol – terra ascendents negatius
- Llamps núvol – terra descendents positius
- Llamps núvol – terra descendents negatius.

Pel cas que ens ocupa, centrarem el interès en els llamps núvol – terra que són els que podran impactar sobre els aerogeneradors i que potencialment poden ser perillosos per les instal·lacions dels parcs eòlics.

Segons la norma IEC 61024-1 que avalua el risc d'impacte per estructures amb altures superiors als 60 metres, es considera que les descàrregues més freqüents són les de tipus núvol – terra descendents negatives. En el cas dels aerogeneradors, amb altures superiors als 60m, en els casos dels parcs objecte d'estudi, altures d'uns 120m (torre de 80m + rotor de diàmetre 80m), també cal considerar les descàrregues ascendents negatives. El camp elèctric generat durant una tempesta es veu afectat per la geometria del propi aerogenerador, fet que provoca que es pugui crear un líder ascendent des del aerogenerador, convertint-lo en generador de llamps.

4.1 Definició i propietats de les descàrregues atmosfèriques.

Un llamp es pot modelar com una font de corrent i els principals paràmetres a tenir en compte en el disseny i dimensionat del sistema de protecció envers el llamp són el valor pic de la corrent (I), el pendent dels impulsos de corrent del impacte del llamp (di/dt), la càrrega transferida (Q) i l'energia específica (W/R).

Els valors màxims registrats de corrent d'un llamp produït per un impacte simple es troba entre els 2 i els 300kA. Els valors màxims registrats de càrrega transferida són d'alguns centenars de Coulombs i l'energia específica pot arribar a màxims de 20MJ/ Ω .

En l'avaluació de danys, cal tenir en compte aquests tres paràmetres, ja que són els que intervenen en els danys en les pales i els sistemes de protecció. També intervenen en els danys indirectes que es poden produir en els sistemes elèctrics i electrònics.

Els valors màxims descrits es donen en un percentatge molt baix de totes les descàrregues que es produeixen. El valor mitjà de la corrent de pic es aproximadament de 30kA. Els valors mitjans de càrrega transferida i energia específica són de 5C i 55kJ/ Ω respectivament.

4.2 Problemàtica i afectació sobre aerogeneradors.

En el cas dels aerogeneradors, aquestes estructures estan molt exposades al fenomen dels llamps. Degut al procés de formació del llamps, aquest impactarà en les parts més altes de les estructures que es trobi en el seu camí. Si afegim a l'altura dels propis aerogeneradors, la seva ubicació en serralades o llocs elevats per maximitzar l'aprofitament del recurs eòlic, es converteixen en estructures molt sensibles a aquest fenomen.

Avaluat el risc d'impacte sobre un aerogenerador, cal avaluar els danys que poden causar en les instal·lacions, que principalment es poden dividir en danys mecànics sobre les estructures (torre i pales) i danys mecànics i elèctrics sobre les instal·lacions internes. A les pèrdues econòmiques pels danys físics sobre les instal·lacions, cal afegir les pèrdues econòmiques de les aturades de producció d'energia elèctrica per avaries.

A més dels danys materials i econòmics cal tenir en compte els danys físics sobre les persones que puguin estar en les instal·lacions en el moment de la ocurrència del fenomen.

La constant evolució tecnològica en el camp de l'energia eòlica, està portant cada vegada a construir màquines més grans i accentuant els problemes descrits. D'altra banda, en l'actualitat, són les estructures més altes que podem trobar en zones aïllades. El problema

genèric dels parcs eòlics es cada vegada mes present i cal dedicar-hi esforços per predir amb la màxima precisió els seus efectes i procurar minimitzar-ne el risc.

5 Norma UNE-EN 62305. Protecció contra el llamp

La norma UNE-EN 62305-1 Protecció contra el llamp, exposa els principis generals per la protecció envers el llamp d'estructures, incloent-hi les instal·lacions i el seu contingut, i les persones. Les parts de la norma d'aplicació són les següents:

- UNE EN 62305-1 Protecció contra el llamp. Part 1: Principis Generals
- UNE EN 62305-2 Protecció contra el llamp. Part 2: Avaluació del risc.
- UNE EN 62305-3 Protecció contra el llamp. Part 3: Disseny físic d'estructures i risc humà
- UNE EN 62305-4 Protecció contra el llamp. Part 4: Sistemes Elèctrics i electrònics en estructures.

5.1 Paràmetres de la corrent del llamps.

Existeixen, doncs, dos tipus bàsics de descàrregues:

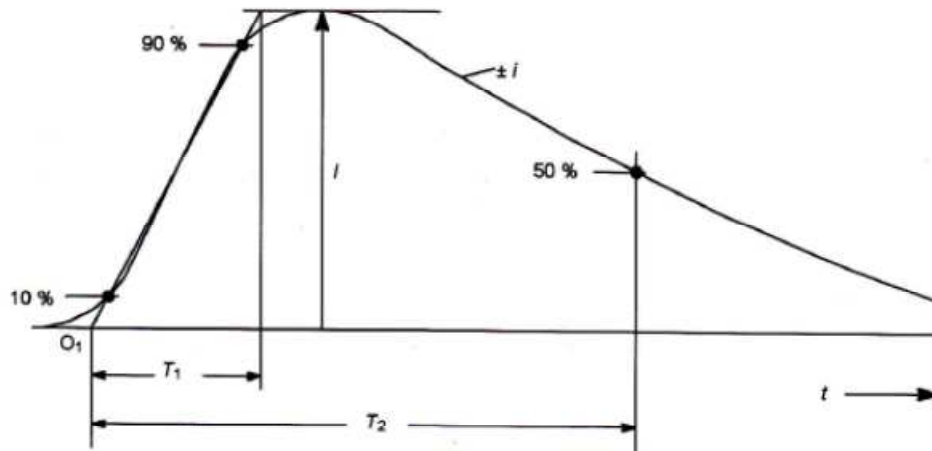
- Descàrregues descendents, iniciades per un líder descendent des del núvol a terra.
- Descàrregues ascendents, iniciades per un líder ascendent des de una estructura cap al núvol.

La major part de les descàrregues descendents tenen lloc en terrenys plans i sobre estructures poc elevades. D'altra banda, les ascendents es produeixen en estructures elevades i/o exposades. Es d'aquesta manera, que per l'estudi que ens ocupa, les descàrregues ascendents agafen rellevància.

El corrent del llamp està format per un o mes impactes diferents:

- Impulsos amb duracions inferiors a 2ms
- Impulsos llargs de duració superior a 2ms

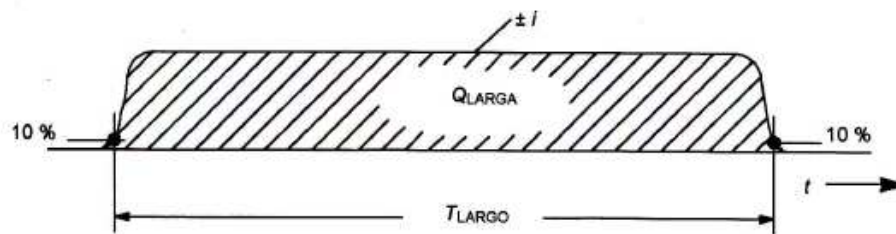
A continuació s'observen les formes d'ona d'ambdós tipus d'impulsos.



Leyenda

- O_1 Origen virtual
- I Valor de cresta de la corriente
- T_1 Tiempo del frente
- T_2 Tiempo hasta la mitad del valor

Figura 4. Definicions dels paràmetres d'un impuls (normalment $T_2 > 2ms$)



Leyenda

- T_{LARGO} Duración
- Q_{LARGA} Carga de un impacto largo

Figura 5. Definicions dels paràmetres d'un impuls de llarga duració (normalment $2ms < T_{larg} < 1s$)

Els impactes es classifiquen també per la seva polaritat (positives o negatives) i per la seva situació durant la descàrrega (primera descàrrega, subsegüents o sobreposades).

A continuació es mostren els paràmetres de la corrent del llamp, basats en els resultats del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE).

La distribució estadística dels paràmetres del corrent del llamp es pot considerar una distribució logarítmica normal amb valor mitjà μ i dispersió σ_{\log} . A partir d'aquesta distribució es pot determinar la probabilitat que es produeixi qualsevol valor de cada paràmetre.

Paràmetre	Valor fixat pel NPR I	Valors			Tipus d'Impacte
		95%	50%	5%	
I(kA)		4	20	90	Primer curt negatiu
	50	4,9	11,8	28,6	Subsegüent curt negatiu
	200	4,6	35	250	Primer curt positiu (sol)
Q _{descàrrega} (C)		1,3	7,5	40	Descàrrega Negativa
	300	20	80	350	Descàrrega Positiva
Q _{curta} (C)		1,1	4,5	20	Primer curt negatiu
		0,22	0,95	4	Subsegüent curt negatiu
	100	2	16	150	Primer curt positiu (sol)
W/R (kJ/ Ω)		6	55	550	Primer curt negatiu
		0,55	6	52	Subsegüent curt negatiu
	10000	25	650	15000	Primer curt positiu
di/dt _{màx} (kA/ μ s)		9,1	24,3	65	Primer curt negatiu
		9,9	39,9	161,5	Subsegüent curt negatiu
	20	0,2	2,4	32	Primer curt positiu
di/dt _{30% 90%} (kA/ μ s)	200	4,1	20,1	98,5	Subsegüent curt negatiu
QLlarga (C)	200				Llarg
TLlarg (s)	0,5				Llarg
Duració del front (μ s)		1,8	5,5	18	Primer curt negatiu
		0,22	1,1	4,5	Subsegüent curt negatiu
		3,5	22	200	Primer curt positiu (sol)
Duració del Impacte (μ s)		30	75	200	Primer curt negatiu
		6,5	32	140	Subsegüent curt negatiu
		25	230	2000	Primer curt positiu (sol)
Interval de Temps (ms)		7	33	150	
Duració Total de la Descàrrega (ms)		0,15	13	1100	Descàrrega negativa (totes)
		31	180	900	Descàrrega negativa (simple)
		14	85	500	Descàrrega positiva

Taula 1. Valors tabulats dels paràmetres del corrent del llamps segons CIGRE (Electra n°41 i 69)

5.2 Danys causats pels llamps

La caiguda de llamps sobre qualsevol estructura pot causar danys en la pròpia estructura, en els seus ocupants i en els béns, incloent la fallada dels sistemes interns.

Segons de la situació del impacte la norma classifica les descàrregues en:

- S1: Descàrregues que impacten directament sobre l'estructura
- S2: Descàrregues que impacten en les proximitats de l'estructura
- S3: Descàrregues que impacten en les línies connectades a l'estructura.
- S4: Descàrregues que impacten en les proximitats de l'estructura.

Es classifiquen els danys que poden produir aquestes descàrregues de la següent manera:

- D1: Danys a sers vius per l'impacte elèctric degut a les tensions de pas i contacte
- D2: Danys físics (foc, explosió, danys mecànics) produïts pels efectes de la corrent del llamp.
- D3: Fallada dels sistemes interns degut a l'impuls electromagnètic del llamp.

Finalment es classifiquen les pèrdues produïdes pels danys de la següent manera:

- L1: Pèrdua de vida humana
- L2: Pèrdua de servei públic
- L3: Pèrdua de patrimoni cultural
- L4: Pèrdua de valor econòmic.

En la següent taula s'especifiquen els danys i pèrdues sobre els aerogeneradors en funció del punt d'impacte del llamp.

Punt Impacte	Font del dany	Tipus de dany	Tipus de pèrdua
Sobre l'estructura	S1	D1; D2; D3	L1; L2; L4
A prop de l'estructura	S2	D3	L2; L4
Sobre una línia de servei	S3	D1; D2; D3	L1; L2; L4
A prop de línia de servei	S4	D3	L2; L4

Taula 2. Danys i Pèrdues sobre les infraestructures en funció del punt d'impacte del llamp.

5.3 Avaluació del risc per impactes de llamps

El risc, R és el valor de una pèrdua anual mitja probable. Per cada tipus de pèrdua que es pot presentar en una estructura o servei, caldrà avaluar el risc corresponent.

Els riscos en una estructura poden ser els següents:

- R₁: Risc de pèrdua humana

- R₂: Risc de pèrdua del servei públic
- R₃: Risc de pèrdua de patrimoni cultural
- R₄: Risc de pèrdua de valor econòmic.

Un cop feta l'avaluació dels riscos, cal comparar-la amb el risc tolerable per tal de decidir si cal protegir o no l'estructura i el nivell de protecció que caldrà assolir. L'avaluació del risc queda fora de l'abast d'aquest treball.

5.4 Nivells de protecció contra el llamp (NPR)

La norma fixa quatre nivells de protecció contra el llamp (NPR I a NPR IV), fixant per cada NPR un conjunt de paràmetre màxims i mínims del corrent del llamp.

Els valors màxims dels paràmetres del corrent del llamp corresponents al NPR I no hauran de ser sobrepassats amb una probabilitat del 99%. Els valors màxims dels paràmetres de la corrent del llamp corresponents al NPR I es redueixen al 75% per NPR II i al 50% per NPR III i NPR IV (lineals per I, Q i di/dt, però quadràtics per W/R). Els paràmetre de temps no varien.

En la següent taula es donen els valors màxims dels paràmetres de la corrent del llamp pels diferents nivells de protecció que són d'especial interès en el càlcul i disseny de les instal·lacions de protecció.

Primer Impuls positiu			NPR			
Paràmetre de corrent	Símbol	Unitat	I	II	III	IV
Valor de cresta de la corrent	I	kA	200	150	100	
Càrrega del impuls	Q _{curta}	C	100	75	50	
Energia específica	W/R	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Paràmetres de temps	T ₁ /T ₂	μs/μs	10/350			
Primer Impuls negatiu			NPR			
Paràmetre de corrent	Símbol	Unitat	I	II	III	IV
Valor de cresta de la corrent	I	kA	100	75	50	
Pendent mitja	di/dt	kA/μs	100	75	50	
Paràmetres de temps	T ₁ /T ₂	μs/μs	1/200			
Impuls Subsegüent			NPR			
Paràmetre de corrent	Símbol	Unitat	I	II	III	IV
Valor de cresta de la corrent	I	kA	50	37,5	25	
Pendent mitja	di/dt	kA/μs	200	150	100	
Paràmetres de temps	T ₁ /T ₂	μs/μs	0,25/100			

Impuls llarg			NPR			
Paràmetre de corrent	Símbol	Unitat	I	II	III	IV
Càrrega del impuls	Q_{llarga}	C	200	150	100	
Paràmetres de temps	T_{llarg}	s	0,5			
Descàrrega			NPR			
Paràmetre de corrent	Símbol	Unitat	I	II	III	IV
Càrrega de la descàrrega	$Q_{descàrrega}$	C	300	225	150	

Taula 3. Valors màxims dels paràmetres del corrent del llamps pels diferents nivells de protecció.

6 Norma UNE-EN 61400-24.

La norma UNE-EN 61400-24. Aerogeneradors. Part 24: Protecció contra el llamp, avalua el risc d'impacte sobre aerogeneradors i els seus sistemes de potència i defineix els requisits per protegir contra els efectes directes i indirectes del llamps sobre les pales, altres elements estructurals i els sistemes elèctrics i de control. En aquesta norma es descriu la metodologia de càlcul per l'estimació d'impactes de llamps sobre aerogeneradors, així com les mesures de protecció que caldrà prendre.

6.1 Valoració de la freqüència que els llamps poden afectar a un aerogenerador

El primer pas es estimar la freqüència del número de descàrregues en un aerogenerador.

La norma estableix la següent expressió per fer aquesta estimació:

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6}$$

On:

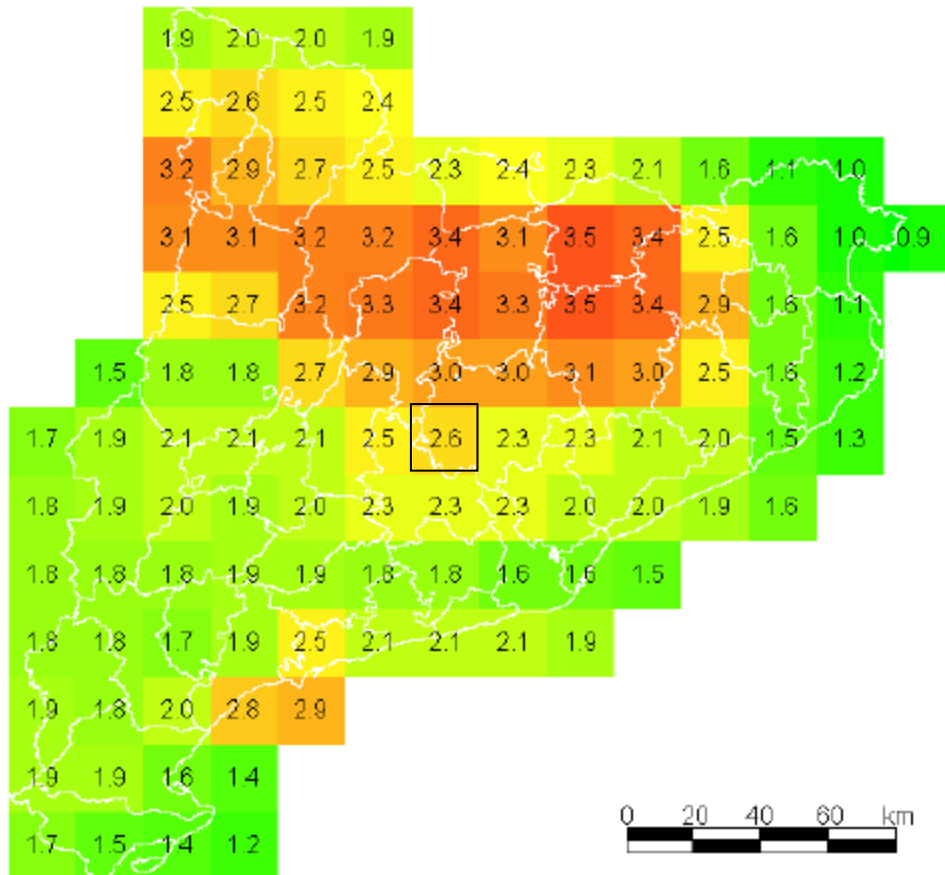
N_D [any⁻¹] : Valor mitja anual de descàrregues que afecten aerogeneradors

N_g [km⁻² · any⁻¹] : Densitat mitjana anual de descàrregues

A_d [m²] : Area de la superfície de captació de descàrregues a l'estructura

C_d : Factor Mediambiental

El valor de N_g s'obté de l'anuari de dades meteorològiques del 2009 del Servei Meteorològic de Catalunya. El valor que es considera es de 2,5 llamps NT km⁻² any⁻¹.



Taula 4. Densitat mitjana de llamps (llamps NT km⁻² any⁻¹) en el període 2004-2009.

El factor mediambiental C_d a considerar es 1 per terrenys plans i 2 per aerogeneradors ubicats en indrets elevats. Es considera per tots els aerogeneradors d'estudi un factor $C_d = 2$.

La superfície de captació d'una estructura es defineix com una area en la superfície del terreny que té la mateixa freqüència anual de descàrregues que l'estructura. Segons la norma, per estructures aïllades com els aerogeneradors , l'àrea de captació equivalent es l'àrea formada per la intersecció amb el terreny d'una línia recta que passa per la part superior de l'estructura amb una pendent de 1:3 i que gira al voltant de l'estructura. Es recomana modelar tots els aerogeneradors com un màstil d'altura igual a la torre mes el radi del rotor, sigui quin sigui el material de les pales.

D'aquesta manera, la superfície de captació es un cercle de radi tres vegades l'altura del aerogenerador amb centre a la base del aerogenerador en estudi. En la següent figura, es mostra la superfície de captació que en resulta.

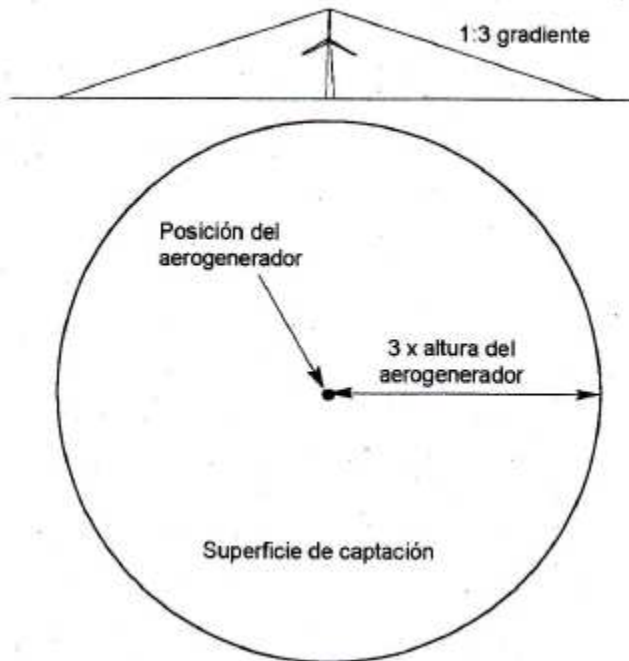


Figura 6. Superfície de captació d'un aerogenerador.

La norma també considera la ubicació dels aerogeneradors en terrenys més complexes, com pot ser la ubicació en terrenys elevats com turons. En aquest cas, es considera més apropiat utilitzar l'altura efectiva del aerogenerador i sumar a l'altura del aerogenerador, l'altura de la seva situació. L'altura efectiva a considerar en aquests casos s'observa en la següent figura.

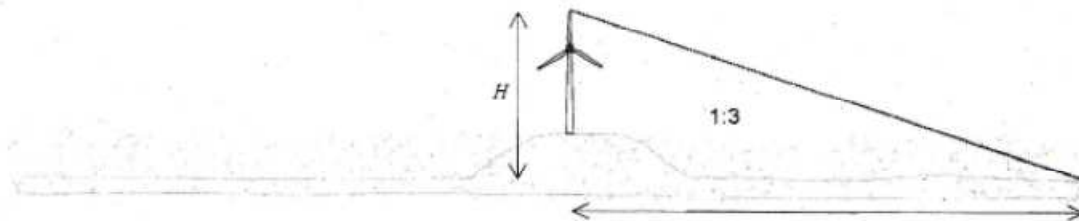


Figura 7. Altura efectiva, H, d'un aerogenerador situat en indrets elevats.

En el cas que ens ocupa, i en tractar-se d'un estudi de la globalitat dels parcs eòlics, no es considerarà l'altura efectiva del terreny, per estar tots ubicats com un conjunt en les zones elevades de les carenes de les muntanyes. Atés que els aerogeneradors estan ubicats ja en altura i que l'altura relativa entre ells es desprezible, només es considerarà pel càlcul de l'àrea de captació, l'altura del aerogenerador. La interpretació que s'ha fet de l'altura efectiva proposada a la norma, s'hauria de considerar l'àrea de captació d'un radi molt

gran, pel que l'estudi es complicaria i impossibilita l'objectiu de determinar quins aerogeneradors de tot el parc reben mes impactes.

Els aerogeneradors també es poden veure afectats pels impactes de llamps a prop de l'estructura. La norma proposa la següent fórmula pel càlcul de les descàrregues atmosfèriques a prop d'un aerogenerador.

$$N_M = N_g \cdot (A_m - A_d \cdot C_d) \cdot 10^{-6}$$

On:

A_m [m²]: Superfície de captació d'impactes a prop de l'estructura. Àrea de la circumferència de radi 250m.

En aquest cas es determina un radi de 250m pel càlcul de l'àrea de captació pels impactes indirectes i un radi de 3H pels impactes directes. Dels càlculs en resulta que l'àrea de captació dels impactes indirectes es menor que l'àrea de captació pels impactes directes. D'aquesta manera, no es tindran en consideració els impactes indirectes segons els càlculs de la norma UNE.

Els aerogeneradors estan interconnectats entre ells amb línies subterrànies de mitja tensió fins a una subestació que rep tota l'energia dels aerogeneradors de la xarxa de mitja tensió interna del parc. En aquest punt s'eleva la tensió a la subestació per tal de connectar-se a la xarxa elèctrica de transport en alta tensió.

D'aquesta manera, caldrà considerar els impactes a les línies elèctriques soterrades i aèries, tan interiors del parc com les d'interconnexió amb la xarxa de transport des de la subestació del parc.

Segons la Norma UNE EN 62305-2, el número de descàrregues a una línia de servei que connecta amb un aerogenerador es pot calcular amb la següent expressió:

$$N_L = C_d \cdot C_t \cdot N_g \cdot A_l \cdot 10^{-6}$$

Es calcula també el número de descàrregues a prop d'una línia,

$$N_l = C_e \cdot C_t \cdot N_g \cdot A_l \cdot 10^{-6}$$

On:

C_d : Factor de situació. (Terreny pla = 1; Terreny muntanyós = 2)

C_e : Factor Mediambiental. (Zones rurals = 1)

C_t : Factor del transformador. ($C_t = 1$ si no hi ha trafo entre el punt d'impacte i l'aerogenerador i $C_t = 0,2$ amb trafo entre punt d'impacte i aerogenerador)

A_l [m^2]: Superfície de captació per descàrregues a la línia.

A_i [m^2]: Superfície de captació per descàrregues a prop de la línia.

En la següent taula es detalla el càlcul de les superfícies de captació A_l i A_i de línia de servei per línies elèctriques aèries i soterrades.

	Aèria	Soterrada
A_l	$[L_c - 3(H_a + H_b)]6H_c$	$[L_c - 3(H_a + H_b)]\sqrt{\rho}$
A_i	$1000L_c$	$25L_c\sqrt{\rho}$

Taula 5. Càlcul de les superfícies de captació A_l i A_i .

On:

L_c [m]: Longitud de la línia de servei des de l'aerogenerador fins a l'estructura més pròxima segons la línia (màxim 1000m)

H_a [m]: Altura de l'aerogenerador connectat en l'extrem "a" de la línia.

H_b [m]: Altura de l'aerogenerador (o una altre estructura) connectat en l'extrem "b" de la línia.

H_c [m]: Altura dels conductors de la línia de servei sobre el terreny

ρ [Ωm]: Resistivitat del terreny de la línia soterrada. (valor màxim $\rho = 500 \Omega m$)

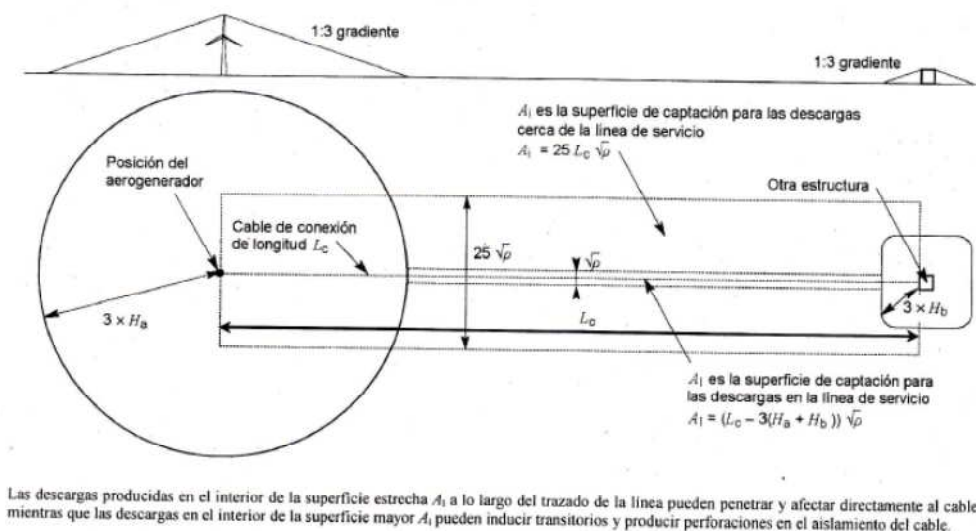


Figura 8. Àrees de captació de línies soterrades.

7 Simulacions d'impactes de llamps sobre aerogeneradors

Per estimar el número d'impactes reals de llamps sobre els aerogeneradors del parc, s'ha treballat amb una base de dades de les descàrregues atmosfèriques que proporciona la xarxa de detecció LINET, amb les següents dades:

- Data
- Hora
- Latitud i Longitud de la caiguda del llamp
- Corrent del llamp
- Tipus de llamp (0: Indeterminat; 1: NN; 2: NT)
- Altura
- Corrent en valor absolut

La base de dades avarca una zona àmplia que inclou la zona d'estudi, des del 04/06/2007 al 31/05/2011. D'aquesta manera s'obtenen les descàrregues elèctriques atmosfèriques en una area de 350km² i en 4 anys, amb un total 25.424 llamps.

A continuació es classifiquen els llamps de la base de dades segons tipus de llamp (NN, NT o Indeterminats), primer impactes o subsegüents dels llamps NT i segons la polaritat del primer impacte NT.

Tipus de Llamp	Nº Total Llamps	Percentatge
Núvol – Terra	15.536	61,11%
Núvol – Núvol	6.772	26,64%
Indeterminats	3.116	12,26%
Subtotal Llamps	25.424	100%
Núvol – Terra. Primer Impacte	12.768	82,18%
Núvol – Terra. Impactes Subsegüents	2.769	17,82%
Subtotal Núvol – Terra	15.537	100%
Núvol – Terra. Primer Impacte. Positiu	3.849	30,15%
Núvol – Terra. Primer Impacte. Negatiu	8.919	69,85%
Subtotal NT. Primer Impacte	12.768	100%

Taula 6. Classificació segons tipus de la base de dades de llamps utilitzada en l'estudi.

De les dades de la base de dades de llamps, s'observa que el 60% dels llamps són núvol – terra que són els que causaran danys a les instal·lacions. Els llamps Núvol – Núvol representen el 26% del total. Tanmateix, hi ha un 12% de llamps indeterminats, llamps que els sistemes de detecció no poden determinar si són NT o NN.

Un cop seleccionats els llamps NT que són sobre els que centrarem l'estudi, s'identifica que el 82% són primers impactes i un 17% són impactes subsegüents a aquesta primera descàrrega. Finalment, es calcula que d'aquests primers impactes NT, un 70% són de polaritat negativa i el 30% restant de polaritat positiva.

De l'anàlisi de la base de dades dels llamps caiguts sobre l'àrea d'estudi, es conclou que són resultats coherents amb la teoria exposada anteriorment.

8 Descripció de la zona d'estudi

La zona d'estudi del projecte es el Parc Eòlic Serra de Rubió amb un total de 50 aerogeneradors ubicats als termes municipals de Rubió (Anoia), Castellfollit del Boix (Bages) i Òdena (Anoia), de 1,5MW de potència nominal cadascun formant un total de 75MW instal·lats. La ubicació dels aerogeneradors es pot observar en el plànol 2.

El parc eòlic Serra de Rubió es connecta a la xarxa des de la Subestació pròpia del Parc que eleva la tensió de generació interna del parc i queda ubicada annexa a la subestació de la xarxa de Transport de 220kV. El Parc es connecta a la línia de 220kV la Pobla –Pierola.

A continuació es detallen les coordenades dels aerogeneradors del Parc Eòlic Serra de Rubió.

Aero	UTM X	UTM Y
1	382759,5929	4611219,6747
2	382858,8689	4611292,9178
3	382944,6039	4611390,1297
4	383175,7338	4611690,6727
5	383289,3379	4611740,3991
6	383392,8228	4611798,5620
7	383436,6604	4611912,0602
8	383524,6083	4612001,9903
9	383669,4646	4612045,4253
10	383639,6408	4612156,5366
11	383661,5721	4612297,7462
12	383723,4651	4612395,6905
13	383738,1757	4612509,7117

Aero	UTM X	UTM Y
26	384518,1876	4613826,1205
27	384511,5921	4613994,9627
28	384428,2451	4614222,3415
29	385224,7241	4613107,7628
30	385294,4777	4613216,8041
31	385355,3376	4613322,7926
32	385448,7883	4613407,5828
33	385553,5848	4613485,3940
34	385832,7857	4613407,4152
35	385971,7150	4613521,8226
36	386096,3336	4613546,8909
37	386229,6582	4613550,4882
38	386359,5276	4613623,7379

14	383731,4507	4613231,0469	39	386384,9616	4613740,9909
15	383706,3396	4613404,1747	40	386389,6574	4613865,6253
16	383591,5450	4613568,0861	41	386433,6996	4613976,8721
17	383559,5136	4613743,8273	42	386515,8613	4614064,5994
18	383565,4875	4613898,7181	43	386589,3524	4614163,7043
19	383555,6303	4614040,3311	44	386685,9805	4614227,5870
20	383574,4152	4614188,0890	45	386774,4901	4614314,1776
21	383609,1631	4614333,9714	46	386881,7755	4614367,3035
22	383621,7197	4614505,8463	47	386969,6190	4614456,0164
23	383625,9525	4614634,1889	48	387065,1612	4614613,3848
24	384613,1685	4613457,8479	49	387320,4942	4614554,8449
25	384532,2490	4613634,5323	50	387504,1040	4614568,9746

Taula 7. Coordenades UTM de la ubicació dels Aerogeneradors del Parc Serra de Rubió.

Els aerogeneradors instal·lats al parc eòlic de serra de Rubió són turbines d'Acciona Windpower model AW77/1500 (classe IEC IIa). Característiques principals dels aerogeneradors:

- Potència Nominal.....1.500 kW
- Tensió Nominal.....12 kV
- GeneradorAsíncron doblement alimentat
- Diàmetre rotor77 m
- Altura torre.....80 m
- Longitud pales.....37,3 m
- Velocitat del vent connexió.....3,5 m/s
- Velocitat del vent Nominal11,1 m/s
- Velocitat del vent desconexió.....25 m/s

9 Estimació d'impactes sobre aerogeneradors en l'àrea d'estudi

Per l'estimació d'impactes sobre aerogeneradors s'implementarà el mètode de càlcul de la Norma UNE EN 61400-24 que s'ha descrit anteriorment.

Per determinar el número real d'impactes sobre els aerogeneradors es creuaran les dades de la base de dades de llamps amb les coordenades dels aerogeneradors. Per fer-ho s'ha utilitzat un software de SIG (Sistema d'Informació Geogràfica) com es el SAGA. Mitjançant aquest programa, es determina primer la ubicació dels aerogeneradors, després es sobre posen tots els llamps caiguts i es seleccionen aquells llamps que cauen dins de l'àrea de captació dels aerogeneradors, que segons tot l'exposat anteriorment, es l'àrea d'una circumferència de radi 360m amb centre a la base del aerogenerador.

Un vegada s'han determinat els llamps que cauran sobre els aerogeneradors, caldrà representar-ho gràficament i per fer-ho s'ha utilitzat l'autocad. En primer lloc, es descarrega la cartografia a escala 1/5.000 del Institut de Cartografia de Catalunya. Amb la cartografia insertada al CAD, es dibuixaran per una banda els aerogeneradors (conegudes les coordenades UTM), i després es representaran els llamps. Per fer-ho, atés que amb el SAGA em pogut determinar quins llamps impactaran i en tenim les coordenades UTM, només ens cal dibuixar-ho sobre la cartografia on tenim els aerogeneradors. Per automatitzar el procés, i evitar haver d'introduir les coordenades dels llamps una per una, s'ha utilitzat una aplicació que es una extensió del Autocad, que exporta o importa punts a autocad a partir de les seves coordenades.

D'aquesta manera s'obtenen tots els llamps que han caigut sobre els parc objecte d'estudi com s'observa en el plànol 2.

9.1 Càlcul d'impactes teòrics segons norma UNE

A continuació es detallen els resultats d'implementar el càlcul d'impactes segons el que s'especifica en la norma UNE EN 61400-24 descrita anteriorment.

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6} = 2,6 \cdot 407150 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 2,12 \frac{\text{llamps}}{\text{aero} \cdot \text{any}}$$

On:

N_D [any⁻¹] : Valor mitjà anual de descàrregues que afecten aerogeneradors

N_g [km⁻² · any⁻¹] : Densitat mitjana anual de descàrregues. Es considera 2,6

A_d [m²] : Area de la superfície de captació de descàrregues a l'estructura

C_d : Factor Mediambiental

D'aquesta manera per la globalitat dels 50 aerogeneradors i durant 4 anys, sobre el parc haurien caigut 424 llamps.

9.2 Càlcul d'impactes reals segons base de dades.

Una vegada identificats els llamps que van caure en les àrees de captació dels aerogeneradors de la base de dades de llamps, es representen gràficament sobre cartografia amb Autocad per tal de determinar sobre quin aerogenerador afectarà cada llamp, tal i com s'observa en el plànol 2.

Sobre la totalitat del parc van caure 129 llamps durant els 4 anys. Això representa una mitjana de 0,64 impactes per any i aerogenerador. Aquests valors disten molt dels valors teòrics obtinguts de la norma UNE.

- Càlcul impactes segons norma UNE424 llamps/parc · any
- Càlcul impactes reals129 llamps/parc · any

Per determinar sobre quin aerogenerador afectarà l'impacta, s'ha considerat que afectarà sobre el que quedi més pròxim al llamp. En cas de que estigui equidistant (diferència menor a 2 metres), s'imputarà mig llamp a cada aerogenerador. En aquest sentit, cal destacar que ha calgut fer aquesta hipòtesi per identificar sobre quin aerogenerador impactarà cada llamp, però que degut a la naturalesa del fenomen i als mètodes de mesura de les magnituds de les descàrregues, els llamps poden haver caigut sobre altres aerogeneradors que també quedin dins de l'àrea d'influència.

En la següent taula es detallen els llamps caiguts sobre cada aerogenerador:

Aero	ID Llamps								Llamps/Aero (4 anys)	Llamps/Any · Aero
1	1	3	43	44	62	91	123	129	8	2
2	-								0	0
3	2	29	45	64	72				5	1,25
4	30	92	128						3	0,75
5	58	105							2	0,5
6	42	84							2	0,5
7	59	65							2	0,5
8	63	102							2	0,5
9	7	31	46						3	0,75
10	-								0	0
11	28								1	0,25
12	10								1	0,25
13	5	11	61	73	82	83	106		7	1,75
14	68	75	81	107					4	1
15	6	67	69	70					3	0,75
16	6	56	67	71	103				4	1
17	57								1	0,25
18	110								1	0,25
19	49	114							1	0,25
20	49	114	93	109					3	0,75
21	27	41							2	0,5
22	89	98	108						2,5	0,625
23	15	88	90	97	98				4,5	1,125
24	39	74	76	77					4	1
25	13	78							2	0,5

26	60	66							1,5	0,375	
27	4	26	35	37	52	66			5,5	1,375	
28	118	119	127						3	0,75	
29	34	50							2	0,5	
30	38	51	87	104					4	1	
31	95								1	0,25	
32	24	47							2	0,5	
33	-								0	0	
34	55	96	120						3	0,75	
35	19	8	14	48	85	94	100		6,5	1,625	
36	19	25	86	99	101				4,5	1,125	
37	20	33							2	0,5	
38	21	121							2	0,5	
39	9	117							2	0,5	
40	22	80							2	0,5	
41	23	53	79						3	0,75	
42	-								0	0	
43	-								0	0	
44	-								0	0	
45	16	122	125						3	0,75	
46	12	36							2	0,5	
47	18	111	116	112	113	115	124		7	1,75	
48	-								0	0	
49	32	54	126						3	0,75	
50	17								1	0,25	
									Total	128	32
									Mitjana	2,56	0,64

Taula 8. Llistat de llamps caiguts sobre cadascun dels aerogeneradors.

*A l'annex es detallen les principals magnituds dels llamps

La orografia del terreny i la ubicació de cada aerogenerador dins del parc, influeixen en el número d'impactes que rebrà. D'aquesta manera es pot observar clarament al plànol 2 que aquells aerogeneradors que queden als extrems de les diferents alineacions, reben més impactes, ja que queden més desprotegits.

Les àrees de captació de radi 360m de cada aero es solapen entre elles, ja que les distàncies entre ells són d'uns 120m. D'aquesta manera, els aerogeneradors fan de parallamps entre ells i alguns queden més protegits que d'altres que queden més exposats als impactes. Per exemple s'observa com els aerogeneradors amb més d'un impacte anual són els números 3, 13, 23, 27, 35, 36 i 47. Es pot concloure, que els aerogeneradors amb més impactes, són aquells en els que es sobreposen menys àrees de captació.

Les àrees de captació de cada aerogenerador es sobreposen les unes amb les altres. Tal i com s'observa en els plànols 4 i 5 es sobreposen les àrees de captació de fins a 7 aerogeneradors.

9.3 Proposta de càlcul d'impactes per la globalitat del parc eòlic.

Un cop analitzat i calculat el número d'impactes que es podrien esperar segons la norma UNE i comparat amb els càlculs reals que s'han fet, es conclou que la diferència es important, pel que caldria revisar el mètode de càlcul proposat a la norma.

El motiu de la diferència entre els dos càlculs està en que la norma considera els aerogeneradors aïllats i no contempla la globalitat del parc i que les areas de captació es sobreposen entre aerogeneradors, pel que el número d'impactes reals serà menor. Per corregir el càlcul es proposa considerar l'àrea de captació de tot el parc, com l'àrea del perímetre de la superposició de totes les àrees. Aquesta àrea s'ha calculat gràficament i es pot observar en el plànol 3.

El parc es pot dividir en quatre grans agrupacions d'aerogeneradors. Dues d'aquestes àrees es sobreposen, creant tres grans àrees tancades.

- Area 11.626.967 m².
- Area 11.441.133 m².
- Area 13.547.444 m².

- **Area Total..... 6.616.544 m².**

Amb aquesta nova area, es tornarà a calcular l'estimació d'impactes amb la fórmula de la norma.

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6} = 2,6 \cdot 6.616.544 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 34,4 \frac{\text{llamps}}{\text{parc} \cdot \text{any}}$$

El parc consta de 50 aerogeneradors, pel que dividint el número total d'impactes al parc pel número d'aerogeneradors, s'obtenen 0,688 impactes/aero · any. Aquest valor s'apropa als 0,635 impactes/aero · any calculat anteriorment, pel que podem validar el nou càlcul.

- Impactes totalitat parc (nou càlcul UNE).....0,688 impactes / aero · any.
- Impactes Reals (segons Base Dades).....0,635 impactes / aero · any.

9.4 Proposta de càlcul individual per aerogenerador dins del parc

Per realitzar el càlcul de cada aerogenerador individualment tenint en compte la globalitat del parc i la influència dels aerogeneradors veïns, es proposa el següent mètode que consisteix en considerar les àrees compartides i calcular l'àrea equivalent de captació com la suma ponderada de les subàrees en funció del número d'aerogeneradors que comparteix. D'aquesta manera una area compartida per dos aerogeneradors s'imputarà el 50% de la superfície a cadascun, en una amb tres, un terç a cadascun i així successivament. La representació gràfica del càlcul de l'àrea equivalent es detalla al plànol 4 per l'agrupació d'aerogeneradors 1 i en el plànol 5 per l'agrupació d'aerogeneradors 2.

A continuació s'ha calculat el número d'impactes teòric amb aquesta metodologia de càlcul pel grup 1, amb els aerogeneradors del 1 al 13 i pel grup 2, amb els aerogeneradors del 24 al 28.

9.4.1 Càlcul per l'agrupació d'aerogeneradors 1.

Es realitza el càlcul proposat per dues agrupacions d'aerogeneradors amb l'objectiu de validar-lo. En la primera agrupació, s'inclouen els aerogeneradors del 1 al 13, que formen part del primer ramal del parc.

El primer pas es representar gràficament en autocad les àrees de captació de cada aerogenerador. Un cop dibuixades totes les àrees, s'identifiquen les zones sobreposades i es determina el número d'aerogeneradors que comparteix aquella zona d'influència. Gràficament, s'han identificat les zones numèricament i s'han representat amb trama de colors segons el número d'aerogeneradors que comparteixen. Les zones considerades s'identifiquen en el plànol 4. S'han obtingut un total de 78 zones amb fins a 7 aerogeneradors que comparteixen una mateixa zona de captació.

A continuació es detalla el càlcul per l'aerogenerador 1, i s'inclou una taula amb els resultats pels 13 aerogeneradors i es compara amb les dades obtingudes de l'estimació d'impactes reals. L'aerogenerador 1, comparteix les zones Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_6 . Les àrees d'aquestes zones i el número d'aerogeneradors que comparteixen, es pot veure en la taula.

Per refer el càlcul de la norma UNE, cal calcular la nova area de captació. Per l'aerogenerador 1, la seva area de captació es divideix en 4 zones. La zona 1, no està compartida amb cap altre aerogenerador, la zona 2, està compartida entre els aeros 1 i 2, la zona 3 està compartida pels aerogeneradors 1, 2 i 3, i finalment, la zona 6 està compartida pels aerogeneradors 1, 2, 3 i 4. D'aquesta manera, es calcula l'àrea equivalent de cada zona tenint en compte el número d'aerogeneradors que la comparteixen. L'àrea de

captació del aerogenerador, serà la suma de les areas equivalents de les zones d'influència d'aquell aero, calculades dividint l'àrea total de la zona entre el número d'aerogeneradors que comparteixen aquella zona.

$$A_{d_{eq_An}} = \frac{A_{Z1}}{n_{Z1}} + \frac{A_{Z2}}{n_{Z2}} + \frac{A_{Z3}}{n_{Z3}} + \dots + \frac{A_{Zn}}{n_{Zn}}$$

On:

$A_{d_{eq_An}}$: Area equivalent Aerogenerador n.

A_{Zn} : Area total de la zona n

n_{Zn} : Número aerogeneradors que comparteixen aquella zona

Per l'Aerogenerador 1, l'àrea equivalent valdrà:

$$A_{d_{eq_A1}} = \frac{A_{Z1}}{n_{Z1}} + \frac{A_{Z2}}{n_{Z2}} + \frac{A_{Z3}}{n_{Z3}} + \frac{A_{Z6}}{n_{Z6}} = \frac{88.390}{1} + \frac{88.980}{2} + \frac{208.065}{3} + \frac{21.715}{4} = 207.664 \text{ m}^2$$

Un cop calculada l'àrea equivalent, el nou càlcul aplicant la fórmula de la norma UNE, quedaria de la següent manera:

$$N_{D_A1} = N_g \cdot A_{d_{eq_A1}} \cdot C_d \cdot 10^{-6} = 2,6 \cdot 207644 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1,079 \frac{\text{llamps}}{\text{aero} \cdot \text{any}}$$

En la taula següent es mostren les zones que resulten de les superposicions, la seva area total, el número d'aerogeneradors (n_z), l'àrea equivalent i els aerogeneradors que comparteixen aquella zona.

Zones	A _{total} [m ²]	n _z	A _{equivalent} [m ²]	Aerogeneradors													
				A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	
Z ₁	88.390	1	88.390	x													
Z ₂	88.980	2	44.490	x	x												
Z ₃	208.065	3	69.355	x	x	x											
Z ₄	3.605	1	3.605		x												
Z ₅	22.453	2	11.227		x	x											
Z ₆	21.715	4	5.429	x	x	x	x										
Z ₇	9.545	2	4.773		x	x											
Z ₈	8.210	1	8.210			x											
Z ₉	28.126	3	9.375		x	x	x										
Z ₁₀	11.508	1	11.508			x											
Z ₁₁	3.815	2	1.908			x	x										
Z ₁₂	24.427	4	6.107		x	x	x	x									
Z ₁₃	10.595	2	5.298			x	x										
Z ₁₄	28.794	3	9.598			x	x	x									

Estudi de descàrregues elèctriques atmosfèriques sobre aerogeneradors

Z15	29.785	4	7.446			x	x	x	x								
Z16	5.731	2	2.866				x	x									
Z17	23.530	1	23.530				x										
Z18	22.539	2	11.270				x	x									
Z19	12.200	3	4.067				x	x	x								
Z20	24.423	3	8.141				x	x	x								
Z21	10.105	2	5.053					x	x								
Z22	73.488	4	18.372				x	x	x	x							
Z23	4.622	1	4.622							x							
Z24	66.600	5	13.320				x	x	x	x	x						
Z25	7.040	3	2.347					x	x	x							
Z26	10.367	1	10.367						x								
Z27	5.060	4	1.265					x	x	x	x						
Z28	16.989	6	2.832				x	x	x	x	x	x					
Z29	6.005	4	1.501					x	x	x	x						
Z30	7.817	2	3.909							x	x						
Z31	34.408	6	5.735					x	x	x	x	x	x				
Z32	12.273	7	1.753				x	x	x	x	x	x	x				
Z33	12.781	5	2.556					x	x	x	x	x					
Z34	11.043	4	2.761						x	x	x	x					
Z35	4.590	2	2.295								x	x					
Z36	34.924	1	34.924									x					
Z37	16.611	5	3.322						x	x	x	x	x				
Z38	8.793	7	1.256					x	x	x	x	x	x	x			
Z39	3.312	3	1.104							x	x		x				
Z40	31.808	6	5.301						x	x	x	x	x	x			
Z41	7.038	4	1.760							x	x	x	x				
Z42	10.726	3	3.575								x	x	x				
Z43	12.830	2	6.415									x	x				
Z44	6.907	4	1.727								x	x	x	x			
Z45	7.957	5	1.591							x	x	x	x	x			
Z46	5.750	7	821							x	x	x	x	x	x	x	
Z47	7.037	5	1.407								x	x	x	x	x		
Z48	3.654	4	914								x	x		x	x		
Z49	3.855	3	1.285									x		x	x		
Z50	33.771	6	5.629								x	x	x	x	x	x	
Z51	13.180	5	2.636									x	x	x	x	x	
Z52	4.076	3	1.359										x	x	x		
Z53	13.133	4	3.283										x	x	x	x	
Z54	909	7	130									x	x	x	x	x	x
Z55	2.618	4	655										x		x	x	x
Z56	2.777	3	926											x	x	x	
Z57	6.476	1	6.476													x	
Z58	43.410	6	7.235									x	x	x	x	x	x
Z59	42.558	5	8.512										x	x	x	x	x
Z60	5.667	1	5.667														x
Z61	58.828	4	14.707												x	x	x

Z ₆₂	92.370	3	30.790												x	x	x
Z ₆₃	77.302	2	38.651													x	x
Z ₆₄	82.282	1	82.282														x
Z ₆₅	1.454	2	727												x	x	
Z ₆₆	1.727	2	864												x	x	
Z ₆₇	1.382	1	1.382										x				
Z ₆₈	2.600	2	1.300						x	x							
Z ₆₉	2.100	1	2.100						x								
Z ₇₀	971	1	971					x									
Z ₇₁	1.250	5	250									x		x	x	x	x
Z ₇₂	1.857	5	371									x	x	x	x	x	
Z ₇₃	2.350	2	1.175											x	x		
Z ₇₄	2.465	3	822						x	x	x						
Z ₇₅	1.718	4	430						x	x	x			x			
Z ₇₆	1.556	5	311						x	x	x	x		x			
Z ₇₇	1.324	5	265						x	x	x	x		x			
Z ₇₈	1.579	3	526									x	x	x			

Taula 9. Zones de les superposicions i afectació sobre els aerogeneradors.

En la següent taula, es dona el resultat del nou càlcul d'impactes amb l'àrea equivalent i el valor d'impactes reals estimats justificats en capítols anteriors.

Tot i que les diferències individuals continuen sent importants, els valors totals i la mitjana d'impactes s'aproximen.

	A _{equivalent}	N _d	N _d [Reals]
Aerogenerador 1	207.664	1,0799	2
Aerogenerador 2	154.360	0,8027	0
Aerogenerador 3	150.232	0,7812	1,25
Aerogenerador 4	132.281	0,6879	0,75
Aerogenerador 5	107.848	0,5608	0,5
Aerogenerador 6	101.343	0,5270	0,5
Aerogenerador 7	87.861	0,4569	0,5
Aerogenerador 8	82.631	0,4297	0,5
Aerogenerador 9	110.024	0,5721	0,75
Aerogenerador 10	85.839	0,4464	0
Aerogenerador 11	100.026	0,5201	0,25
Aerogenerador 12	121.853	0,6336	0,25
Aerogenerador 13	182.556	0,9493	1,75
Total		8,4	9
Mitjana		0,65	0,69

Taula 10. Càlcul d'impactes amb l'àrea equivalent i impactes reals

9.4.2 Càlcul per l'agrupació d'aerogeneradors 2.

En aquesta segona agrupació, es calcula el número d'impactes pels aerogeneradors 24, 25, 26, 27 i 28. Es repeteixen els mateixos càlculs ja exposats i s'obtenen resultats prou similars.

El càlcul en aquesta segona zona hi intervé una mostra d'aerogeneradors menor, i s'observa que els resultats s'aproximen menys a l'estimació real feta, tot i que es poden validar les dades.

Zones	A _{total} [m ²]	n _z	A _{equivalent} [m ²]	Aerogeneradors				
				A ₂₄	A ₂₅	A ₂₆	A ₂₇	A ₂₈
Z ₇₉	138.202	1	138.202	x				
Z ₈₀	122.302	2	61.151	x	x			
Z ₈₁	91.032	3	30.344	x	x	x		
Z ₈₂	13.686	1	13.686		x			
Z ₈₃	16.700	2	8.350		x	x		
Z ₈₄	55.614	4	13.904	x	x	x	x	
Z ₈₅	667	1	667		x			
Z ₈₆	4.203	2	2.102		x	x		
Z ₈₇	3.744	1	3.744			x		
Z ₈₈	69.309	3	23.103		x	x	x	
Z ₈₉	4.854	1	4.854			x		
Z ₉₀	8.971	2	4.486			x	x	
Z ₉₁	33.636	4	8.409		x	x	x	x
Z ₉₂	21.742	2	10.871			x	x	
Z ₉₃	13.978	1	13.978				x	
Z ₉₄	97.345	3	32.448			x	x	x
Z ₉₅	1.405	1	1.405				x	
Z ₉₆	105.150	2	52.575				x	x
Z ₉₇	171.019	1	171.019					x

Taula 11. Zones de les superposicions i afectació sobre aerogeneradors.

El càlcul d'impactes pels aerogeneradors 24 a 28 es resumeix en la taula següent:

	A_{equivalent}	N_d	N_d [Reals]
Aerogenerador 24	243.601	1,2667	1
Aerogenerador 25	161.715	0,8409	0,5
Aerogenerador 26	142.614	0,7416	0,375
Aerogenerador 27	161.178	0,8381	1,375
Aerogenerador 28	264.451	1,3751	0,75
Total		5,06	4
Mitjana		1,01	0,8

Taula 12. Càlcul d'impactes amb l'àrea equivalent i impactes reals

9.5 Línies elèctriques soterrades interiors dels parcs.

Les línies elèctriques soterrades que uneixen tots els aerogeneradors i que també són susceptibles de ser afectades per les descàrregues atmosfèriques, queden totes dins de les àrees de captació dels aerogeneradors, pel que podem descartar el càlcul en quedar "protegides" pels propis aerogeneradors. Abans d'arribar a impactar al terra i afectar a alguna línia soterrada d'interconnexió, el llamp acabarà impactant sobre l'estructura d'algun aerogenerador. El que si que caldrà estudiar són els possibles impactes en les línies elèctriques aèries d'Alta Tensió d'evacuació de l'energia del parc i de les línies de la xarxa de Transport a la que es connecten. En el cas del parc que ens ocupa, la subestació del parc està annexa a la subestació de transport a la que es connecta, pel que no existeix línia d'evacuació, i només ens quedarà l'estudi dels impactes en la xarxa de Transport. Un impacte en la xarxa de transport en un punt relativament proper al parc, pot provocar la desconexió de tot el parc. Aquest càlcul, queda fora de l'abast d'aquest treball.

10 Conclusions

Del treball realitzat es poden treure diverses conclusions interessants, ja que dels diversos càlculs i simulacions fetes, els resultats que s'obtenen son coherents amb els objectius del projecte.

En general, la base de dades utilitzada es coherent amb la teoria, la implementació del càlcul de la norma UNE no ha resultat problemàtica, el programari utilitzat es precís i la nova proposta de càlcul d'impactes s'ajusta molt més a la realitat observada i a l'estimació feta dels impactes reals

L'energia eòlica ha tingut un creixement molt important en els últims anys, construint cada vegada parcs eòlics més grans i aerogeneradors amb potències unitàries majors. El seu pes dins del mix energètic del sistema elèctric arriba al 20%, pel que la optimització de la operació dels parcs es molt important. El fenomen de les descàrregues atmosfèriques pot causar molts danys a les turbines eòliques, pel que caldrà protegir-se. En l'actualitat, es treballa molt en la protecció dels parcs i el creixement en altura, potència i prestacions dels aerogeneradors, fa que el problema sigui cada vegada més important. La naturalesa del fenomen, fa que no puguem eliminar el risc d'impacte, i tan sols ens quedi l'alternativa de l'estudi, predicció i protecció envers les descàrregues atmosfèriques.

La normativa actual contempla els nivells de protecció i les mesures de protecció a implementar en funció del número d'impactes que es poden esperar. En aquest sentit, la normativa considera l'estudi d'impactes per cada estructura individualment i aïllada i tots els aerogeneradors hauran de complir amb el nivell de protecció que els hi pertoqui. Dels resultats obtinguts en el parc objecte d'estudi, es comprova que l'estimació d'impactes que fa la norma UNE es conservadora i contempla més impactes dels que es calculen en la realitat. En aquest sentit, es considera que el marge de seguretat que ens dona el càlcul normatiu respecte la realitat observada es òptim i acceptable i que l'estudi fet no es suficient per concloure que el càlcul normatiu no es correcte i caldria estendre l'estudi amb una mostra més gran per validar-ho.

L'anàlisi de la base de dades de llamps que s'ha fet, demostra que la mostra utilitzada es fiable i coherent amb la teoria, ja que els percentatges que s'obtenen de llamps NT ó NN i els percentatges de polaritat de la càrrega d'aquests són esperables.

El sistema de detecció té les seves limitacions que principalment es la ubicació exacte de la descàrrega, que fa que hi hagi una sèrie de llamps que no es capaç de detectar si ha estat

un NT ó un NN. Tots aquests llamps indeterminats s'han exclòs de l'estudi per tal de simplificar la mostra i cenyir-se a dades reals i excloure aquesta incertesa.

El càlcul d'impactes per cada aerogenerador individualment que fa la norma UNE, dona el mateix número d'impactes per tots els aerogeneradors del parc i no contempla la ubicació relativa d'aquest dins del parc i la influència que puguin tenir els aerogeneradors veïns, pel que aquest càlcul es considera massa genèric.

No s'ha considerat la proposta de càlcul de la norma per tenir en compte l'altura relativa del terreny on s'ubica l'aerogenerador, ja que dona unes àrees de captació massa grans, resultats d'impactes massa elevats i esdevé un càlcul molt complexa.

La zona d'estudi s'ha escollit per la disponibilitat de dades del parc. Es coneixen les ubicacions dels 50 aerogeneradors del parc, el model, les dimensions i potència unitària de cada màquina. Tanmateix, les posicions dels aerogeneradors també surten en la cartografia del Institut Cartogràfic de Catalunya. Així doncs, es considera una bona zona d'estudi, ja que representa un parc típic al nostre país.

Dels càlculs realitzats, es comprova que els impactes que estima la norma UNE són molt superiors a les dades obtingudes a partir de la base de dades de llamps. Podem concloure, que l'estimació feta per la norma UNE no s'ajusta a la realitat observada. La proposta de càlcul considerant tota l'àrea del perímetre de captació del parc (plànol 3), ofereix uns resultats coincidents amb la realitat observada considerant la globalitat del parc, tal i com s'explica en aquest treball.

Per determinar sobre quin aerogenerador impactaran els llamps que queden en les zones d'influència de diversos aerogeneradors, ha estat necessari fer una hipòtesi i considerar que afecten sobre l'aerogenerador més proper, tot i que s'accepta que pot haver afectat als aerogeneradors veïns, fet que faria variar el número d'impactes a cada aerogenerador i explica les diferències entre el càlcul proposat i la realitat observada individualment per cada màquina. És important destacar que en el càlcul de la globalitat del parc i de tots els impactes registrats, els valors d'impactes totals i les mitjanes són coincidents.

En termes generals, podem concloure que el càlcul individual que proposa la normativa és conservador i coherent, pel que es vàlid, tot i que dista de la realitat observada. Es proposa una alternativa al càlcul, modificant la manera de calcular l'àrea de captació de cada aerogenerador, de manera que els nous càlculs, coincideixen amb les observacions realitzades. Individualment, caldria fer una proposta de càlcul més precisa per determinar sobre quin aerogenerador afecta cada impacte.

A partir del treball realitzat, queden diverses línies de treball futures que servarien per complementar i continuar el present projecte. En primer lloc, caldria validar els resultats obtinguts ampliant la mostra amb mes aerogeneradors i diversos parcs en altres localitzacions, per tal de poder acceptar la variació al càlcul i validar-la. És important repetir els càlculs amb una mostra prou significativa i amb la mateixa metodologia utilitzada i descrita en aquest treball.

Un altre de les línies de treball futures es determinar amb precisió els impactes reals sobre cadascun dels aerogeneradors. Aquest punt és molt important, ja que és la base de la comparativa i discussió dels càlculs que s'ha fet. En una primera instància s'ha calculat el número d'impactes reals a partir de la base de dades de les descàrregues dels últims anys i considerant que el llamp impactarà sobre l'aerogenerador que li quedi més proper. Aquest tipus de dades, tenen certa imprecisió, sobretot pel que fa a la localització del impacte, i això afecta alhora de determinar sobre quin aerogenerador pot afectar. En aquest sentit, seria important disposar de gravacions en vídeo d'alta velocitat per tal de determinar llamp a llamp on cau i sobre quin aerogenerador impacta. A partir de les gravacions en vídeo es podria determinar amb total certesa el número d'impactes reals de cada aerogenerador. Tanmateix, també seria molt interessant poder disposar de dades reals dels operadors del parc d'impactes, però els vídeos podrien donar una visió més global del comportament dels llamps quan les descàrregues queden en l'àrea d'influència de més d'un aerogenerador. Un cop validades i obtingudes aquestes dades, els càlculs realitzats serien molt més rigorosos i fiables.

Finalment, un valor important que afecta el càlcul que proposa la norma, és el valor N_g . Aquest valor s'obté de diverses fonts, però el càlcul per obtenir-lo pot variar bastant en funció de les dimensions de la malla que es considera. El valor de N_g utilitzat, és el que facilita el Servei Meteorològic de Catalunya i està fet amb una malla de 20 x 20 km. Si es calcula el valor de N_g per malles molt més petites, s'obté més precisió alhora de determinar el número d'impactes que es poden esperar per cada zona. El cas ideal, seria obtenir un valor N_g per a cada àrea d'influència dels aerogeneradors del parc i així afinar en l'estimació d'impactes anuals que fa la norma i poder-lo comparar amb la realitat observada.

Així doncs, podem concloure que seria convenient realitzar observacions amb vídeo per determinar els impactes reals i ajustar el valor de N_g per malles més petites i ajustades a les àrees de captació de cada aerogenerador i tornar-ne a fer la comparativa.

11 Referències

Norma UNE EN 62305-1 Protecció contra el llamp. Part 1: Principis Generals

Norma UNE EN 62305-2 Protecció contra el llamp. Part 2: Avaluació del risc.

Norma UNE EN 62305-2 Protecció contra el llamp. Part 3: Disseny físic d'estructures i risc humà

Norma UNE EN 62305-4 Protecció contra el llamp. Part 4: Sistemes Elèctrics i electrònics en estructures.

Norma UNE-EN 61400-24. Aerogeneradors. Part 24: Protecció contra el llamp

J.A. Martínez Velasco. *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*. 1ª Edición. Madrid: Mc Graw Hill, 2008. ISBN: 978-84-481-6697-7

J.L. Rodriguez Amenedo, J.C. Burgos Díaz, S. Arnalte Gómez. *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*. 1ª Edición. Madrid: Editorial Rueda, 2003. ISBN: 84-7207-139-1

M. Aguado, B. Hermoso, J. Pérez. *Evaluación del Tipo de Descargas en los Aerogeneradores para su Protección Contra el Rayo*. IEE Latin America Transactions, Vol.3, No 3, July 2005.

Berger K., R. B. Anderson, and H. Kröninger. *Parameters of lightning flashes*. Electra, no. 41, pp. 23–37, July 1975.

12 Plànols

Plànol 1. Situació.

Plànol 2. Descàrregues Elèctriques Atmosfèriques sobre el parc.

Plànol 3. Perímetre de captació del parc.

Plànol 4. Area de captació equivalent. Zona 1. Aerogeneradors 1 – 13.

Plànol 5. Area de captació equivalent. Zona 2. Aerogeneradors 24 – 28.

ANNEX

Llamps núvol – terra en l'àrea de captació del parc eòlic de Serra de Rubió

Període: 04/06/2007 – 31/05/2011

ID Llamp	UTM X	UTM Y	Data	Hora	Corrent (A)
1	382539,6564	4610956,566	20070806	64312,632	-10300
2	382717,2884	4611631,101	20070806	64353,747	-16400
3	382523,908	4611012,351	20070812	74700,463	-16800
4	384479,531	4613990,204	20070812	75296,721	-10100
5	383898,7744	4612578,073	20070812	75607,112	-10000
6	383756,2224	4613546,562	20070812	75712,633	-11600
7	383946,2878	4611910,974	20070812	75782,462	-10500
8	385995,0272	4613466,213	20070812	76109,056	-37600
9	386407,7169	4613759,512	20070812	76606,424	-21400
10	383936,4563	4612333,143	20080410	66841,298	7100
11	383907,2805	4612589,041	20080410	66924,288	-8900
12	386966,4413	4614339,271	20080516	66440,987	-24100
13	384491,1748	4613679,062	20080516	67537,018	-8700
14	385879,3552	4613523,579	20080516	67884,477	-4900
15	383450,1187	4614695,402	20080519	57480,235	3300
16	386717,2375	4614376,519	20080524	46985,573	7300
17	387452,737	4614553,73	20080611	59545,295	-8500
18	387018,8359	4614493,921	20080611	59621,753	-19400
19	386029,7398	4613554,505	20080611	59863,466	7000
20	386377,6422	4613437,932	20080611	60036,019	15400
21	386396,0512	4613548,694	20080611	60036,034	8100
22	386443,3019	4613903,319	20080611	60362,662	3900
23	386444,5323	4613981,037	20080611	60385,478	-7000
24	385361,5898	4613431,885	20080611	60407,265	-6400
25	386113,1686	4613564,285	20080611	60443,101	-9400
26	384855,3943	4614061,899	20080611	60443,279	-4000
27	383603,5895	4614404,165	20080611	61531,91	-5900
28	383453,8666	4612363,175	20080611	61540,22	-5100
29	383097,4637	4611447,211	20080611	62709,535	-5500
30	383207,5312	4611556,475	20080611	62913,121	6600
31	383956,9486	4612055,174	20080611	63336,1	4100
32	387366,1833	4614344,087	20080611	63897,329	-18900
33	386227,081	4613395,897	20080616	59077,754	-7800
34	385272,4768	4613066,83	20080627	15241,633	-14200
35	384720,4147	4613953,012	20080822	77234,369	6500
36	386825,2781	4614363,708	20080822	77454,312	-10000
37	384523,3	4614122,765	20080822	78729,341	-5500
38	385085,7839	4613369,665	20080831	58041,054	-10300
39	384548,6642	4613111,757	20080911	79668,129	-19400
40	387474,7478	4614364,594	20090418	62006,796	-6500
41	383511,4809	4614372,344	20090625	53201,052	-4600
42	383535,7321	4611762,147	20090625	53969,952	3900
43	382412,04	4611302,928	20090625	68161,862	-24500
44	382420,5498	4611313,894	20090625	68161,969	-15100
45	383019,6191	4611270,79	20090625	68425,328	-9100
46	383978,8788	4611866,026	20090707	3055,205	-7800
47	385346,0036	4613498,767	20090707	5460,585	-9000
48	385866,4142	4613756,999	20090707	5587,357	7700
49	383848,2851	4614089,243	20090707	5587,375	-7900
50	384961,3944	4612883,018	20090707	5587,411	-18600
51	385415,0801	4613131,184	20090714	82215,083	-13700
52	384746,1028	4613997,021	20090714	82215,16	-5100
53	386437,0864	4614036,682	20090714	82357,294	-4300
54	387336,2	4614555,56	20090714	82935,498	-4400
55	385700,1018	4613248,797	20090721	73677,07	-15100
56	383506,4627	4613550,614	20090722	16024,111	19400
57	383543,1886	4613761,023	20090912	50212,939	6700
58	383350,725	4611654,096	20090917	86270,789	-13600
59	383283,1797	4612110,521	20100425	55385,474	12200
60	384317,0627	4613726,29	20100425	55565,77	19700
61	383850,2534	4612667,703	20100425	55691,964	31800
62	382570,2712	4611300,338	20100613	63471,606	9700
63	383308,7022	4612143,423	20100613	63471,628	-21100
64	383213,1495	4611389,8	20100616	70963,27	-71900

65	383281,3741	4611999,495	20100616	70963,319	-26300
66	384178,4043	4613906,216	20100616	71167,607	-8700
67	383486,927	4613373,242	20100616	71231,705	-34200
68	383563,6959	4612972,196	20100616	71231,716	-14500
69	383686,5597	4613358,897	20100616	71231,724	-10000
70	383636,0662	4613326,399	20100616	71231,757	-15700
71	383264,6669	4613532,333	20100616	71258,571	9700
72	382972,7281	4611460,349	20100616	71288,801	-9800
73	383799,3964	4612612,998	20100616	71340,481	-21900
74	384705,309	4613531,246	20100616	71340,582	-7300
75	383580,3479	4612971,926	20100616	71369,586	-21700
76	384651,6084	4613298,894	20100616	71401,649	-11000
77	384734,1508	4613253,146	20100616	71531,23	-12600
78	384555,9893	4613566,964	20100616	71531,234	8900
79	386361,8124	4614015,663	20100616	71531,336	-25900
80	386117,5752	4613841,85	20100616	71626,355	-10700
81	383762,9802	4612935,648	20100616	74183,186	-13400
82	383691,5131	4612636,957	20100616	74183,251	-10600
83	383769,1481	4612802,282	20100616	74183,41	-8700
84	383328,6299	4611832,144	20100616	74560,403	12900
85	385833,6442	4613790,837	20100616	74904,045	-6300
86	386149,1568	4613208,341	20100628	62544,904	-10500
87	385605,8646	4613083,718	20100628	63794,47	-7600
88	383283,6387	4614698,11	20100628	65925,513	19300
89	383937,6408	4614465,385	20100628	66043,201	8700
90	383851,1091	4614777,741	20100628	66162,731	8900
91	382580,7534	4610922,577	20100628	66948,273	5300
92	383305,8386	4611454,926	20100628	67056,523	6300
93	383649,5731	4614159,097	20100629	68358,959	-5600
94	385916,0112	4613733,999	20100629	68677,578	-5900
95	385631,727	4613138,833	20100629	68703,002	6500
96	385649,4402	4613205,183	20100629	68703,01	-5600
97	383910,0953	4614821,208	20100802	76861,133	-10700
98	383473,1062	4614572,868	20100802	77128,948	5400
99	386084,1381	4613309,322	20100802	77363,755	-17900
100	386011,5015	4613454,846	20100802	77363,887	-18500
101	386093,1688	4613353,6	20100802	77363,952	-9500
102	383505,8462	4611973,637	20100812	69947,701	12700
103	383347,7399	4613519,876	20100812	71616,788	6600
104	385259,3764	4613289,148	20100819	60962,814	-18900
105	383204,4427	4611878,585	20100819	79234,153	-9100
106	383491,6799	4612640,199	20100917	69782,579	-26400
107	383498,5302	4613062,098	20100917	69782,602	-8600
108	383362,9062	4614452,498	20100917	71466,128	-9500
109	383434,3962	4614240,329	20100917	71466,179	-16700
110	383353,8783	4613897,366	20100917	71466,382	-8000
111	387100,5044	4614392,686	20100917	73015,325	-11700
112	387016,3872	4614338,484	20100917	73015,343	-13900
113	386991,7641	4614361,083	20100917	73015,36	-17100
114	383823,311	4614089,647	20100917	73015,382	-16600
115	386991,5892	4614349,98	20100917	73015,398	-18400
116	387050,5588	4614393,473	20100917	73015,418	-18200
117	386607,5172	4613756,351	20100917	73015,452	-8300
118	384299,4303	4614181,901	20100917	73814,478	-9200
119	384341,5903	4614214,537	20100917	73814,524	-8100
120	385840,0474	4613146,62	20100917	76797,468	-17200
121	386347,8586	4613660,512	20100917	76797,542	-9300
122	386871,8966	4614151,97	20100917	76797,758	-16900
123	382523,7263	4611001,249	20100917	77290,06	-11600
124	387199,6971	4614346,704	20101010	13986,149	-13900
125	386841,0508	4614307,932	20110327	22125,471	11600
126	387249,8175	4614357,021	20110327	22126,082	-16200
127	384166,5957	4614206,256	20110426	70357,44	-7500
128	383092,2099	4611636,091	20110426	71543,579	63700
129	382898,8622	4611017,332	20110426	71677,831	11100