

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria Industrial

Títol: Projecte de l'evacuació de l'energia generada per un parc eòlic mitjançant una subestació i línia aèria d'Alta Tensió de 110 kV

Document: Annexos

Alumne: Judit Turró Martí

Tutor: Jordi Comas Baron

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria de la Construcció

Convocatòria (mes/any): juny 2020

ÍNDIX

A	Càlcul energia a evacuar.....	8
A.1.1	Distribució de Weibull.....	8
A.1.2	Resultats.....	10
A.1.3	Corba de potència.....	13
B	Càlculs justificatius subestació transformació.....	16
B.1	Càlcul embarrats.....	16
B.1.1	Embarrat de 110 kV.....	16
B.2	Distàncies mínimes en embarrats estesos.....	17
B.3	Xarxa de terres inferiors.....	17
B.3.1	Criteris de càlcul.....	17
B.3.2	Disseny de la malla de terra.....	20
B.3.3	Resistència posta a terra.....	21
B.3.4	Intensitat de defecte a terra.....	21
B.3.5	Avaluació de tensions de pas i contacte.....	23
B.4	Xarxa de terres superiors.....	27
B.4.1	Edifici de control.....	27
B.5	Estudi acústic de la subestació de transformació a 110 kV.....	28
B.5.1	Objectius de qualitat acústica.....	28
B.5.2	Índex de soroll.....	30
B.5.3	Resultats experimentals.....	30
B.6	Estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de contaminació electromagnètica de la subestació de transformació a 110 kV.....	34
B.7	Camps elèctrics i magnètics sota la línia.....	35
B.7.1	Camp magnètic sota la línia.....	36
B.7.2	Restriccions bàsiques i nivells de referència del Reial Decret 1066/2001 ...	38
B.7.3	Restriccions bàsiques.....	39
B.7.4	Nivells de referència.....	42
B.7.5	Nivells de camp.....	43

B.7.6	Resultats experimentals.....	44
C	Càlculs elèctrics de la línia aèria.....	46
C.1	Intensitat màxima admissible	47
C.2	Potència màxima a transportar.....	48
C.3	Resistència elèctrica	48
C.4	Reactància.....	49
C.5	Caiguda de tensió	52
C.6	Pèrdua de potència	52
C.7	Efecte corona.....	53
C.8	Susceptància	56
C.9	Posada a terra dels suports.....	57
C.9.1	Classificació dels suports segons la seva ubicació.....	57
C.9.2	Línia de terra.....	58
C.9.3	Elèctrode de posada a terra	58
C.9.4	Dimensionament de la posada a terra respecte a la resistència tèrmica	58
C.9.5	Dimensionament de la posada a terra respecte a la seguretat de les persones	59
C.9.6	Dimensionament de la posada a terra respecte a protegir contra els efectes dels llamps.....	59
D	Càlculs mecànics línia elèctrica	62
D.1	Càrregues permanents.....	62
D.2	Forces del vent sobre la línia aèria.....	62
D.3	Forces del vent sobre les cadenes d'aïlladors	62
D.4	Sobrecàrregues motivades pel gel	63
D.5	Distàncies de seguretat, creuament i paral·lelismes.....	63
D.5.1	Distàncies dels conductors al terreny	63
D.5.2	Distàncies entre conductors i accessoris en tensió a suports	64
D.5.3	Distàncies entre conductors	64
D.5.4	Distància entre conductors i parts posades a terra.....	67
D.5.5	Distàncies al terreny, camins, sendes i cursos d'aigua no navegables.....	68

D.5.6	Distàncies a altres línies elèctriques aèries o línies de telecomunicació.....	69
D.5.7	Distàncies a carreteres.....	70
D.5.8	Distàncies a ferrocarrils electrificats i tramvies	71
D.5.9	Distàncies a telefèrics i cables transportats.....	71
D.5.10	Distàncies a rius, navegables o flotables	71
D.5.11	Distàncies en boscos, arbres i masses d'arbrat	72
D.5.12	Distàncies en edificis, construccions i zones urbanes.....	73
D.6	Mètode càlcul mecànic.....	75
D.6.1	Equacions de la catenària	75
D.6.2	Equacions de canvi de condicions	76
D.6.3	Equació del càlcul de la fletxa	77
D.6.4	Forces i fletxes per a cada tram	81
D.7	Hipòtesis de càlcul dels esforços dels suports.....	92
D.7.1	Desequilibri de traccions	94
D.7.2	Esforços longitudinals per trencament de conductors	95
D.7.3	Esforços en els suports.....	97
D.8	Estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de la contaminació electromagnètica de la derivació de la línia aèria de 110 kV	98
E	Càlcul justificatiu subestació de seccionament	99
E.1	Càlcul mecànic d'embarrats rígids.....	99
E.1.1	Hipòtesis de disseny	99
E.1.2	Condicions de la instal·lació	100
E.2	Càlcul mecànic de l'embarrat principal en 110 kV	101
E.2.1	Corrent de curtcircuit.....	101
E.2.2	Tensió en el tub	102
E.2.3	Reaccions sobre aïlladors suport	106
E.2.4	Fletxa en el tub	107
E.2.5	Allargament de l'embarrat	108
E.2.6	Esforç tèrmic en curtcircuit	108

E.2.7	Intensitat nominal de les barres.....	109
E.3	Càlcul de l'efecte corona.....	110
E.3.1	Càlcul de la tensió disruptiva.....	110
E.4	Determinació de les distàncies mínimes en embarrats estesos.....	112
E.4.1	Hipòtesis de disseny	112
E.4.2	Desplaçament del vol amb vent	113
E.4.3	Efecte en conductors per corrent de curtcircuit	114
E.4.4	Força de tensió per oscil·lació durant el curtcircuit.....	118
E.4.5	Aproximació de conductors	119
E.4.6	Distància mínima.....	121
E.5	Xarxa de terres inferiors	122
E.6	Xarxa de terres superiors	122
E.6.1	Posició parc intempèrie.....	122
E.6.2	Edifici de control.....	123
E.7	Estudi acústic de la subestació de seccionament a 110 kV	126
E.7.1	Resultats experimentals.....	126
E.8	Camps elèctrics i magnètics sota la línia.....	128
E.8.1	Càlcul del camp electromagnètic B, al punt més desfavorable de la caseta de control de la Subestació de Seccionament a 110 kV	128

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Gràfica x vs y	11
Figura 2. Corba de potència	13
Figura 3. Gràfica per determinar el factor de reducció Sf	22
Figura 4. Evolució temporal en dB a 11,19 metres del transformador	31
Figura 5. dB a 1/3 d'octava a 11,19 metres dels transformador.....	31
Figura 6. Evolució temporal en dB a 16 metres del transformador	32
Figura 7. dB a 1/3 d'octava a 16 metres dels transformador.....	32
Figura 8. Evolució temporal en dB a 20,5 metres del transformador	33
Figura 9. dB a 1/3 d'octava a 20,5 metres dels transformador.....	33
Figura 10. Resultats experimentals a 10 i a 15 metres del transformador	45
Figura 11. Disposició de la creueta	50
Figura 12. Disposició de la rasa	59
Figura 13. Disposició de les varetes.....	60
Figura 14. Condicions de les hipòtesis que limiten la tracció màxima admissible	63
Figura 15. Mapa geogràfic.....	124
Figura 16. Paràmetres pel càlcul de "b".....	124
Figura 17. Càlcul de "c".....	125
Figura 18. Evolució temporal en dB en el pòrtic a 9,5 metres.....	127
Figura 19. dB a 1/3 d'octava en el pòrtic a 9,5 metres	127
Figura 20. Angle entre la línia de 110 kV i la caseta de control	128

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Classificació de velocitats i valor de y i x	10
Taula 2. Probabilitat que hi hagi vent a cada rang.....	12
Taula 3. Energia a evacuar del parc eòlic.....	14
Taula 4. Energia a evacuar i hores equivalents	15
Taula 5. Característiques conductor 402-AL1/52-ST1A.....	16
Taula 6. Valors generals de disseny.....	18
Taula 7. Paràmetres pel disseny de la malla de terra	20
Taula 8. Objectius de qualitat acústica pel soroll aplicables a àrees urbanitzades existents	29
Taula 9. Restriccions bàsiques per camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz a 300 GHz)	40
Taula 10. Nivells de referència per a camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz - 300 GHz)	43
Taula 11. Característiques Generals	46
Taula 12. Característiques conductor 242-AL1/39-ST1A (LA-280)	46
Taula 13. Mides de la creueta	50
Taula 14. Valors obtinguts.....	51
Taula 15. Valors dels paràmetres per la pèrdua de potència	53
Taula 16. Requisits del sistema de posada a terra	57
Taula 17. Tensió de contacte aplicada admissible en funció de la durada del corrent de falla.....	60
Taula 18. Valors del coeficient K en funció de l'angle d'oscil·lació.....	64
Taula 19. Paràmetre K en funció de les hipòtesis.....	66
Taula 20. Condicions de fletxa màxima segons el reglament	66
Taula 21. Separació dels conductors en funció de les hipòtesis considerades pel reglament.....	67
Taula 22. Distàncies mínimes que indica el reglament	74
Taula 23. Dades del conductor que s'introdueixen a la plantilla de l'Excel.....	78
Taula 24. Dades sobre els suports introduïdes a la plantilla de Excel	80
Taula 25. Forces horitzontals per no sobrepassar en cap punt una força de 2.829,67 daN	81
Taula 26. Forces horitzontals per no sobrepassar un terç de la càrrega de trencament ni un 15% de la càrrega a -5°C a 140 km/h	81
Taula 27. Zona A a 15°C per aconseguir una EDS<15%	82
Taula 28. Zona A Vent (140 km/h) a -10°C.....	82

Taula 29. Zona A a -15°C.....	82
Taula 30. Vent 140 km/h + 15°C.....	83
Taula 31. Pes propi a 0°C	83
Taula 32. Pes propi a 5°C	83
Taula 33. Pes propi a 10°C	84
Taula 34. Pes propi a 20°C	84
Taula 35. Pes propi a 25°C	84
Taula 36. Pes propi a 30°C	85
Taula 37. Pes propi a 35°C	85
Taula 38. Pes propi a 40°C	85
Taula 39. Pes propi a 45°C	86
Taula 40. Pes propi a 50°C	86
Taula 41. Pes propi a 85°C	86
Taula 42. Tram Pòrtic 1 - Suport 1	87
Taula 43. Tram Suport 1-Suport 2.....	88
Taula 44. Tram Suport 2- Suport 3.....	89
Taula 45. Tram Suport 3 - Suport 4.....	90
Taula 46. Tram Suport 4 - Pòrtic 2	91
Taula 47. Hipòtesis dels suports en suspensió o amarratge en Zona A.....	92
Taula 48. Hipòtesis dels suports d'ancoratge o final de línia en Zona A	93
Taula 49. Tipus de suports a la instal·lació.....	93
Taula 50. Esforç de trencament aplicable en funció del nombre de conductors per fase .	95
Taula 51. Esforç de trencament aplicable en funció del nombre de conductors per fase .	96
Taula 52. Esforços en els suports segons Hipòtesis 1 (Vent 140 km/h -5°C).....	97
Taula 53. Esforços en els suports segons Hipòtesis 3 (Desequilibri de traccions)	97
Taula 54. Esforços en els suports segons Hipòtesis 4 (Trencament de conductors)	97
Taula 55. Característiques tub de 120/100 mm de diàmetre	99
Taula 56. Geometria i condicions d'ancoratge en els vols més desfavorables.....	99
Taula 57. Característiques del tub 120/100	100
Taula 58. Característiques aïlladors C6-650.....	101
Taula 59. Distància i angle de la línia de simple circuit amb la caseta	129
Taula 60. Resultats de Bx/A per cada línia.....	129
Taula 61. Mòdul i angle de la intensitat per cada fase	129
Taula 62. Camp magnètic en T per a cada línia	129

A CÀLCUL ENERGIA A EVACUAR

A.1.1 Distribució de Weibull

Per saber l'energia que s'ha d'evacuar dels aerogeneradors es calculen els paràmetres de l'equació de distribució de Weibull, que són els següents:

- c : en m/s. Determina la velocitat mitjana del vent en el lloc d'estudi.
- k : Indica el grau de dispersió dels registres.

Amb aquests dos paràmetres es pot establir la freqüència amb la qual es manifesta una velocitat determinada del vent, establerta per la equació (1) i és coneguda per la distribució de la velocitat del vent de Weibull (Silva, 2002).

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Per determinar els paràmetres de l'equació de Weibull, s'utilitza l'ajust de mínims, que correspon a l'equació de probabilitat de Weibull. Es pot observar a l'equació (2).

$$p(v \geq v_i) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Per aïllar els paràmetres c i k s'utilitza el mètode de regressió lineal. Es pot observar a l'equació (3), (4), (5) i (6).

$$y_i = \text{Ln}[-\text{Ln}(1 - p_i)] \quad (3)$$

$$x_i = \text{Ln}(v_i) \quad (4)$$

$$a = -k \text{Ln}(c) \quad (5)$$

$$b = k \quad (6)$$

Les mesures obtingudes a partir d'un equip de detecció sònica (SODAR) es donen de la següent manera:

- Any, dia i hora
- Mesura del vent (m/s) a 40, 60, 80, 100, 120, 130 m d'alçada

Com que a alçades molt altes moltes vegades la mesura del vent dona 0, es va decidir agafar una alçada de 60 m per poder trobar la distribució de Weibull més acuradament.

El procediment que s'ha seguit és el següent:

1. Es separen les dades de vent (m/s) a 60 m d'alçada en un Excel a part.
2. Es treuen les mesures que siguin 0 ja que això vol dir que el dispositiu, pel motiu que sigui, no agafava la mesura del vent. D'aquesta manera els resultats no es distorsionaran.
3. Es classifiquen les dades per rangs de 1 (m/s). Per fer-ho més dinàmic, es fa amb la comanda de CONTAR.SI().
4. Un cop trobada la freqüència en valor absolut de cada rang es calcula el percentatge de cada rang.

$$\text{Freqüència (\%)} = \frac{\text{Número de vegades que el valor es troba en el rang}}{\text{Total de mesures}}$$

5. Un cop trobada la freqüència en % es calcula y i x segons les equacions (3) i (4), respectivament.
6. Es representa una gràfica amb els valors de x a l'eix d'abscisses i els valors de y a l'eix d'ordenades.
7. Es troba l'equació de primer grau de la gràfica representada ($y=bx+a$) i a partir de les equacions (5) i (6) es troba el valor de k i c.

D'aquesta manera, s'han pogut trobar els paràmetres de Weibull a partir de les dades de vent d'un any.

A.1.2 Resultats

A la Taula 1 es pot observar la classificació que s'ha realitzat de les velocitats a partir de les dades de vent d'un any. L'escala fa referència al rang. Si és Escala 1 significa un rang entre 0 m/s i 1 m/s. També es pot observar el valor de y i x per cada escala que s'ha calculat amb les equacions (3) i (4).

Taula 1. Classificació de velocitats i valor de y i x

Escala (m/s)	Número de Dades	Freqüència (%)	y	x
1,0	615	1,260%	-4,3679	0,0000
2,0	2613	5,353%	-2,6822	0,6931
3,0	3638	7,452%	-1,8867	1,0986
4,0	4412	9,038%	-1,3367	1,3863
5,0	5454	11,172%	-0,8682	1,6094
6,0	5131	10,511%	-0,5210	1,7918
7,0	4039	8,274%	-0,2793	1,9459
8,0	3186	6,526%	-0,0987	2,0794
9,0	2741	5,615%	0,0541	2,1972
10,0	2576	5,277%	0,1989	2,3026
11,0	2297	4,705%	0,3319	2,3979
12,0	2375	4,865%	0,4774	2,4849
13,0	2144	4,392%	0,6208	2,5649
14,0	1699	3,480%	0,7484	2,6391
15,0	1447	2,964%	0,8735	2,7081
16,0	1147	2,350%	0,9907	2,7726
17,0	903	1,850%	1,1028	2,8332
18,0	655	1,342%	1,2034	2,8904
19,0	452	0,926%	1,2895	2,9444
20,0	336	0,688%	1,3692	2,9957
21,0	319	0,653%	1,4673	3,0445
22,0	217	0,445%	1,5588	3,0910
23,0	147	0,301%	1,6453	3,1355
24,0	91	0,186%	1,7203	3,1781
25,0	47	0,096%	1,7721	3,2189
26,0	46	0,094%	1,8399	3,2581
27,0	37	0,076%	1,9207	3,2958
28,0	22	0,045%	1,9963	3,3322
29,0	18	0,037%	2,1079	3,3673
30,0	8	0,016%	2,2177	3,4012
31,0	3	0,006%	2,3128	3,4340
32,0	2	0,004%		

A la Figura 1 es pot observar la representació gràfica de x a l'eix de les abscisses i la y a l'eix d'ordenades. Els valors de y i x es poden observar a la Taula 1.

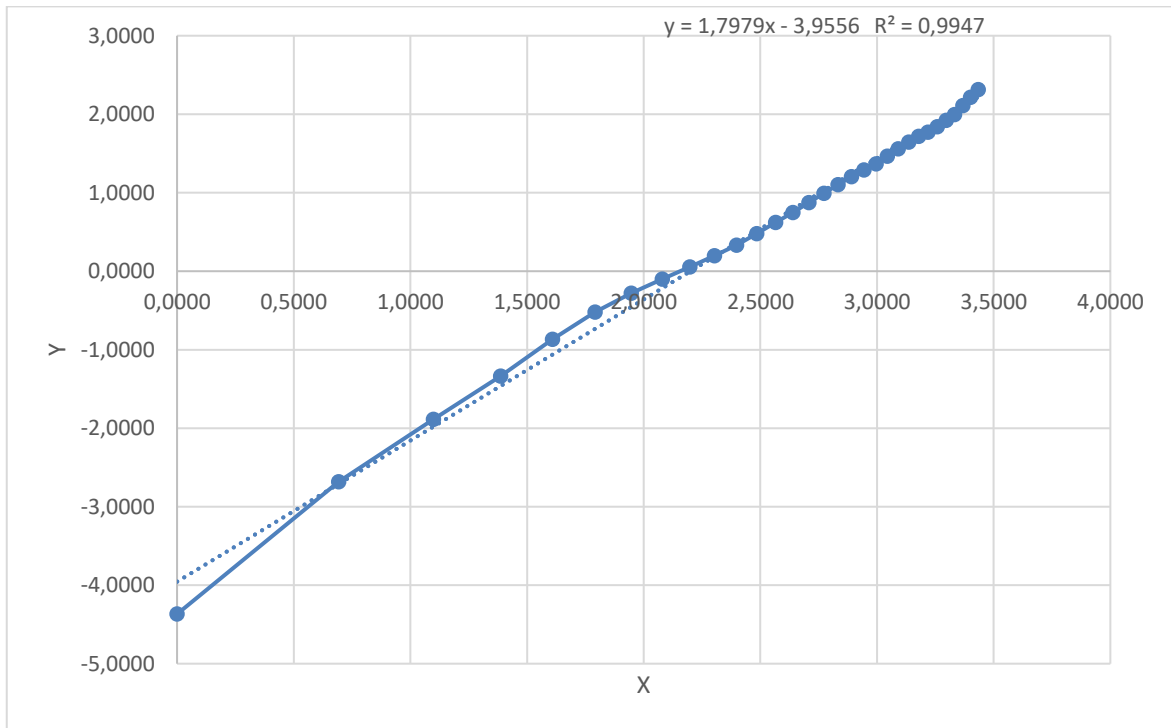


Figura 1. Gràfica x vs y

Tal i com es pot observar a la Figura 1, l'equació de primer grau de la gràfica representada és:

$$y = 1,7979 \cdot x - 3,9556$$

Per tant:

$$b = k = 1,7979$$

$$c = e^{\frac{a}{-k}} = e^{\frac{-3,9556}{-1,79,79}} = 9,02 \text{ m/s}$$

A partir de l'equació (2) es pot trobar la probabilitat que el vent sigui superior a un vent en concret, i per tant, es pot trobar la probabilitat que el vent es trobi en un rang en concret.

A la Taula 2 es pot observar la probabilitat que hi ha que el vent estigui en un rang en concret.

Taula 2. Probabilitat que hi hagi vent a cada rang

RANG		
Inici (m/s)	Final (m/s)	% entre cada rang
0	1	18,06%
1	2	14,80%
2	3	12,13%
3	4	9,94%
4	5	8,14%
5	6	6,67%
6	7	5,47%
7	8	4,48%
8	9	3,67%
9	10	3,01%
10	11	2,46%
11	12	2,02%
12	13	1,65%
13	14	1,36%
14	15	1,11%
15	16	0,91%
16	17	0,75%
17	18	0,61%
18	19	0,50%
19	20	0,41%
20	21	0,34%
21	22	0,28%
22	23	0,23%
23	24	0,18%
24	25	0,15%
25	26	0,12%
26	27	0,10%
27	28	0,08%
28	29	0,07%
29	30	0,06%
30	31	0,05%
31	32	0,04%
32		0,17%

Tal i com es pot observar a la Taula 1 i la Taula 2, les freqüències que es troben amb les dades de vent d'un any i les freqüències aconseguides per Weibull no coincideixen.

Per tant, s'arriba a la conclusió que les dades de vent obtingudes durant un any no es poden ajustar a l'equació de Weibull. Per poder trobar l'energia a evacuar del parc eòlic, s'utilitzaran les freqüències reals obtingudes a partir de les dades de vent durant un any, ja que es considera que s'ajusten més a la realitat.

A.1.3 Corba de potència

A partir de la corba de potència del model SG3.4-132 de la marca SIEMENS GAMESA que es mostra a la Figura 2 es pot saber l'energia que s'evacuarà en el parc eòlic en un any. La corba de potència està dissenyada fins a una velocitat de vent de 25 m/s. Per tant, s'utilitzaran les dades de vent fins a 25 m/s.

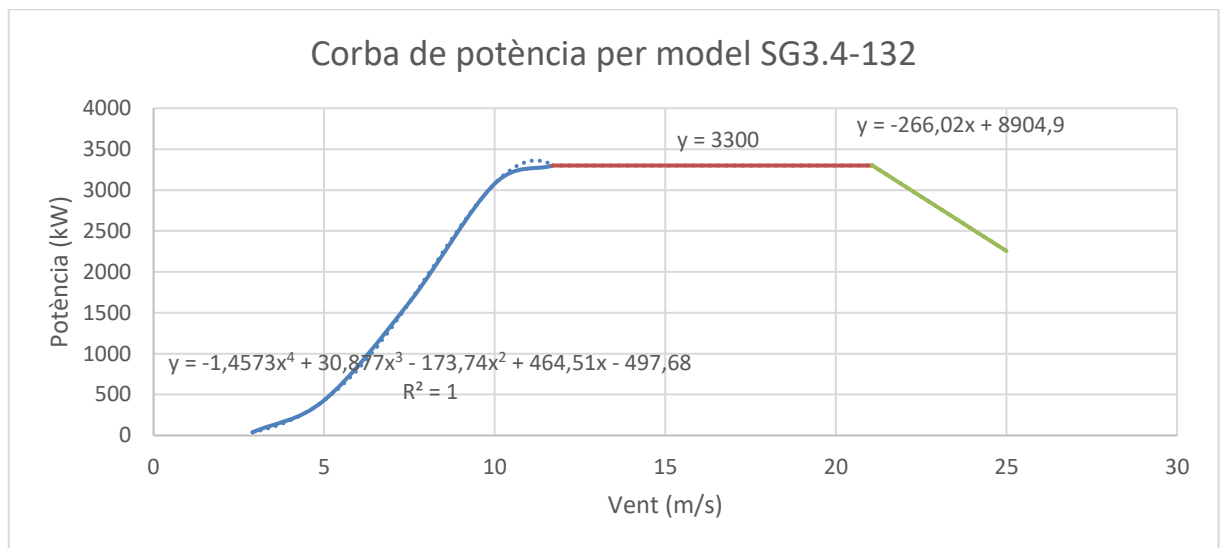


Figura 2. Corba de potència

Al l'equació (7) es pot observar les equacions que s'utilitzen per cada velocitat de vent en m/s.

$$\begin{cases} 0, & 0 < x \leq 3 \\ -1,4573x^4 + 30,877x^3 - 173,74x^2 + 464,51x - 497,68, & 3 < x \leq 11,69 \\ 3300, & 11,69 < x \leq 21,07 \\ -266,02x + 8904,9, & 21,07 < x \leq 25 \end{cases} \quad (7)$$

A la Taula 3 es pot observar l'energia a evacuar.

Per calcular les hores que hi haurà en un any en un cert rang, es calcula segons l'equació (8).

$$\text{Hores durant un any} = \text{Freqüència} \cdot 365 \text{ dies} \cdot 24 \frac{\text{hores}}{\text{dia}} \quad (8)$$

Per calcular l'energia en MWh, s'utilitzen les equacions de la Figura 2 per cada rang i llavors es multiplica per les hores trobades amb l'equació (8).

Per calcular l'energia entre cada rang, s'utilitza l'equació de la corba de potència en funció del rang de velocitats que s'estigui calculant. Com que s'està calculant l'energia a evacuar d'un rang de velocitats, la velocitat que s'introdueix a l'equació de la corba de potència és una mitjana, tal i com es pot observar a l'equació (9).

$$Velocitat\ del\ rang = \frac{Final - Inici}{2} \quad (9)$$

Taula 3. Energia a evacuar del parc eòlic

RANG		Freqüència	Hores durant un any	Energia (MWh)
Inici (m/s)	Final (m/s)			
0	1	1,26%	110,36	0,00
1	2	5,35%	468,89	0,00
2	3	7,45%	652,82	0,00
3	4	9,04%	791,71	83,09
4	5	11,17%	978,70	284,27
5	6	10,51%	920,74	557,17
6	7	8,27%	724,78	767,79
7	8	6,53%	571,71	931,05
8	9	5,61%	491,86	1108,20
9	10	5,28%	462,25	1312,10
10	11	4,71%	412,19	1341,77
11	12	4,87%	426,18	1406,41
12	13	4,39%	384,73	1269,61
13	14	3,48%	304,88	1006,10
14	15	2,96%	259,66	856,87
15	16	2,35%	205,82	679,22
16	17	1,85%	162,04	534,73
17	18	1,34%	117,54	387,87
18	19	0,93%	81,11	267,66
19	20	0,69%	60,29	198,97
20	21	0,65%	57,24	188,90
21	22	0,44%	38,94	124,04
22	23	0,30%	26,38	77,01
23	24	0,19%	16,33	43,33
24	25	0,10%	8,43	20,14

A la Taula 4 es pot observar l'energia que s'evacuarà del parc eòlic així com les hores equivalents. Les hores equivalents és el concepte de quantes hores hauria de funcionar l'aerogenerador a potència nominal (100%) per produir el total de l'energia anual. Les hores equivalents es calculen segons l'equació (10).

$$\text{Hores equivalents} = \frac{\text{Energia un aerogenerador (MWh)}}{\text{Potència nominal (MW)}} \quad (10)$$

Taula 4. Energia a evacuar i hores equivalents

Total Energia un aerogenerador (MWh)	13446,31
Total Energia 9 aerogeneradors (MWh)	121016,78
Hores equivalents	3880,61
Hores equivalents restant les pèrdues	3705,98

Les pèrdues que s'han considerat són un 3% de pèrdues del transformador i 1,5% de pèrdues per caiguda de tensió.

Per tant, el parc eòlic amb 9 aerogeneradors evacuarà una energia de 121016,78 MWh.

B CÀLCULS JUSTIFICATIUS SUBESTACIÓ TRANSFORMACIÓ

Es realitzaran els càlculs justificatius per a la subestació de transformació.

Els apartats següents de la subestació de transformació s'aplicaran també per la subestació de seccionament.

B.1 Càlcul embarrats

Els embarrats a instal·lar en aquesta subestació correspondran amb el sistema 25/110 kV.

B.1.1 Embarrat de 110 kV

Els embarrats seran de tipus flexible que estarà format per un conductor 402-AL1/52-ST1A (LA-455 CONDOR) i les característiques es poden observar a la Taula 5.

Taula 5. Característiques conductor 402-AL1/52-ST1A

Diàmetre	27,72 mm
Secció del conductor	454,58 mm ²
Nº i diàmetre de fils Alumini	54 fils de 3,08 mm ²
Nº i diàmetre de fils acer	7 fils de 3,08 mm ²
Intensitat admissible	806 A

Tenint en compte que el conductor LA-455 admet una intensitat màxima permanent de 806 A, s'obtindrà una potència nominal de:

$$P = \sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV} \cdot 806 \text{ A} = 153,56 \text{ MVA}$$

Tal i com es pot observar, els valors calculats són superiors a les potències a instal·lar.

No obstant, l'ocupació d'aquests conductors es justifica per la configuració física adoptada que correspon a un tipus de subestació normalitzada per majors intensitats i potències de curtcircuit.

B.2 Distàncies mínimes en embarrats estesos

El càlcul per trobar les distàncies mínimes dels embarrats estesos es pot observar a l'apartat E.4. Determinació de les distàncies mínimes en embarrats estesos, ja que al ser la Subestació de Transformació de 25/110 kV igual que la subestació de seccionament, els càlculs de les distàncies mínimes seran els mateixos.

A continuació es pot observar les distàncies pel parc de 110 kV de la subestació de transformació.

- Entre eixos d'aparellatge i esteses.....	2.800 mm.
- Entre eixos d'aparellatge de barres principals.....	2.800 mm.
- Amplada de posició.....	9.750 mm.
- Alçada d'embarrats alts.....	7.000 mm.
- Alçada d'embarrats d'interconnexió entre aparells	4.300 mm.
- Alçada de sortida de línia	11.000 mm.
- Amplada de vials accés trafos.....	3.500 mm.
- Amplada de vial accés edifici	3.500 mm.
- Amplada de vial perimetral.....	3.500 mm.

B.3 Xarxa de terres inferiors

B.3.1 Criteris de càlcul

Per al càlcul de la xarxa de terres inferiors es tindran en compte els valors màxims de tensions de pas i contacte que estableix el reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en instal·lacions elèctriques d'alta tensió, en el seu article MIE-RAT 13, així també com la norma IEEE-80-2000: "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding".

Els valors generals de disseny que s'utilitzaran per trobar les tensions de pas i contacte màxims admissibles es poden observar a la Taula 6.

Taula 6. Valors generals de disseny

Resistivitat del terreny	$\rho = 100 \Omega \cdot m.$
Resistivitat de la capa superficial (grava)	$\rho_s = 3.000 \Omega \cdot m.$
Intensitat monofàsica de curtcircuit	$I_0 = 31.500 A.$
Durada del defecte a terra	$t_s = 0,5 s.$
Temperatura ambient de disseny	$T_a = 40 ^\circ C$
Espessor capa superficial	$h_s = 0,15 m.$
Profunditat malla de terra	$h = 0,8 m.$
Profunditat de referència de la malla	$h_0 = 1 m.$

Segons l'apartat 1.1 del MIE-RAT 13, la tensió de pas es calcula segons l'equació (11).

$$U_p = 10 \cdot U_{ca} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot R_{a1} + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s}{1.000} \right] \quad (11)$$

On:

- U_{ca} és el valor admissible de la tensió de contacte aplicat. Segons la Taula 1 de l'apartat 1.1 del ITC-RAT 13, per 0,5 s de falta, el valor admissible de la tensió de contacte aplicat és de 204 V.
- R_{a1} és la resistència equivalent del calçat. Es suposa una resistència de 2.000 Ω .
- C_s és el coeficient reductor de la resistivitat de la capa superficial. El càlcul es realitza segons l'equació (12).
- ρ_s és la resistivitat de la capa superficial. Es suposa un valor de 3.000 $\Omega \cdot m$.

$$C_s = 1 - 0,106 \cdot \left(\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2 \cdot h_s + 0,106} \right) \quad (12)$$

On:

- h_s és l'espessor de la capa superficial, en m. Es suposa un valor de 0,15 m.
- ρ és la resistivitat del terreny natural. Es suposa un valor de 100 $\Omega \cdot m$.

Per tant, el coeficient reductor de la resistivitat de la capa superficial és el següent:

$$C_s = 1 - 0,106 \cdot \left(\frac{1 - \frac{100 \Omega \cdot m}{3.000 \Omega \cdot m}}{2 \cdot 0,15 m + 0,106} \right) = 0,7476$$

La tensió de pas màxima admissible serà la següent:

$$U_p = 10 \cdot 204 \text{ V} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot 2.000 \Omega + 6 \cdot 0,7476 \cdot 3.000 \Omega \cdot \text{m}}{1.000} \right] = 37.652 \text{ V}$$

L'apartat 1.1 del MIE RAT-13 indica que la tensió de contacte màxima admissible es calcula segons l'equació (13).

$$U_c = U_{ca} \cdot \left[1 + \frac{\frac{R_{ca1}}{2} + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s}{1.000} \right] \quad (13)$$

Per tant, la tensió de contacte màxima admissible és de:

$$U_c = 204 \text{ V} \cdot \left[1 + \frac{\frac{2.000 \Omega}{2} + 1,5 \cdot 0,7476 \cdot 3.000 \Omega \cdot \text{m}}{1.000} \right] = 1.094 \text{ V}$$

Un altre mètode per calcular les tensions de pas i contacte màximes admissible és a través del IEEE-80-2000. Per una persona de 70 kg, el coeficient reductor de la resistivitat de la capa superficial es pot calcular segons l'equació (14), que es troba a la pàgina 23 del IEEE 80-2000.

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (14)$$

Per tant, segons aquest mètode, el coeficient reductor de la resistivitat de la capa superficial és de:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{100 \Omega}{3.000 \Omega \cdot \text{m}}\right)}{2 \cdot 0,15 \text{ m} + 0,09} = 0,777$$

Per calcular la tensió de pas, s'utilitza l'equació (15), que es troba a la pàgina 27 del IEEE 80-2000.

$$E_{step 70} = (1.000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (15)$$

On:

- t_s és la durada del defecte a terra, que és de 0,5 segons.

Per tant, la tensió de pas serà de:

$$E_{step 70} = (1.000 + 6 \cdot 0,777 \cdot 3.000 \Omega \cdot \text{m}) \frac{0,157}{\sqrt{0,5 \text{ s}}} = 3.327 \text{ V}$$

Per calcular la tensió de contacte, s'utilitza l'equació (16), que es troba a la pàgina 27 del IEEE 80-2000.

$$E_{touch} = (1.000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (16)$$

Per tant, la tensió de contacte serà de:

$$E_{touch} = (1.000 + 1,5 \cdot 0,777 \cdot 3.000 \Omega \cdot m) \frac{0,157}{\sqrt{0,5 s}} = 998 V$$

B.3.2 Disseny de la malla de terra

Els paràmetres que s'utilitzen pel disseny de la malla de terra es poden observar a la Taula 7.

Taula 7. Paràmetres pel disseny de la malla de terra

Dimensions de la malla	Longitud $x = 65 m.$ Amplada $y = 50 m.$
Número de conductors paral·lels a l'eix X	19
Número de conductors paral·lels a l'eix Y	26
Separació entre conductors paral·lels	2,5 m.
Diàmetre conductor de terres	0,011 m.
Profunditat de la malla	$h = 0,8 m.$
Longitud del conductor de perímetre	$L_p = 230 m.$
Número de piques	$N_r = 494.$
Longitud de la pica de terra	$L_r = 2m.$
Longitud total de les piques	$L_R = 988 m.$
Longitud total del conductor enterrat	$L_C = 2.535m.$
Longitud total de conductor i piques	$L_T = 3.523 m.$
Màxima longitud del conductor a l'eix x	$L_x = 65 m.$
Màxima longitud del conductor a l'eix y	$L_y = 50 m.$
Superfície de la malla	$A = 3.250 m^2$

B.3.3 Resistència posta a terra

Per calcular la resistència de la xarxa de terra s'utilitza l'equació (17), que es troba a la pàgina 65 del IEEE 80-2000.

$$R_g = \rho \cdot \left(\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right) \quad (17)$$

On:

- ρ : resistivitat del terreny ($\Omega \cdot m$) = 100 $\Omega \cdot m$.
- L_T : Longitud total de conductor enterrat (Lmalla+494·Lpiques) (m) = 3.253 m.
- h: Profunditat d'enterrament del conductor (m) = 0,8 m.
- A: Superfície ocupada per la malla (m^2) = 3.250 m^2 .

S'ha considerat la malla de nova instal·lació, composta per cable de Cu de 95 mm^2 amb un diàmetre de 0,011 m.

Per tant, la resistència de la xarxa de terra és de:

$$R_g = 100 \Omega \cdot m \cdot \left(\frac{1}{3523 m} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 3.250 m^2}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + 0,8 m \cdot \sqrt{\frac{20}{3.250 m^2}}} \right) \right) = 0,78 \Omega$$

B.3.4 Intensitat de defecte a terra

El valor pres de la intensitat monofàsica de curtcircuit per a la subestació és de 31,5 kA.

De conformitat amb la IEEE-80-2000 es pot aplicar un factor de reducció SF en funció dels camins de retorn addicionals que suposen els cables de custòdia de les línies de distribució i de transmissió que arriben a la subestació.

S'adopta un 75% de contribució remota i un 25% de contribució local.

Per determinar aquesta reducció s'utilitza la gràfica de la Figura 3, partint de la resistència de posta a terra (R_g) i el nombre de línies de transmissió i distribució.

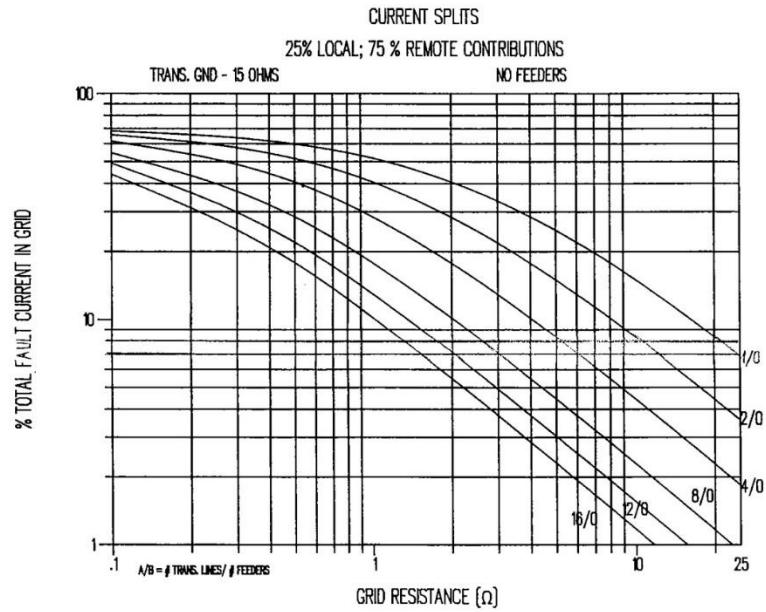


Figure C.17—Curves to approximate split factor S_f

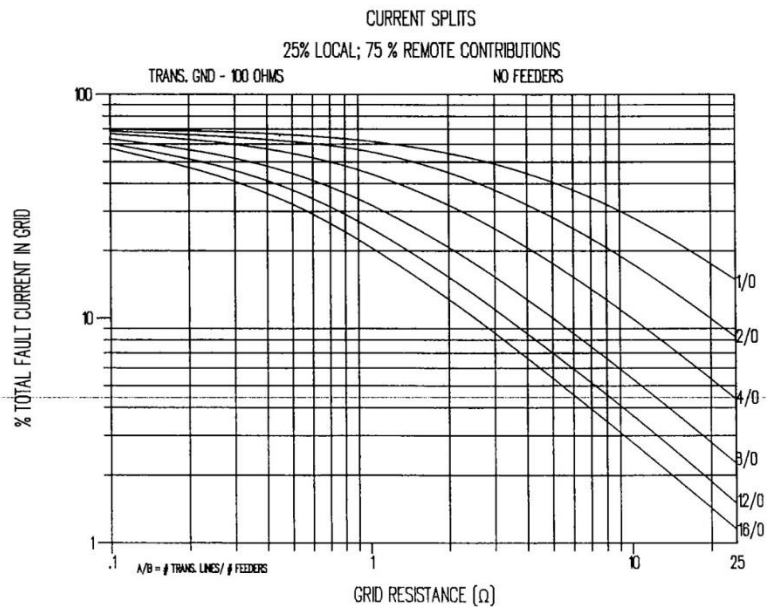


Figure C.18—Curves to approximate split factor S_f

Figura 3. Gràfica per determinar el factor de reducció S_f

Com que la resistència de posta a terra és de $0,78 \Omega$, el factor que resulta és del 65%.

Per calcular la intensitat de defecte a terra s'utilitza l'equació (18), que es troba a la pàgina 73 del IEEE 80-2000.

$$I_G = D_f \cdot I_g = D_f \cdot S_f \cdot I_f \tag{18}$$

On:

- I_f és la intensitat simètrica de defecte. El valor és de 31,5 kA.
- D_f és el factor de decrement degut a la duració del defecte. En el cas que ens ocupa és 1.
- S_f és el factor de decrement degut a la divisió de falta segons la subestació. Tal com s'ha esmentat anteriorment, el valor és de 0,65.

Per tant, la intensitat de defecte és de:

$$I_G = 1 \cdot 0,65 \cdot 31,5 \text{ kA} = 20,5 \text{ kA}$$

GPR és l'elevació del potencial de malla. Es calcula segons l'equació (19).

$$GPR = I_G \cdot R_G \quad (19)$$

Per tant, l'elevació del potencial de malla és de:

$$GPR = 20.475 \text{ A} \cdot 0,78 \Omega = 16.168 \text{ V}$$

B.3.5 Avaluació de tensions de pas i contacte

Utilitzant l'estàndard IEEE 80, es poden calcular uns valors previstos de tensions de pas i contacte per uns determinats nivells de falta, i per a un disseny previ de la xarxa de terra.

La tensió de contacte de la malla es calcula segons l'equació (20), que es troba a la pàgina 91 del IEEE 80-2000.

$$E_{mesh} = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_C + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R} \quad (20)$$

On:

- K_m és el factor geomètric per a la tensió de contacte. Es calcula segons l'equació (25).
- K_i és el factor de correcció per la irregularitat de la intensitat. Es calcula segons l'equació (21).

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (21)$$

On:

- n és el número de conductors paral·lels. Es calcula segons l'equació (22).

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (22)$$

On:

- n_a es calcula segons l'equació (23).
- n_b es calcula segons l'equació (24).
- n_c té un valor de 1 per malles quadrades i rectangulars.
- n_d té un valor de 1 per malles quadrades, rectangulars i en L.

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P} = \frac{2 \cdot 2.535 \text{ m}}{230 \text{ m}} = 22,04 \quad (23)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{230 \text{ m}}{4 \cdot \sqrt{3.250 \text{ m}^2}}} = 1,004 \quad (24)$$

Per tant, el valor del número de conductors paral·lels (n) és de:

$$n = 22,04 \cdot 1,004 \cdot 1 \cdot 1 = 22,138$$

Per tant, el valor del factor de correcció per la irregularitat de la intensitat (K_i) és de:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 0,644 + 0,148 \cdot 22,138 = 3,92$$

El càlcul del factor geomètric per a la tensió de contacte, tal i com s'ha esmentat anteriorment, es calcula segons l'equació (25). L'equació es troba a la pàgina 93 del IEEE 80-2000.

$$k_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{k_{ii}}{k_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi \cdot (2n - 1)} \right] \right] \quad (25)$$

On:

- k_{ii} és el factor correctiu ponderat que ajusta l'efecte dels conductors interns sobre les cantonades de la malla. Es calcula segons l'equació (26). L'equació es troba a la pàgina 93 del IEEE 80-2000.

$$k_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} = \frac{1}{(2 \cdot 22,13)^{\frac{2}{22,13}}} = 0,71 \quad (26)$$

- k_h és el factor correctiu ponderat que emfatitza l'efecte de la profunditat. Es calcula segons l'equació (27). Aquesta equació es troba a la pàgina 93 del IEEE 80-2000.

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,8 \text{ m}}{1}} = 1,34 \quad (27)$$

Per tant, el valor del factor geomètric per a la tensió de contacte és de:

$$k_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \ln \left[\frac{(2,5 \text{ m})^2}{16 \cdot 0,8 \text{ m} \cdot 0,011 \text{ m}} + \frac{(2,5 \text{ m} + 2 \cdot 0,8 \text{ m})^2}{8 \cdot 2,5 \text{ m} \cdot 0,011 \text{ m}} - \frac{0,8 \text{ m}}{4 \cdot 0,011 \text{ m}} + \frac{0,71}{1,34} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot 22,138 - 1)} \right] \right] = 0,52$$

El valor de la tensió de contacte de la malla és de:

$$E_{mesh} = \frac{100 \Omega \cdot m \cdot 20.475 \text{ A} \cdot 0,498 \cdot 3,92}{2.535 \text{ m} + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{2 \text{ m}}{\sqrt{(65 \text{ m})^2 + (60 \text{ m})^2}} \right) \right] \cdot 988 \text{ m}} = 996,85 \text{ V}$$

El valor de la tensió de pas es calcula segons l'equació (28).

$$E_{step} = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_C} \quad (28)$$

On:

- K_s és el factor geomètric per a la tensió de pas. Es calcula segons l'equació (29).
- L_C és la longitud total del conductor enterrat.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \left(\frac{1 - 0,5^{n-2}}{D} \right) \right] \quad (29)$$

Per tant, el valor del factor geomètric per a la tensió de pas és el següent:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 0,8 \text{ m}} + \frac{1}{2,5 \text{ m} + 0,8 \text{ m}} + \left(\frac{1 - 0,5^{22,138-2}}{2,5 \text{ m}} \right) \right] = 0,42$$

Per tant, la tensió de pas (E_{step}) és la següent:

$$E_{step} = \frac{100 \Omega \cdot m \cdot 20.475 A \cdot 0,42 \cdot 3,92}{2.535 m} = 2.318 V < 3.327 V$$

La tensió de pas és correcta tant pel que fa el IEEE 80-2000 com pel que fa la ITC-RAT-13.

CONDUCTOR

Per determinar la secció mínima del conductor s'utilitza l'equació (30) que indica l'estàndard IEEE 80, per a conductors de coure. El material proposat és conductor de coure comercial dur.

$$A = I \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (30)$$

On:

- α_r és el coeficient tèrmic de la resistivitat del conductor a 20 °C (0,0381 °C⁻¹).
- ρ_r és la resistivitat del conductor a 20 °C (1,78 μΩ.cm)
- T_m és la temperatura màxima admissible en el conductor en °C. (200°C segons ITC-RAT-13, apartat 3.1.)
- T_a és la temperatura ambient en °C (40 °C).
- K_0 es calcula segons l'equació (31). El valor és de 242.
- I és la intensitat en rms (31,5 kA)
- t_c és la duració de defecte en segons (0,5 s)
- $TCAP$ és la capacitat tèrmica per unitat de volum (3,42 J/(cm³·°C))

$$K_0 = \frac{1}{\alpha_0} \text{ o } \frac{1}{\alpha_r} - T_r \quad (31)$$

Per tant, la secció mínima del conductor serà de:

$$A = 31.500 A \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3,42 \frac{J}{cm^3 \cdot ^\circ C} \cdot 10^{-4}}{0,5 s \cdot 0,00381 ^\circ C^{-1} \cdot 1,78 \cdot 10^6 \Omega \cdot cm}\right) \cdot \ln\left(\frac{242 + 200 ^\circ C}{242 + 40 ^\circ C}\right)}} = 147,96 mm^2$$

Segons la ITC-RAT-13, la secció mínima del conductor ha de ser la que indica l'equació (32).

$$A = \frac{I}{160} = \frac{31.500 A}{160 \frac{A}{mm^2}} = 196,88 mm^2 \quad (32)$$

La ITC-RAT-13 indica que la secció mínima del conductor sense risc d'incendi es calcula amb l'equació (33).

$$A = \frac{196,88 mm^2}{1,2} = 164 mm^2 \quad (33)$$

La secció del conductor de mallat seleccionat és de 95 mm² amb punts a terra amb doble conductor.

A la vista dels resultats obtinguts, els valors de les tensions de pas i contacte estan molt per sota dels permesos pel MIE-RAT 13, i de l'IEEE-80-2000, de manera que no hi hauria problemes.

De tota manera, es mesuraran de forma pràctica els valors de les tensions de pas i contacte, un cop construïda la subestació, per assegurar-se que no hi ha perill en cap punt de la instal·lació.

B.4 Xarxa de terres superiors

El càlcul de la xarxa de terres superiors es pot observar a l'apartat E.6 Xarxa de terres superiors de la Subestació de Seccionament, ja que al tenir la mateixa tensió el càlcul és el mateix.

B.4.1 Edifici de control

La Subestació de Transformació de 110 kV objecte d'estudi disposarà d'un edifici de comandament i control per allotjar equips de control i comunicacions. S'aplica la norma NTE IPP per determinar si es necessita la instal·lació de parallamps o d'un altre sistema de captació de llamps en el seu exterior.

El càlcul per saber si l'edifici de control haurà de disposar de parallamps es pot observar a l'apartat E.6.2.Edifici de control.

B.5 Estudi acústic de la subestació de transformació a 110 kV

Aquest estudi acústic es realitza per justificar el compliment de l'apartat 3.16. Limitació del nivell de soroll emès per instal·lacions d'alta tensió, de la ITC-RAT 15 Instal·lacions elèctriques d'exterior.

El RD 337/2014, de 9 de maig, pel qual s'aproven el Reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en instal·lacions elèctriques d'alta tensió i les seves instruccions tècniques complementàries ITC-RAT 01 a 23, a l'apartat 3.16, de la ITC-RAT 15 estableix el següent:

“Amb l'objecte de limitar el soroll originat per les instal·lacions d'alta tensió, aquestes s'han de dimensionar i dissenyar de manera que els índexs de soroll mesurats a l'exterior de les instal·lacions s'ajustin als nivells de qualitat acústica que estableix el Reial decret 1367/2007, de 19 d'octubre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a zonificació acústica, objectius de qualitat i emissions acústiques. Amb l'objecte de verificar que en la proximitat de les instal·lacions d'alta tensió no se sobrepassen els límits màxims admissibles, l'Administració pública competent pot fer, per control estadístic o a petició d'una part interessada, inspeccions amb els seus propis mitjans o delegar aquests mesuraments en organismes de control habilitats o laboratoris acreditats en mesures de soroll”.

El Reial decret 1367/2007, de 19 d'octubre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a zonificació acústica, objectius de qualitat i emissions acústiques, estableix uns objectius de qualitat acústica, en el seu annex II.

B.5.1 Objectius de qualitat acústica

En l'annex II del RD 1367/2007, la Taula 8 indica els objectius de qualitat acústica per al soroll a l'exterior aplicables a àrees urbanitzades existents.

Taula 8. Objectius de qualitat acústica pel soroll aplicables a àrees urbanitzades existents

Tipus d'àrea acústica		Índexs de soroll		
		L _d	L _e	L _n
e	Sectors del territori amb predomini de sol d'ús sanitari, docent i cultural que requereixi una especial protecció contra la contaminació acústica.	60	60	60
a	Sectors del territori amb predomini de sol d'ús Residencial.	65	65	55
d	Sectors del territori amb predomini de sol d'ús terciari diferent del previst a c).	70	70	65
c	Sectors del territori amb predomini de sol d'ús recreatiu i d'espectacles.	73	73	63
b	Sectors del territori amb predomini de sol d'ús Industrial.	75	75	65
f	Sectors del territori destinats a sistemes generals d'infraestructures de transport, o altres equipaments públics que els reclamin (1).	Sense determinar.	Sense determinar.	Sense determinar.

(1) En aquests sectors del territori s'han d'adoptar les mesures adequades de prevenció de la contaminació acústica, en particular mitjançant l'aplicació de les tecnologies de menys incidència acústica d'entre les millors tècniques disponibles, d'acord amb l'apartat a) de l'article 18.2 de la Llei 37/2003, de 17 de novembre.

Nota: Els objectius de qualitat aplicables a les àrees acústiques estan referenciats a una altura de 4 m.

A partir de la Taula 8 es pot comprovar que en un sector de territori amb predomini de sol d'ús industrial es poden admetre 75 dB per als períodes de dia (de 7 a 19 hores) i de tarda (de 19 a 23 hores) i 65 dB (de 23 a 7 hores) a la nit.

B.5.2 Índex de soroll

L'índex de soroll, anomenat d'ara en endavant $L_{Aeq, d}$, és el nivell de pressió sonora continu equivalent ponderat A, en decibels, determinat en un interval temporal de T segons, definit a la norma ISO 1966-1:1987. En què:

- Si $T = d$, $L_{Aeq, d}$ és el nivell de pressió sonora continu ponderat A, determinat en el període de dia.
- Si $T = e$, $L_{Aeq, e}$ és el nivell de pressió sonora continu ponderat A, determinat en el període de tarda.
- Si $T = n$, $L_{Aeq, n}$ és el nivell de pressió sonora continu ponderat A, determinat en el període de nit.

B.5.3 Resultats experimentals

Per realitzar aquest estudi s'ha mesurat experimentalment el soroll, del transformador de potència de 40 MVA que es trobarà a la Subestació de Transformació.

Les mesures experimentals inclouen mesures d'evolució temporal amb ponderació freqüencial A, C i sense ponderació freqüencial. També s'ha realitzat l'anàlisi espectral del soroll de la Subestació de transformació en $\frac{1}{3}$ d'octava, sense filtre de ponderació.

Les mesures s'han realitzat a 11,19, 16 i 20,5 m de distància del transformador.

Totes les mesures s'han realitzat fora del perímetre de seguretat elèctrica. En tots els casos, els valors de nivell equivalent amb ponderació freqüencial A surten per sota dels 75 dB, en sectors industrials.

El sonòmetre que s'ha emprat és un sonòmetre model SC-420; nombre de sèrie: T247535; classe 1: Microphone C140; nombre de sèrie: 14791; preamplificador PA020; nombre de sèrie : 510.

A les Figura 4 i Figura 5 es poden observar l'evolució temporal en dB i els dB a $\frac{1}{3}$ d'octava a una distància de 11,19 m del transformador, respectivament.

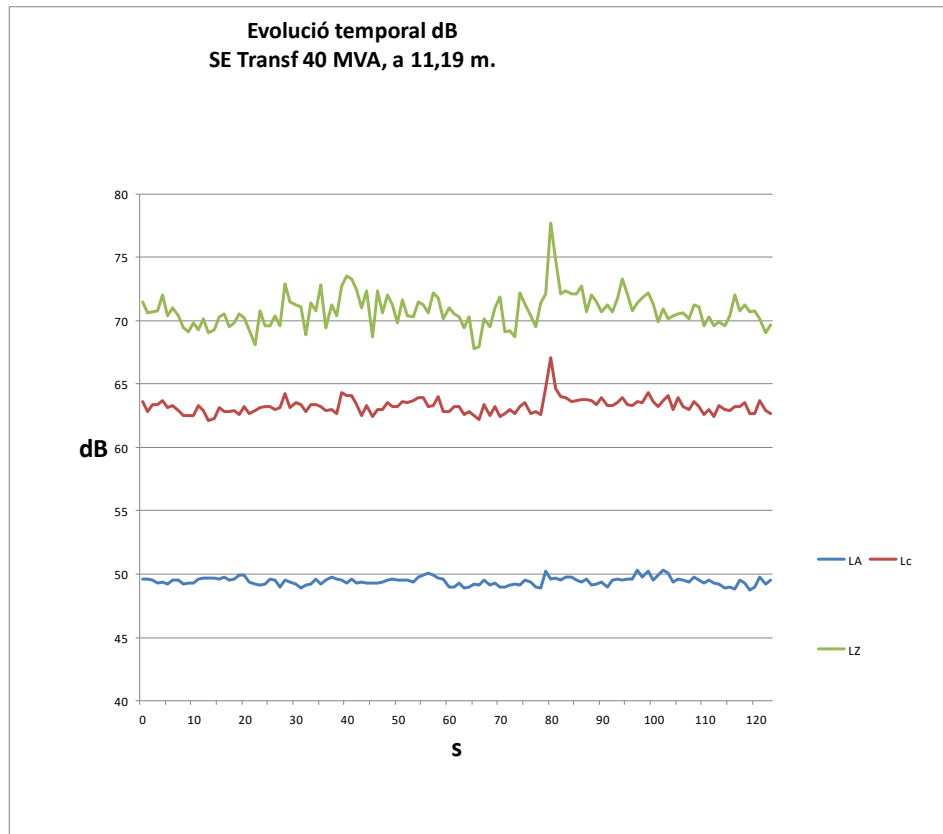


Figura 4. Evolució temporal en dB a 11,19 metres del transformador

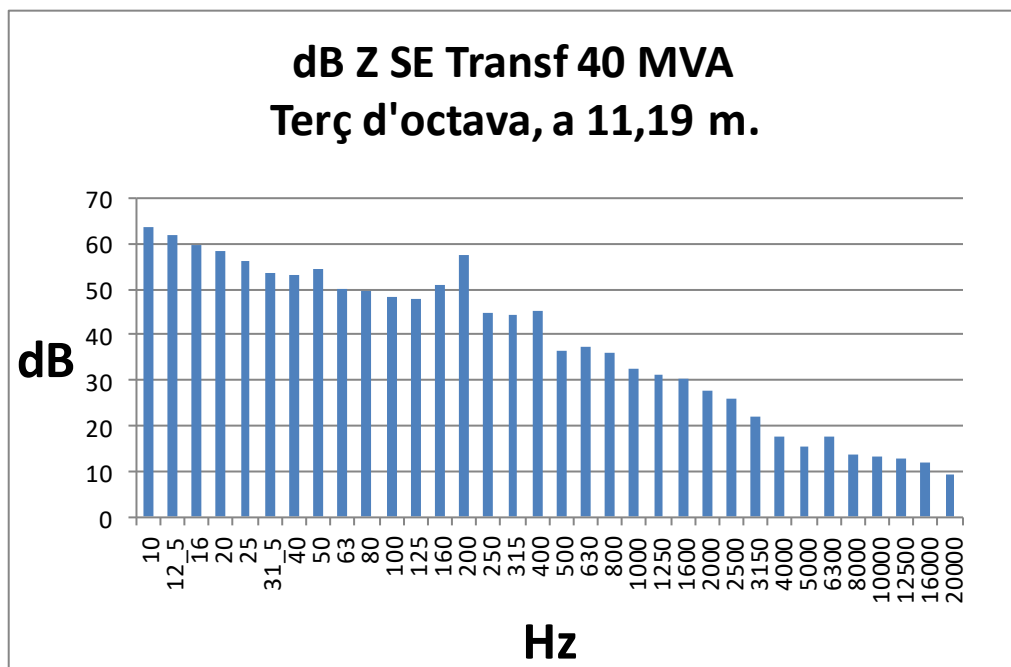


Figura 5. dB a 1/3 d'octava a 11,19 metres dels transformador

A les Figura 6 i Figura 7 es poden observar l'evolució temporal en dB i els dB a $\frac{1}{3}$ d'octava a una distància de 16 m del transformador, respectivament.

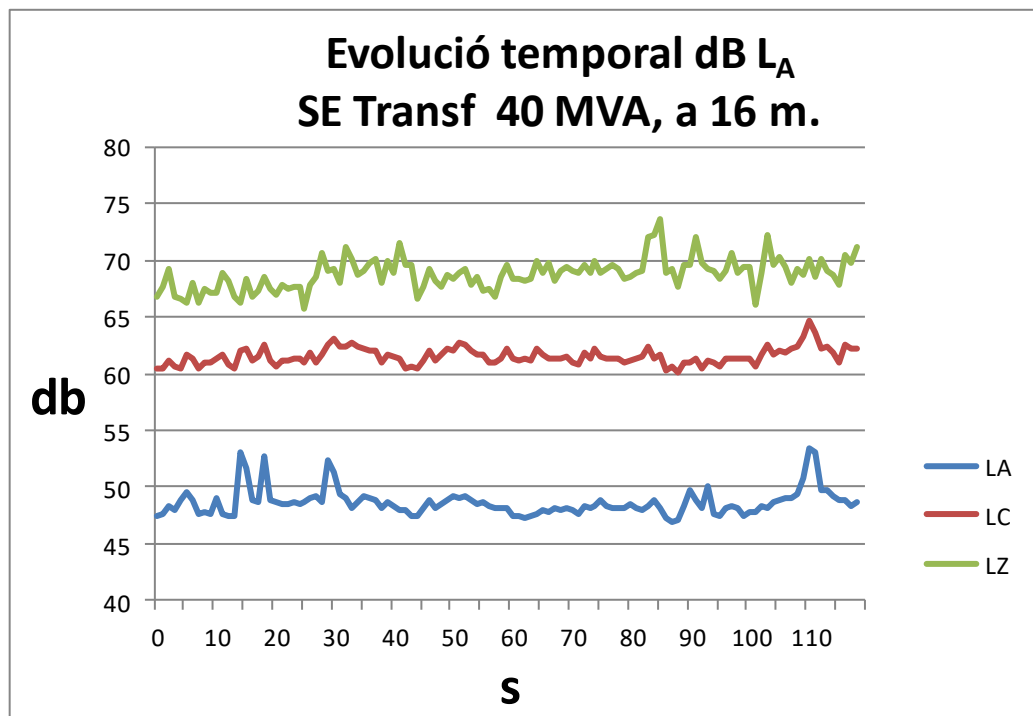


Figura 6. Evolució temporal en dB a 16 metres del transformador

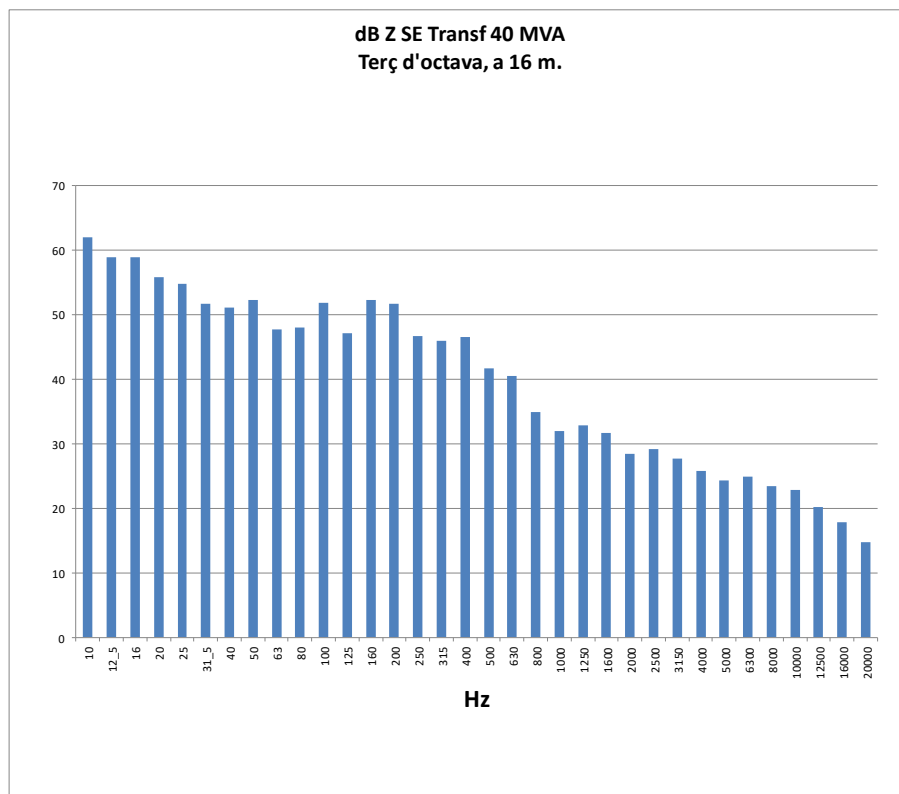


Figura 7. dB a 1/3 d'octava a 16 metres dels transformador

A les Figura 8 i Figura 9 es poden observar l'evolució temporal en dB i els dB a $\frac{1}{3}$ d'octava a una distància de 20,5 m del transformador, respectivament.

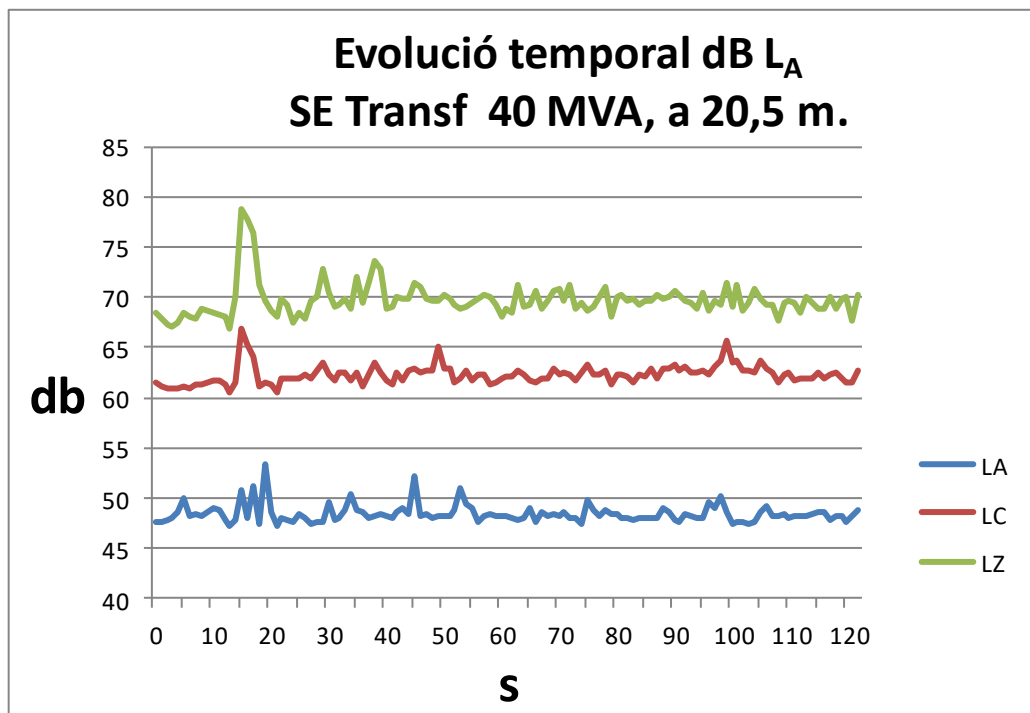


Figura 8. Evolució temporal en dB a 20,5 metres del transformador

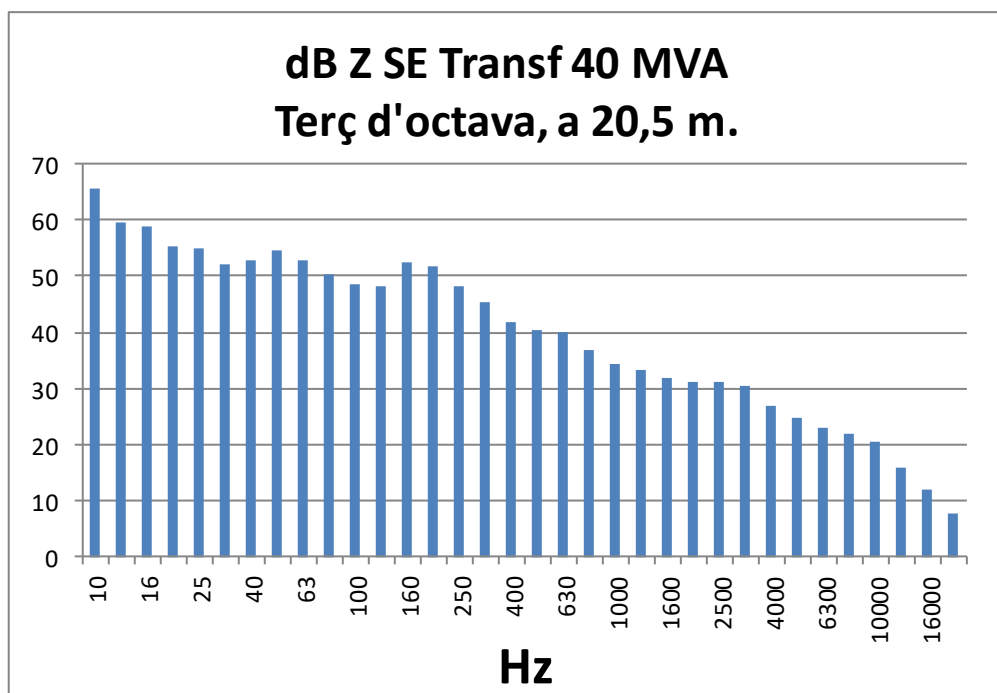


Figura 9. dB a 1/3 d'octava a 20,5 metres dels transformador

B.6 Estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de contaminació electromagnètica de la subestació de transformació a 110 kV

A la subestació elèctrica de transformació a 25/110 kV, està previst que hi arribi la línia de simple circuit a 25 kV, d'evacuació del parc eòlic.

El Reial Decret 223/2008, de 15 de febrer, pel qual s'aproven el Reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en línies elèctriques d'alta tensió i les seves instruccions tècniques complementàries ITC-LAT 01 a 09, en el seu article 11 Guia tècnica, preveu el següent.

L'òrgan directiu competent en matèria de seguretat industrial del Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç ha d'elaborar i mantenir actualitzada una Guia Tècnica de caràcter no vinculant per a l'aplicació pràctica de les previsions del present Reglament i les seves ITC, la qual pot establir aclariments a conceptes inclosos en l'un i les altres

La Guia Tècnica d'aplicació de la Instrucció Tècnica Complementària ITC- LAT 07 de Línies Aèries amb conductors nus, en el punt 2.1.2.2 de Requeriments elèctrics, especifica que també s'ha de considerar la predicció del nivell de pertorbació radioelèctrica, segons la norma UNE- EN 50341-1.

La norma UNE- EN 50341-1, de maig de 2017, és la norma de Línies elèctriques aèries de més d'1 kV en corrent altern.

L'apartat 5.10.1.1 de la Norma UNE- EN 50341-1, de Línies elèctriques aèries de més d'1 kV, de Generalitats de Pertorbacions d'Efecte Corona, assenyala el següent.

“Les pertorbacions radioelèctriques produïdes per les línies aèries de potència d'alt voltatge poden generar-se en un espectre molt ampli de freqüències degut a:

- *descàrregues de corona a l'aire a la superfície del conductor i la ferramenta;*
- *descàrregues i espurnes en àrees dels aïllaments molt sol·licitades elèctricament;*
- *espurnes en contactes imperfectes o fluxos.*

Existeixen dos mètodes bàsics per predir les pertorbacions radioelèctriques en una línia d'alt voltatge el comparatiu i l'analític.

Nota: Aquests mètodes es descriuen i es comparen en l'Informe Tècnic CISPR/TR 18-3 i en el document del grup de treball 36.02 de CIGRE “Interferències produïdes per l'efecte corona en sistemes elèctrics””

En aquest estudi s'utilitzarà el procediment previst en l'informe Tècnic CISPR/TR 18-3: 2017, per avaluar les interferències radioelèctriques produïdes per l'efecte corona en sistemes elèctrics.

Tot i això, la norma UNE EN 50341-1, assenyala que generalment, els nivells de pertorbació radioelèctrica generats per l'efecte corona es converteixen en un paràmetre de disseny a tenir en compte sols en tensions d'operació de 230 kV i superiors. En aquests alts voltatges, els mètodes de predicció del nivell de soroll assumeixen que les ferramentes estan dissenyades o apantallades de manera que únicament l'efecte corona en els conductors és el responsable dels nivells de pertorbació radioelèctrica observats. També es considera que els conductors han estat instal·lats mirant de no malmetre la seva superfície.

Per altra banda, en aquest estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de contaminació electromagnètica, també es tindran en compte els camps elèctrics i magnètics sota de la línia, d'acord amb el que s'indica al punt 5.11.1 Camps elèctrics i magnètics sota la línia, de la Norma UNE- EN 50341-1, de Línies elèctriques aèries de més d'1 kV.

B.7 Camps elèctrics i magnètics sota la línia

Segons la norma UNE-EN 50341-1 de Línies elèctriques aèries de més d'1 kV, els camps elèctrics poden determinar-se fent servir diferents mètodes analítics i numèrics, o de models a escala reduïda. L'elecció del mètode més adient depèn de la complexitat del problema a resoldre i del nivell de precisió desitjat.

El mètode de les càrregues equivalents és aplicable quan el problema a solucionar és el camp elèctric a prop del terra sota les línies aèries.

La norma UNE- EN 50341 també assenyala que el càlcul del camp magnètic pot realitzar-se mitjançant diferents mètodes depenent del problema a solucionar, la naturalesa dels materials que envolten els conductors i del grau de precisió volgut.

Malgrat tot, en molts propòsits és adient aplicar la llei fonamental d'Ampère, que dona la intensitat del camp magnètic produïda per cada conductor amb intensitat.

Atenent les recomanacions de la norma UNE- EN 50341, per al càlcul del camp electromagnètic sota dels conductors s'utilitzarà la llei de Biot i Savart.

Indica també, la norma UNE-EN 50341 que els camps magnètics i elèctrics en la recomanació del consell europeu 1999/519/CE són a 50 Hz, $5 \frac{kV}{m}$ i $100 \mu T$.

El Reial Decret 337/2014, de 9 de maig, pel qual s'aproven el Reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en instal·lacions elèctriques d'alta tensió i les seves instruccions tècniques complementàries ITC-RAT 01 a 23, en el seu punt 3.15 Limitació de camps magnètics en la proximitat d'instal·lacions d'alta tensió, marca el següent.

“En el disseny de les instal·lacions d'alta tensió s'han d'adoptar les mesures adequades per minimitzar, a l'exterior de les instal·lacions d'alta tensió, els camps electromagnètics creats per la circulació de corrent a 50 Hz en els diferents elements de les instal·lacions quan aquestes instal·lacions d'alta tensió estiguin a prop d'edificis d'altres usos. La comprovació que no se supera el valor establert al Reial decret 1066/2001, de 28 de setembre, pel qual s'aprova el Reglament que estableix condicions de protecció del domini públic radioelèctric, restriccions a les emissions radioelèctriques i mesures de protecció sanitària davant d'emissions radioelèctriques, s'ha de fer mitjançant els càlculs per al disseny corresponent, abans de la posada en marxa de les instal·lacions que s'executin seguint el disseny esmentat i en les seves modificacions posteriors quan aquestes puguin fer augmentar el valor del camp magnètic”.

Per aquest motiu, en aquest estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de contaminació electromagnètica de les línies aèries d'alta tensió, es tindran en compte el Quadre 1, de Restriccions bàsiques per a camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz- 300 GHz); i el Quadre 2, de Nivells de referència per a camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz- 300 GHz, valors rms impertorbats), del Reial decret 1066/2001, de 28 de setembre, pel qual s'aprova el Reglament que estableix condicions de protecció del domini públic radioelèctric, restriccions a les emissions radioelèctriques i mesures de protecció sanitària davant d'emissions radioelèctriques.

B.7.1 Camp magnètic sota la línia

El camp magnètic B originat per una càrrega mòbil, es troba experimentalment mitjançant l'equació (34) i l'equació (35).

$$B \left[\frac{N}{A \cdot m} \right] = k' \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{q [C] \vec{v} \left[\frac{m}{s} \right] \times \widehat{r} [m]}{r^2 [m^2]} \quad (34)$$

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} \quad (35)$$

Un conductor de secció A, de longitud dl té un volum $dV = A dl$

Si en un conductor de secció A hi ha n portadors de càrrega per unitat de volum,

$$dQ = n q A dl$$

$$dB = k' \frac{dQ v \sin \alpha}{r^2}$$

$$dB = k' \frac{n q v A dl \sin \alpha}{r^2}$$

Com que $n q v A = I$,

$$dB = k' \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

Que escrit en forma de producte vectorial,

$$dB = k' \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

L'expressió del camp magnètic originat per un element de corrent $d\vec{l}$, es coneix com a llei de Biot. Fent la integral dels elements diferencials de camp magnètic en un conductor llarg,

$$B = k' \int \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} =$$

$$B = k' I \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \theta}{r^2} dy$$

Si R és la distància radial des del conductor fins al punt P, al qual es vol calcular el camp magnètic,

$$R = r \sin \theta$$

$$r = \frac{R}{\sin \theta}$$

$$y = -R \cot \theta$$

$$dy = R \operatorname{cosec}^2 \theta d\theta$$

$$B = \frac{k' I}{R} \int_0^\pi \sin \theta d\theta = 2 k' \frac{I}{R}$$

$$B [T] = 2 \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{I [A]}{R [m]}$$

Aquesta expressió que és coneguda com a llei de Biot i Savart, s'utilitzarà per calcular el camp magnètic a diferents distàncies dels conductors d'alta tensió.

Per superposició el camp electromagnètic sota la línia es trobarà l'equació (36).

$$\vec{B} [T] = \sum_i 2 \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{\vec{I}_i [A] \times \hat{r}_i}{R_i [m]} \quad (36)$$

On:

- i és el conductor i de la línia.
- R_i és la distància radial des de la línia al punt P, al qual es calcula el camp magnètic.
- \hat{r}_i és el vector posició unitari des de la secció de la línia que s'està considerant, fins al punt P.
- \vec{I}_i és el vector intensitat que circula pel conductor que s'està considerant.

En el cas d'una semi línia infinita, que es dona en un final de línia, a l'entrada o sortida de les Subestacions, la integració es fa entre 0 i $\frac{\pi}{2}$. El resultat és:

$$\vec{B} [T] = \sum_i 10^{-7} \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{\vec{I}_i [A] \times \hat{r}_i}{R_i [m]}$$

B.7.2 Restriccions bàsiques i nivells de referència del Reial Decret 1066/2001

Per a l'aplicació de les restriccions basades en l'avaluació dels possibles efectes de les emissions radioelèctriques sobre la salut, s'ha de diferenciar les restriccions bàsiques dels nivells de referència.

Restriccions bàsiques.

Les restriccions de l'exposició als camps elèctrics, magnètics i electromagnètics variables en el temps, basades directament en els efectes sobre la salut coneguts i en consideracions biològiques, reben el nom de «restriccions bàsiques». Depenent de la freqüència del camp, les magnituds físiques emprades per especificar aquestes restriccions són la inducció magnètica (B), la densitat de corrent (J), l'índex d'absorció específica d'energia (SAR) o la densitat de potència (S). La inducció magnètica i la densitat de potència es poden mesurar amb facilitat en els individus exposats.

Nivells de referència.

Aquests nivells s'ofereixen a efectes pràctics d'avaluació de l'exposició, per determinar la probabilitat que es sobrepassin les restriccions bàsiques.

Alguns nivells de referència es deriven de les restriccions bàsiques pertinents utilitzant mesuraments o tècniques computeritzades, i alguns es refereixen a la percepció i als efectes adversos indirectes de l'exposició a les emissions radioelèctriques. Les magnituds derivades són la intensitat de camp elèctric (E), la intensitat de camp magnètic (H), la inducció magnètica (B), la densitat de potència (S) i el corrent en extremitats (I_l). Les magnituds que es refereixen a la percepció i altres efectes indirectes són el corrent (de contacte) (I_c) i, per als camps pulsatius, l'absorció específica d'energia (SA). En qualsevol situació particular d'exposició, els valors mesurats o calculats de qualsevol d'aquestes quantitats poden comparar-se amb el nivell de referència adequat. El compliment del nivell de referència de garantirà el respecte de la restricció bàsica pertinent. Que el valor mesurat sobrepassi el nivell de referència no vol dir necessàriament que es vagi a sobrepassar la restricció bàsica.

No obstant això, en aquestes circumstàncies cal comprovar si aquesta es respecta.

Algunes magnituds, com la inducció magnètica (B) i la densitat de potència (S), serveixen a determinades freqüències com a restriccions bàsiques i com a nivells de referència.

Els límits d'exposició a emissions radioelèctriques a què es refereix el Reglament són els resultants d'aplicar les restriccions bàsiques i els nivells de referència en zones en les quals pugui romandre habitualment el públic en general, sense perjudici del que estableixen altres disposicions específiques en l'àmbit laboral.

B.7.3 Restriccions bàsiques

Depenent de la freqüència, per especificar les restriccions bàsiques sobre els camps electromagnètics s'empren les següents quantitats físiques (quantitats dosimètriques o exposimètriques):

a) Entre 0 i 1 Hz es proporcionen restriccions bàsiques de la inducció magnètica per a camps magnètics estàtics (0 Hz) i de la densitat de corrent per camps variables en el temps d'1 Hz, per tal de prevenir els efectes sobre el sistema cardiovascular i el sistema nerviós central.

b) Entre 1 Hz i 10 MHz es proporcionen restriccions bàsiques de la densitat de corrent per prevenir els efectes sobre les funcions del sistema nerviós.

c) Entre 100 kHz i 10 GHz es proporcionen restriccions bàsiques del SAR («specific energy absorption rate», índex d'absorció d'energia específica) per prevenir la fatiga calorífica de cos sencer i un escalfament local excessiu dels teixits. En la gamma de 100 kHz a 10 MHz s'ofereixen restriccions de la densitat de corrent i del SAR.

d) Entre 10 GHz i 300 GHz es proporcionen restriccions bàsiques de la densitat de potència, per tal de prevenir l'escalfament dels teixits en la superfície corporal o prop d'ella.

Les restriccions bàsiques exposades en la Taula 9 s'han establert tenint en compte les variacions que puguin introduir les sensibilitats individuals i les condicions mediambientals, així com el fet que l'edat i l'estat de salut dels ciutadans varien.

Taula 9. Restriccions bàsiques per camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz a 300 GHz)

Gamma de freqüència	Inducció magnètica [mT]	Densitat de corrent $\left[\frac{mA}{m^2}\right]$	SAR mitjà de cos sencer $\left[\frac{W}{kg}\right]$	SAR Localitzat (cap i tronç) $\left[\frac{W}{kg}\right]$	SAR Localitzat (membres) $\left[\frac{W}{kg}\right]$	Densitat de potència S $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
0 Hz	40					
>0 – 1Hz		8				
1- 4Hz		$\frac{8}{f}$				
4- 1.000 Hz		2				
1.000 Hz– 100 kHz		$\frac{f}{500}$				
100 kHz- 10 MHz		$\frac{f}{500}$	0,08	2	4	
10 MHz- 10 GHz			0,08	2	4	
10- 300 GHz						10

Nota:

- f és la freqüència en Hz.
- L'objectiu de la restricció bàsica de la densitat de corrent és protegir contra els greus efectes de l'exposició sobre els teixits del sistema nerviós central al cap i al tronc, i inclou un factor de seguretat. Les restriccions bàsiques per als camps de freqüències molt baixes es basen en els efectes negatius establerts en el sistema nerviós central. Aquests efectes aguts són essencialment instantanis i no hi ha justificació científica per modificar les restriccions bàsiques en relació amb les exposicions de curta durada. No obstant això, ja que les restriccions bàsiques es refereixen als efectes negatius en el sistema nerviós central, aquestes restriccions bàsiques poden permetre densitats més altes en els teixits del cos diferents dels del sistema nerviós central en les mateixes condicions d'exposició.
- Atesa la manca d'homogeneïtat elèctrica del cos, s'ha de calcular la mitjana de les densitats de corrent en una secció transversal d'1 cm² perpendicular a la direcció del corrent.
- Per a freqüències de fins a 100 kHz, els valors pic de densitat de corrent poden obtenir multiplicant el valor quadràtic mitjà (rms) per $\sqrt{2}$ ($\approx 1,414$). Per polsos de durada t_p , la freqüència equivalent que s'ha d'aplicar en les restriccions bàsiques s'ha de calcular com a $f = \frac{1}{2 t_p}$.
- Per a freqüències de fins a 100 kHz i per a camps magnètics pulsatius, la densitat de corrent màxima associada amb els polsos es pot calcular a partir dels temps de pujada / caiguda i l'índex màxim de canvi de la inducció magnètica. La densitat de corrent induït pot llavors comparar-se amb la restricció bàsica corresponent.
- Tots els valors SAR han de ser mitjanats al llarg d'un període qualsevol de sis minuts.
- La massa mitjana de SAR localitzat la constitueix una porció qualsevol de 10 g de teixit contigu; el SAR màxim obtingut d'aquesta manera ha de ser el valor que s'utilitzi per avaluar l'exposició. Aquests 10 g de teixit es consideren com una massa de teixits contigus amb propietats elèctriques gairebé homogènies. Especificant que es tracta d'una massa de teixits contigus, es reconeix que aquest concepte pot utilitzar-se en la dosimetria automatitzada, encara que pot presentar dificultats a l'hora d'efectuar mesuraments físics directes. Es pot utilitzar una geometria simple, com una massa de teixits cúbica, sempre que les quantitats dosimètriques calculades tinguin valors de prudència en relació amb les directrius d'exposició.

- Per als polsos de durada t_p , la freqüència equivalent que s'ha d'aplicar en les restriccions bàsiques s'ha de calcular com a $f = \frac{1}{2 t_p}$. A més, pel que fa a les exposicions polsàtils, en la gamma de freqüències de 0,3 a 10 GHz i en relació amb l'exposició localitzada del cap, la SA no ha de sobrepassar els 2 mJ / kg⁻¹ com a mitjana calculat en 10 g de teixit

B.7.4 Nivells de referència

Els nivells de referència de l'exposició serveixen per ser comparats amb els valors de les magnituds mesures. El respecte de tots els nivells de referència assegurarà el respecte de les restriccions bàsiques.

Si les quantitats dels valors mesurats són més grans que els nivells de referència, no vol dir necessàriament que s'hagin sobrepassat les restriccions bàsiques. En aquest cas, s'ha de fer una avaluació per comprovar si els nivells d'exposició són inferiors a les restriccions bàsiques.

Els nivells de referència per limitar l'exposició s'obtenen a partir de les restriccions bàsiques, pressuposant un acoblament màxim del camp amb l'individu exposat, amb el que s'obté un màxim de protecció.

En la Taula 10 hi ha un resum dels nivells de referència. En general, aquests estan pensats com a valors mitjans, calculats espacialment sobre tota l'extensió del cos de l'individu exposat, però tenint molt en compte que no s'han de sobrepassar les restriccions bàsiques d'exposició localitzades.

B.7.5 Nivells de camp

Taula 10. Nivells de referència per a camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz - 300 GHz)

Gamma de freqüència	Intensitat de camp E $\left[\frac{V}{m}\right]$	Intensitat de camp H $\left[\frac{A}{m}\right]$	Camp B $[\mu T]$	Densitat de potència equivalent d'ona plana $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
1Hz		$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	
1- 8Hz	10.000	$3,2 \cdot \frac{10^4}{f^2}$	$4 \cdot \frac{10^4}{f^2}$	
8- 25 Hz	10.000	$\frac{4.000}{f}$	$\frac{5.000}{f}$	
0,025- 0,8 kHz	$\frac{250}{f}$	$\frac{4}{f}$	$\frac{5}{f}$	
0,8- 3 kHz	$\frac{250}{f}$	5	6,25	
3- 150 kHz	87	5	6,25	
0,15- 1 MHz	87	$\frac{0,73}{f}$	$\frac{0,92}{f}$	
1- 10 MHz	$\frac{87}{f^{\frac{1}{2}}}$	$\frac{0,73}{f}$	$\frac{0,92}{f}$	
10- 400 MHz	28	0,073	0,92	2
400- 2.000 MHz	$1,375 \cdot f^{\frac{1}{2}}$	$0,0037 \cdot f^{\frac{1}{2}}$	$0,0046 \cdot f^2$	$\frac{f}{100}$
2- 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Notes:

- f segons s'indica a la columna de gamma de freqüència. Per a 50 Hz, el nivell de referència de camp electromagnètic serà:

$$\frac{5}{f} = \frac{5}{0,050} = 100 \mu T$$

- Per a freqüències de 100 kHz a 10 GHz, la mitjana de S_{eq} , E_2 , H_2 i B_2 , ha de calcular al llarg d'un període qualsevol de sis minuts.
- Per a freqüències superiors a 10 GHz, la mitjana de S_{eq} , E^2 , H^2 i B^2 , s'ha de calcular al llarg d'un període qualsevol de $\frac{68}{f^{1,05}}$ minuts (f en GHz).
- No s'ofereix cap valor de camp E per freqüències < 1 Hz. La major part de les persones no percebrà les càrregues elèctriques superficials amb resistències de camp inferiors a $25 \frac{kV}{m}$. En qualsevol cas, s'han d'evitar les descàrregues d'espurnes, que causen estrès o molèsties.

B.7.6 Resultats experimentals

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, hi ha una línia elèctrica soterrada de 25 kV que va des del parc eòlic a la subestació de transformació.

Com que els conductors van molt junts en petites distàncies es poden considerar un focus puntual. Però, el camp magnètic és 0 perquè al anar desfasades les tres fases, els camps magnètics valen 0.

L'efecte teòric a 50 Hz, sense harmònics de la línia, es veu afectat pel transformador i tot l'aparellatge. Les mesures experimentals dona la següent forma d'ona del camp electromagnètic B, a 10 i a 15 m del transformador, amb uns valors de 28 μT i 11,2 μT , es poden observar a la Figura 10.

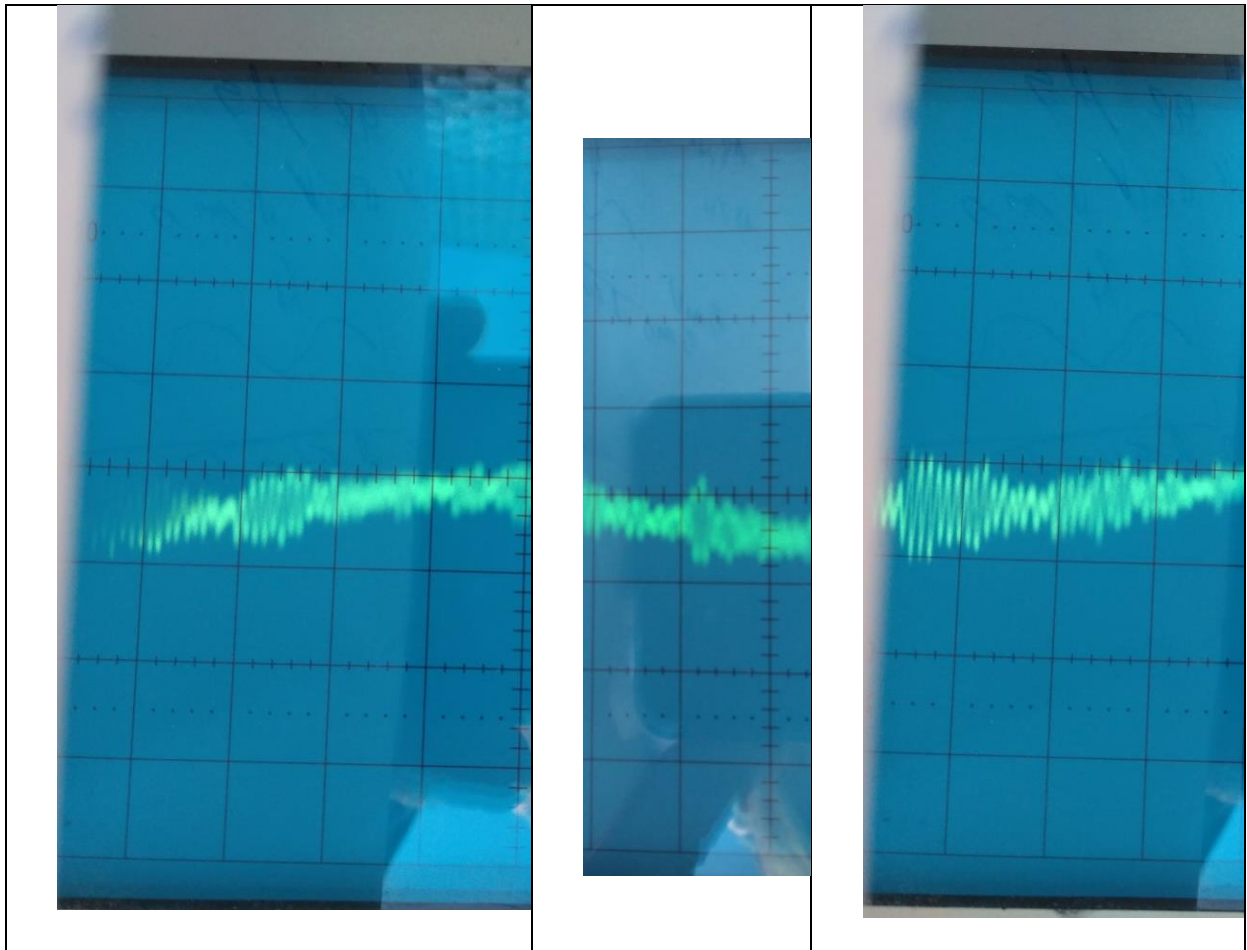


Figura 10. Resultats experimentals a 10 i a 15 metres del transformador

Tal i com s'ha esmentat anteriorment. La superposició de totes aquestes contribucions dona un valor de camp electromagnètic en mòdul de $28 \mu T$ i $11,2 \mu T$. Aquest valor és inferior a les $100 \mu T$, del Quadre 2, de Nivells de referència per a camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz- 300 GHz, valors rms impertorbats), del Reial Decret 1066/2001, de 28 de setembre, pel qual s'aprova el Reglament que estableix condicions de protecció del domini públic radioelèctric, restriccions a les emissions radioelèctriques i mesures de protecció sanitària davant d'emissions radioelèctriques.

C CÀLCULS ELÈCTRICS DE LA LÍNIA AÈRIA

La línia aèria de 110 kV anirà des de la subestació de transformació fins a la subestació de seccionament.

L'apartat 4.1 de la ITC-07 del LAT indica que s'han de realitzar els càlculs dels paràmetres següents de la línia aèria:

- Intensitat màxima
- Caiguda de Tensió
- Caiguda de Potència

Les característiques necessàries de la línia per tal de realitzar els càlculs elèctrics es poden observar a la Taula 11.

Taula 11. Característiques Generals

CARACTERÍSTIQUES GENERALS	
Tensió nominal (kV)	110
Tensió més elevada (kV)	123
Freqüència (Hz)	50
Conductor aeri	242-AL1/39- ST1A (LA-280)
Número de circuits	Un
Factor de potència	0,9
Número de conductors per fase	Un (Síplex)
Longitud de la línia (km)	1

Les característiques del conductor que s'utilitzarà per la línia aèria, 242-AL1/39-ST1A (LA-280 Hawk), es poden observar a la Taula 12.

Taula 12. Característiques conductor 242-AL1/39-ST1A (LA-280)

Denominació	242-AL1/39-ST1A (LA-280)
Composició	26 de 3,44 mm (Al)+7 de 2,68mm (Ac)
Secció total	281,1 mm ²
Diàmetre total	21,8 mm
Intensitat màxima admissible	582 A
Resistència elèctrica a 20°C	0,1195 Ω/km

C.1 Intensitat màxima admissible

L'apartat 4.2.1 de la ITC-07 del RLEAT indica que les densitats de corrent màximes en règim permanent no han de sobrepassar uns valors específics.

Per una secció nominal del cable d'alumini de 250 mm², la densitat de corrent és de 2,30 A/mm². Per altra banda, per una secció de 300 mm², la densitat de corrent disminueix a 2,15 A/mm².

El conductor disposa d'una secció de 281,1 mm². Aquesta secció en concret no es troba a la taula 11 de l'apartat 4.2.1 del ITC-07 LAT. Per tant, s'interpola per a la secció del cable utilitzat (281,1 mm²) per tal de poder trobar la densitat de la secció en qüestió.

$$\frac{2,15 - 2,30}{300 - 250} = \frac{\sigma - 2,30}{281,1 - 250} \rightarrow \sigma = 2,207 \text{ A/mm}^2$$

En aquest mateix apartat del LAT, indica que pels cables d'alumini-acer amb composició 26+7, s'ha d'aplicar un coeficient corrector a la densitat de corrent de 0,937.

Per tant,

$$\sigma_c = \sigma \cdot f_c = 2,207 \cdot 0,937 = 2,068 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

La intensitat màxima admissible pel conductor es troba mitjançant l'equació (37).

$$I_{max} = \sigma_{max} \cdot S \quad (37)$$

On:

- σ_{max} és la densitat màxima
- S és la superfície total del conductor

Per tant, substituint valors s'obté una intensitat màxima de:

$$I_{max} = 2,068 \cdot 281,1 = 581,22 \text{ A}$$

C.2 Potència màxima a transportar

La intensitat màxima marca la potència màxima que pot transportar la línia en qüestió, suposant una caiguda de tensió del 5%, que ve donada per l'equació (38).

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot U_N \cdot I_{max} \cdot \cos(\varphi) \quad (38)$$

On:

- U_N : tensió nominal de la línia (110 kV)
- $I_{m\grave{a}x}$: intensitat màxima del conductor (581,22A)
- $\cos \varphi$: factor de potència de la línia (0,9)

Substituint els valors s'obté una potència màxima amb una caiguda de tensió del 5%.

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot 110 \cdot 581,22 \cdot 0,9 = 94,67 \text{ MW}$$

Si no es té en compte la caiguda de tensió, s'obté la següent potència màxima:

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 581,22 \cdot 0,9 = 99,66 \text{ MW}$$

C.3 Resistència elèctrica

La resistència elèctrica del conductor de la línia varia amb la temperatura. A efectes de càlcul s'ha d'utilitzar el valor corresponent a 75°C, considerat com resultant de la temperatura ambient més la que adquireix el conductor pel pas de la càrrega. El càlcul es pot observar a l'equació (39).

$$R'_\theta = R'_\beta \cdot [1 + \alpha_\beta \cdot (\theta - \beta)] \quad (39)$$

On:

- R'_β és la resistència del conductor en corrent continua a la temperatura β (0,1194 Ω/km)
- α_β és el coeficient de temperatura (0,00407 $^\circ\text{C}^{-1}$)
- θ és la temperatura de servei (75 $^\circ\text{C}$)
- β és la temperatura de 20 $^\circ\text{C}$

Per tant, substituint els valors, s'obté una resistència de:

$$R'_\theta = 0,1194 \cdot [1 + 0,00407 \cdot (75 - 20)] = 0,1461 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

D'aquesta manera, s'obté un valor de resistència elèctrica del conductor total de la línia:

$$R'_\theta = 0,1461 \frac{\Omega}{km} \cdot 1,013 km = 0,1480 \Omega$$

C.4 Reactància

Per trobar el valor de la caiguda de tensió, s'ha de calcular el valor de la resistència, reactància i susceptància de la línia.

La impedància és una magnitud que estableix la relació entre la tensió i la intensitat de corrent. La impedància es descriu segons l'equació (40).

$$Z_k = R_k + jX_k \quad (40)$$

On:

- R_k és la resistència per km.
- X_k és la reactància d'autoinducció per km que està definida per l'equació (41).

$$X_k = L_k \cdot \omega \quad (41)$$

On:

- ω és la pulsació de la corrent. Es troba definida per l'equació (42).
- L_k és el coeficient d'autoinducció en H/km, obtingut de l'equació (43).

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (42)$$

On:

- f és la freqüència (50 Hz)

$$L_k = \left[0,5 + 4,605 \cdot \log \frac{DMG}{r_{eq}} \right] \cdot 10^{-4} \quad (43)$$

On DMG i r_{eq} corresponen a la distància mitja geomètrica entre conductors i el radi equivalent del feix de subconductors, respectivament. El càlcul DMG per a simple circuit es pot observar a l'equació (44). Pel que fa al radi equivalent, al tenir una configuració símplex, serà directament el radi del conductor (mm).

Aquests paràmetres depenen del tipus de creueta que s'utilitzi. La creueta depèn del tipus de torre.

$$DMG = \sqrt[3]{D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{1-3}} \quad (44)$$

On:

- $D_{i,j}$ es calcula segons l'equació (45), l'equació (46) i l'equació (47). (mm)

$$D_{1-2} = \sqrt{(2 \cdot A)^2 + B^2} \quad (45)$$

$$D_{2-3} = \sqrt{(2 \cdot A)^2 + B^2} \quad (46)$$

$$D_3 = 2 \cdot B \quad (47)$$

El valor de D es calcula segons la creueta que s'ha considerat en el projecte. La disposició es pot observar a la Figura 11.

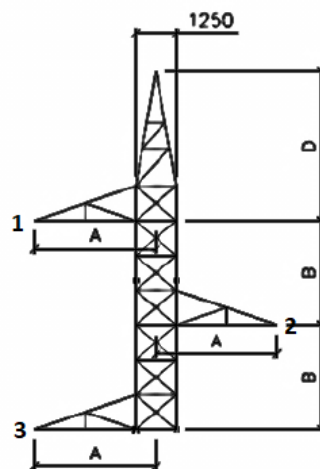


Figura 11. Disposició de la creueta

Les mides de la creueta considerada es poden observar a la Taula 13. El model de la creueta és la TC62 de la sèrie Amberes, de la marca FUNTAM.

Taula 13. Mides de la creueta

Creueta	a (m)	b (m)	d (m)
TC62	3,00	3,00	4,30

Substituint els valors, es troben les següents distàncies:

$$D_{1-2} = \sqrt{(2 \cdot 3000)^2 + 3000^2} = 6708 \text{ mm}$$

$$D_{2-3} = \sqrt{(2 \cdot 3000)^2 + 3000^2} = 6708 \text{ mm}$$

$$D_{1-3} = 2 \cdot 3000 = 6000 \text{ mm}$$

Per tant, la distància mitja geometria (DMG), és la següent:

$$DMG = \sqrt[3]{D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{1-3}} = \sqrt[3]{6708 \cdot 6708 \cdot 6000} = 6463,30 \text{ mm}$$

En conclusió, els valors obtinguts es poden observar a la Taula 14.

Taula 14. Valors obtinguts

X_L (Ω/km)	0,4168
DMG (mm)	6463,304
RMG' (mm)	10,9
L (H/km)	0,0013269

Per tant, la reactància total és:

$$X_L = 0,4168 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 1,016 \text{ km} = 0,4222 \Omega$$

La impedància total de la línia és:

$$Z_k = 0,1480 + j0,422 \Omega$$

C.5 Caiguda de tensió

El valor de la caiguda de tensió es calcula a partir de l'equació (48).

$$\Delta U\% = \frac{R_k + X_k \cdot \operatorname{tg}\varphi}{U^2} \cdot P \cdot L \cdot 100 \quad (48)$$

On:

- P és la potència activa considerada per una intensitat de càrrega determinada (les intensitats màximes obtingudes anteriorment o per les condicions habituals de servei).

Es considera un $\cos\varphi=0,9$ per tant l'angle φ és de $25,84^\circ$.

$$\Delta U\% = \frac{0,1480 + 0,422 \cdot \operatorname{tg}25,84}{110^2} \cdot 99,66 \cdot 100 = 0,29 \%$$

Es pot observar que la caiguda de tensió compleix ja que és molt inferior al valor màxim recomanat per aquest tipus d'instal·lació.

C.6 Pèrdua de potència

Pel que fa a la pèrdua de potència, bàsicament són produïdes per l'efecte Joule, que venen donades per l'equació (49).

$$Pèrdues (W) = I^2 \cdot R \cdot L \cdot 3 \quad (49)$$

On:

- I és la intensitat nominal de la línia que es troba amb l'equació (50) (A).
- R és la resistència del cable (Ω/km)
- L és la longitud de la línia (km)

$$I = \frac{P_{total}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)} \quad (50)$$

On:

- P_{total} és la potència màxima de la instal·lació (kW), calculada a partir de l'equació (38).
- V és la tensió de la instal·lació (kV)

Les pèrdues de potència es calculen segons l'equació (51).

$$Pèrdues (\%) = \frac{Pèrdues (W)}{P_{total}} \cdot 100 \quad (51)$$

A la Taula 15 es poden observar els valors calculats per tal de trobar la pèrdua de potència. Els càlculs reflecteixen una pèrdua de potència inferior al 3%.

Taula 15. Valors dels paràmetres per la pèrdua de potència

Intensitat màxima (A)	581,2
Potència màxima (MW)	99,66
Pèrdues (W)	150.061
Pèrdues (%)	1,50

Dels càlculs exposats es dedueix que el conductor escollit (LA-280) es vàlid per les necessitats de les instal·lacions, complint amb totes les condicions exigides tant pel que fa a la caiguda de tensió, com la capacitat de transport i les pèrdues de potència.

C.7 Efecte corona

D'acord amb l'apartat 4 de la ITC-LAT 07, a les línies de tensió nominal superior a 66 kV, s'ha de comprovar el comportament dels conductors en front a l'efecte corona. Per això, en el present apartat es determina la tensió crítica disruptiva d'aparició de l'efecte corona per tal de verificar que els resultats obtinguts són inferiors als valors a partir del qual es produeix tal pertorbació.

Es determina la tensió crítica que apareix de l'efecte corona amb la suficient aproximació a partir de la llei empírica establerta per *F.W Peek* que per fases simples es correspon a l'expressió de l'equació (52).

$$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot m_c \cdot \delta \cdot m_t \cdot r \cdot \ln \left(\frac{DMG}{r_{eq}} \right) \quad (52)$$

On:

- U_c és la tensió crítica disruptiva
- m_c és el coeficient de rugositat del conductor, comprès entre 0,83 i 0,87 pel cas de conductors cablejats. En el present projecte es considera un valor de 0,85.

- 29,8 és el valor màxim o de cresta, en kV/cm, de la rigidesa dielèctrica de l'aire a 25°C de temperatura i a la pressió baromètrica de 76 cm de columna de mercuri.
- m_t és el coeficient meteorològic o "factor de mal temps" que es té en consideració l'efecte de la humitat sobre la tensió crítica disruptiva. En el cas més desfavorable, que és per temps humit, s'agafa un valor de 0,8
- r_{eq} és el radi equivalent, que per una configuració símplex és igual al radi del conductor, en cm
- DMG és la Distància Mitja Geomètrica, en cm.
- R és el radi del conductor en cm
- δ és el factor corrector de la densitat de l'aire en funció de l'altura sobre el nivell del mar i la temperatura. Aquesta factor resulta directament proporcional a la pressió baromètrica i inversament proporcional a la temperatura de l'aire. Es determina a través de l'equació (53).

$$\delta = \frac{3,921 \cdot h}{273 + t} \quad (53)$$

On:

- t és la temperatura màxima corresponent a l'altitud del punt considerat en °C (en el present projecte es considera una temperatura de 14,4 °C)
- h és la pressió baromètrica en cm de columna de mercuri a l'altura mitja de la línia (aproximadament a 40 metres en el present projecte). Aquesta expressió, que depèn de l'altitud sobre el nivell del mar en el punt considerat, habitualment es determina a través de la fórmula de Halley, que es troba segons l'equació (54).

$$\log(h) = \log(76) - \frac{y}{18.336} \rightarrow h = 10^{\log(76) - \frac{y}{18.336}} \quad (54)$$

On:

- y és l'altitud sobre el nivell del mar, en m.

Per tant, la pressió baromètrica en cm de columna de mercuri a una altura sobre el nivell del mar de 40 metres serà de:

$$h = 10^{\log(76) - \frac{40}{18336}} = 75,62 \text{ cm}$$

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, es suposarà una temperatura mitjana de 14,4 °C.

Per tant, el factor corrector de l'aire és el següent:

$$\delta = \frac{3,921 \cdot 75,62}{273 + 14,4} = 1,031$$

D'aquesta forma es pot calcular el valor de la tensió crítica disruptiva.

Si es considera temps sec ($m_T=1$):

$$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,031 \cdot 1 \cdot 1,09 \cdot \ln\left(\frac{646}{1,09}\right) = 222,58 \text{ kV}$$

$$U_c = 222,58 \text{ kV} > 123 \text{ kV}$$

Si es considera temps humit ($m_T=0,8$)

$$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,031 \cdot 0,8 \cdot 1,09 \cdot \ln\left(\frac{775}{1,09}\right) = 183,15 \text{ kV}$$

$$U_{c,1} = 183,15 \text{ kV} > 123 \text{ kV}$$

En condicions habituals de funcionament de la instal·lació, per una línia de 110 kV, la tensió màxima eficaç serà de 123 kV, inferior a la tensió crítica disruptiva calculada. Per tant, en aquestes condicions, no es produiran pèrdues apreciables per l'efecte corona.

Al no tenir pèrdues apreciables per l'efecte corona i no tenir pèrdues apreciables pels aïlladors, la perditància per km, que es calcula segons l'equació (55), serà igual a 0.

$$G_k = [P_A + P_{EC}] \cdot \frac{10^{-3}}{V^2} \quad (55)$$

On:

- $G_k =$ Perditància o conductància quilomètrica $\left[\frac{S}{km}\right]$.
- $P_A =$ Pèrdues en els aïlladors $\left[\frac{kW}{km}\right]$.
- $P_{EC} =$ Pèrdues per efecte corona $\left[\frac{kW}{km}\right]$.
- $V =$ Tensió de servei per fase de la línia.

C.8 Susceptància

La susceptància és la part imaginària de la inversa de la impedància, que es calcula segons l'equació (56).

$$Y = \frac{1}{R + Xj} = \frac{R}{R^2 + X^2} - \frac{X}{R^2 + X^2}j \quad (56)$$

L'equació (57) serveix per calcular la susceptància per kilòmetre de la línia.

$$B_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \left[\frac{S}{km} \right] \quad (57)$$

La capacitat per unitat de longitud es calcula segons l'equació (58).

$$C = m \cdot \frac{24,2}{\log \frac{D_m}{r_{eq}}} \cdot 10^{-9} \left[\frac{F}{km} \right] \quad (58)$$

On:

- m = Nombre de circuits.
- n = Nombre de subconductors del feix.
- D_m = Separació mitjana geomètrica entre conductors en mm.
- r_{eq} = Radi equivalent del feix de conductors en mm.
- $r_{eq} = r$ [mm]. Per a casos de configuració símplex.
- $r_{eq} = \sqrt{r \cdot d}$ [mm]. Per a casos de configuració dúplex. Essent d la separació entre conductors dúplex.

Si es substitueixen els valors, tenim una capacitat per unitat de longitud de:

$$C = \frac{24,2}{\log \frac{D_m}{r_{eq}}} \cdot 10^{-9} = \frac{24,2}{\log \left(\frac{6463,30}{10,9} \right)} \cdot 10^{-9} = 8,72 \cdot 10^{-9} \frac{F}{km}$$

C.9 Posada a terra dels suports

Es realitzarà el sistema de posada a terra dels suports segons estableix “REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN” aprobado mediante Real Decreto RD 223/2008 en el Consejo de Ministros del 15 de febrero de 2008 en el apartado 7 de la instrucción técnica complementaria ITC-LAT 07 “Líneas aéreas con conductores desnudos”.

Es considera que la línia disposa d'un sistema de desconnexió automàtica, amb un temps de desacoblament inferior a 1 segon.

C.9.1 Classificació dels suports segons la seva ubicació

Per tal d'identificar els suports en els que s'han d'assegurar els valors admissibles de les tensions de contacte i, segons l'apartat 7.3.4.2 de la ITC-07, s'han classificat els suports segons la seva ubicació.

Els suports freqüentats estan situats en llocs d'accés públic i on la presència de persones alienes a la instal·lació elèctrica és freqüent: on s'espera que les persones es quedin durant un temps relativament llarg, algunes hores al dia durant varies setmanes, o per un temps curt però moltes vegades al dia.

No s'inclouran llocs amb ocupació ocasional com boscos.

Els suports no freqüentats estan situats en llocs que no són d'accés públic o on l'accés de persones és poc freqüent.

Segons el tipus de suport, el sistema de posada a terra ha de complir els requisits esmentats a la Taula 16.

Taula 16. Requisits del sistema de posada a terra

Tipus de suport	Requisits de sistema de posada a terra
Suport freqüentat	<p>Correcta actuació de les proteccions</p> <p>Complir tensions de contacte admissibles</p> <p>Dimensionament davant els efectes del llamp</p>
Suport no freqüentat	Correcta actuació de les proteccions

En el cas que ens ocupa, els suports són de tipus no freqüentat ja que l'accés de persones és poc freqüent.

C.9.2 Línia de terra

Un dels elements de la posada a terra és la línia de terra. La línia de terra serveix per unir l'estructura metàl·lica dels suports amb l'elèctrode de posada a terra que es troba enterrat. El conductor que s'ha d'utilitzar ha de suportar el total del corrent de falta ja que, en cas que hi hagi una falta, la totalitat del corrent circularà per aquest conductor.

L'apartat 7.3.2.2 de la ITC-07 estableix que la secció mínima del conductor d'acer de la línia de terra és de 50 mm², essent un total de 4 conductors. Cada suport disposarà de dues línies de terra instal·lades als costats oposats del suport.

C.9.3 Elèctrode de posada a terra

Al ser suports no freqüentats, la instal·lació constarà de dues piques de difusió vertical de 2 metres de longitud i 14 mm de diàmetre.

En tots els casos, la part visible del cable de coure fins al punt d'unió amb el suport es protegirà amb un tub de PVC rígid i, a la unió amb la pica enterrada, es col·locarà pasta aïllant per evitar humitat que malmeti per oxidació aquest unió.

C.9.4 Dimensionament de la posada a terra respecte a la resistència tèrmica

Segons l'apartat 7.1 de la ITC-07 del RLEAT, el sistema de posada a terra ha de ser dimensionat per a que resisteixi als esforços mecànics i a la corrosió. Que resisteixi, des d'un punt de vista tèrmic, al corrent de falta més elevat; per a que garanteixi la seguretat de les persones respecte a tensions que apareguin durant una falta a terra als sistemes de posada a terra i per a que protegeixi de danys a propietats i equips i garantir la fiabilitat de la línia.

Tal i com s'estableix a l'apartat 3.7.2.1 de la ITC-07, la línia de terra ha de suportar la totalitat del corrent de falta. Tot i així, en el cas de l'anell difusor, es suficient que suporti la mitat del corrent ja que, una vegada a la malla anular de coure, el corrent es dividirà entre els dos camins de pas possibles.

C.9.5 Dimensionament de la posada a terra respecte a la seguretat de les persones

Quan es produeix una falta a terra, algunes parts de la instal·lació es poden posar en tensió, cosa que suposa un risc per a les persones o animals que es puguin trobar a la zona i per tant estiguin en contacte amb la instal·lació.

Per tant, l'apartat 7.3.4 de la ITC-07 del RLEAT estableix que la posada a terra ha de dimensionar-se de tal manera que eviti aquest risc. segons l'apartat 7.3.6 de la mateixa ITC, aquest criteri només és necessari en suports freqüentats.

C.9.6 Dimensionament de la posada a terra respecte a protegir contra els efectes dels llamps

Es realitzarà per cada pota una toma de terra amb les següents figures en funció del tipus de fonamentació: Fonamentació en terra, mixta o en roca.

La toma de terra es completarà amb la realització d'una rasa de 0,40 m d'ample i 0,60 metres de profunditat constituint un anell situat al voltant del suport a un metre dels muntants.

Si és de roca serà de 0,40 X 0,80 metres.

L'anell de posta a terra estarà constituït per varetes d'acer descarburat de 50 mm² de secció, utilitzant vareta doble separada 0,40 metres entre sí com s'indica a les Figura 11 i Figura 12 i Figura 13.



Figura 12. Disposició de la rasa



Figura 13. Disposició de les varetes

Els valors admissibles de la tensió de contacte aplicada, U_{ca} , segons estableix el Reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en línies elèctriques d'alta tensió en l'apartat 7.3.4.1 de la ICT-LAT 07 a la qual pot estar sotmès el cos humà entre la mà i els peus nus, en funció de la durada del corrent de falla, es mostra a la Taula 17.

Taula 17. Tensió de contacte aplicada admissible en funció de la durada del corrent de falla

Durada del corrent de falla t_f (s)	Tensió de contacte aplicada admissible U_{ca} (V)
0,05	735
0,10	633
0,20	528
0,30	420
0,40	310
0,50	204
1,00	107
2,00	90
5,00	81
10,00	80
> 10.00	50

Per una durada del corrent de falla de 0,5 segons, es considerarà una tensió de contacte aplicada admissible de $U_{ca} = 204$ V.

En els suports no freqüentats, el temps de desconexió automàtica en les línies de categoria especial és inferior a 1 segon pel que segons estableix el Reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en línies elèctriques d'alta tensió en l'apartat 7.3.4.3 de la ICT-LAT 07, en el disseny de sistema de posada a terra d'aquests suports no serà obligatori garantir, a un metre de distància del suport, valors de tensió de contacte inferiors als valors admissibles.

En definitiva, el disseny de sistema de posada a terra es considerarà satisfactori des del punt de vista de la seguretat de les persones, però, el valor de la resistència de posada a terra serà prou baix per garantir la actuació de les proteccions en cas de defecte a terra.

D CÀLCULS MECÀNICS LÍNIA ELÈCTRICA

Segons l'apartat 3.1 de la ITC-07 del RLEAT, pel càlcul mecànic dels elements constituents de la línia, s'han de considerar les càrregues i sobrecàrregues següents: càrregues permanents, forces del vent sobre els components de les línies aèries i sobrecàrregues motivades pel gel. En cas que ens ocupa s'operarà sobre els conductors de línia.

D.1 Càrregues permanents

Pel que fa a les càrregues permanents, es consideren les càrregues verticals degudes al pes propi dels elements. En aquest cas serà el pes propi del conductor o el cable de terra o comunicacions.

D.2 Forces del vent sobre la línia aèria

Es considerarà un vent mínim de referència de 120 km/h de velocitat, excepte en les línies de categoria especial, on es considerarà un vent mínim de 140 km/h de velocitat.

Es suposa un vent horitzontal, actuant perpendicularment a les superfícies sobre les que incideix.

D.3 Forces del vent sobre les cadenes d'aïlladors

La força del vent sobre cada cadena d'aïllador es pot calcular amb l'equació (59).

$$F_c = q \cdot A_i \text{ (daN)} \quad (59)$$

On:

- A_i és l'àrea de la cadena d'aïlladors projectada horitzontalment en un pla vertical paral·lel a l'eix de la cadena d'aïlladors, m^2 .
- q és la pressió del vent per les cadenes d'aïlladors, que es calcula segons l'equació (60).

$$q = 70 \cdot \left(\frac{V_v \left[\frac{km}{h} \right]}{120} \right)^2 \frac{daN}{m^2} \quad (60)$$

D.4 Sobrecàrregues motivades pel gel

En el cas que ens ocupa, la instal·lació estarà situada a la Zona A, ja que es troba a menys de 500 metres d'altitud sobre el nivell del mar.

Tal i com indica l'apartat 3.1.3 del ITC-LAT 07 i tal i com es pot observar a la Figura 14, al ser Zona A, no s'han de tenir en compte la sobrecàrrega motivada pel gel.

Las sobrecargas serán las siguientes:

- Zona A: No se tendrá en cuenta sobrecarga alguna motivada por el hielo.
- Zona B: Se considerarán sometidos los conductores y cables de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor: $0,18 \times \sqrt{d}$ daN por metro lineal, siendo d el diámetro del conductor o cable de tierra en milímetros.
- Zona C: Se considerarán sometidos los conductores y cables de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor: $0,36 \times \sqrt{d}$ daN por metro lineal, siendo d el diámetro del conductor o cable de tierra en milímetros. Para altitudes superiores a 1500 metros, el proyectista deberá establecer las sobrecargas de hielo mediante estudios pertinentes, no pudiéndose considerar sobrecarga de hielo inferior a la indicada anteriormente.

Figura 14. Condicions de les hipòtesis que limiten la tracció màxima admissible

D.5 Distàncies de seguretat, creuament i paral·lelismes

D.5.1 Distàncies dels conductors al terreny

L'altura mínima dels conductors al terreny, estant aquells en la seva posició de màxima fletxa vertical, ha de ser la que resulti d'aplicar l'equació (61).

$$H = D_{add} + D_{el} = 5,3 + D_{el} \quad (61)$$

On:

- D_{add} és la distància d'aïllament addicional (m)
- D_{el} és la distància d'aïllament elèctrica. Aquest valor es troba tabulat a l'apartat 5.2 de la ITC-LAT 07, en funció de la tensió més elevada de la línia. Per 123 kV D_{el} equival a 1.

Per tant, l'altura mínima dels conductors al terreny serà de:

$$H = 5,3 + 1 = 6,3 \text{ m}$$

S'adoptarà un mínim de 8 metres.

La fletxa màxima s'obté en les hipòtesis considerades en apartats posteriors. Per tant, s'haurà d'escollir un suport que amb fletxa màxima el conductor estigui a una alçada superior a 8 metres respecte el terreny.

D.5.2 Distàncies entre conductors i accessoris en tensió a suports

A l'apartat 5.4.2 de la ITC-LAT 07 s'estableix que la separació mínima entre conductors i els seus accessoris en tensió i els suports no serà inferior a D_{el} amb un mínim de 0,2 metres.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, D_{el} , per una tensió de línia de 110 kV, té un valor de 1 metre.

En el cas de les cadenes de suspensió, es consideraran els conductors i la cadena d'aïlladors desviats sota l'acció de la meitat de la pressió de vent corresponent a un vent de velocitat 120 km/h. A aquests efectes es considerarà la tensió mecànica del conductor sotmès a l'acció de la meitat de la pressió de vent corresponent a un vent de velocitat 120 km/h i a la temperatura de -5 °C per a zona A, de -10 °C per a zona B i de -15 °C per zona C. Per tant, en el cas que ens ocupa serà a un vent de velocitat 140 km/h i a -5°C.

D.5.3 Distàncies entre conductors

La distància entre els conductors de fase del mateix circuit o circuits diferents ha de ser tal que no hi hagi cap risc de curtcircuit entre fases, tenint present els efectes d'oscil·lació dels conductors degut al vent i el despenjament de la neu acumulada sobre ells.

La separació mínima entre conductors de fase es determina segons l'equació (62).

$$D = K \cdot \sqrt{F + L} + K' \cdot D_{pp} \quad (62)$$

On:

- K és el coeficient de la oscil·lació dels conductors amb el vent. Els valors del coeficient K en funció de l'angle d'oscil·lació es poden observar a la Taula 18.

Taula 18. Valors del coeficient K en funció de l'angle d'oscil·lació

Angulo de oscilación	Valores de K	
	Líneas de tensión nominal superior a 30 kV	Líneas de tensión nominal igual o inferior a 30 kV
Superior a 65°	0,7	0,65
Comprendido entre 40° y 65°	0,65	0,6
Inferior a 40°	0,6	0,55

- K' és el coeficient que depèn de la tensió nominal de la línia. (Al ser una línia de tensió nominal superior a 30 kV, serà una K' de 0,75).
- F és la fletxa màxima en metres
- L és la longitud en metres de la cadena de suspensió. En el cas de conductors fixats al suport per cadenes d'amarratge o aïlladors rígids, $L=0$
- D_{pp} és la distància mínima aèria especificada per prevenir una descàrrega disruptiva entre conductors de fase durant sobretensions de front lent o ràpid. (Segons una tensió més elevada de la xarxa de 123 kV, el valor és de 1,15 metres)

L'angle d'oscil·lació es calcula segons l'equació (63).

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\text{Sobrecàrrega}}{\text{Pes propi}} \quad (63)$$

Es calcula aquest angle d'oscil·lació en funció si la sobrecàrrega és de vent o temperatura, ja que així ho indica el Reglament.

Per tant, si es substitueixen els valors, l'angle d'oscil·lació per la hipòtesis de vent és la següent:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1,48}{0,98} = 56,49^\circ \rightarrow \text{Mirant la taula } K = 0,65$$

L'angle d'oscil·lació per la hipòtesis de temperatura és el següent:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{0}{0,98} = 0^\circ \rightarrow \text{Mirant la taula } K = 0,6$$

A la Taula 19 es pot observar un resum del paràmetre K en funció de cada hipòtesi calculada (hipòtesis de vent i hipòtesis de temperatura).

Taula 19. Paràmetre K en funció de les hipòtesis

Conductor		Fletxa màxima vent				Fletxa màxima temperatura		
Tipus	Pes propi $\frac{daN}{m}$	Vent $\frac{km}{h}$	Sobre càrrega $\frac{daN}{m}$	Angle Oscil·	K	Temp (°C)	Angle Oscil	K
242-AL1	0,98	140	1,48	56,49°	0,65	85	0	0,6

Les condicions de fletxa màxima per la Zona A són les que indiquen el Real Decret 223/2008. Es poden observar a la Taula 20.

Taula 20. Condicions de fletxa màxima segons el reglament

Hipòtesi de vent	Pes propi, vent 140 km/h i una temperatura de +15°C (la velocitat mínima segons el reglament que s'ha de considerar és de 120 km/h).
Hipòtesi de temperatura	Pes propi i una temperatura de 85°C.
Hipòtesi de gel	Al ser Zona A no es considera aquesta hipòtesi ja que no hi ha sobrecàrrega de gel.

Per tant, si es calcula la fletxa màxima en aquestes condicions s'obté la separació mínima entre conductors de fase.

A la Taula 21 es pot observar la separació dels conductors per a cada suport. La fletxa màxima del vent i de la temperatura s'han calculat a l'apartat D.6.4. Forces i fletxes per a cada tram. La separació entre conductors s'ha calculat segons l'equació (62).

Taula 21. Separació dels conductors en funció de les hipòtesis considerades pel reglament

Suport	Alçada (m)	Tram (m)	Separació (m)	Fletxa màxima vent (m)	Separació conductor (m)	Fletxa màxima temperatura (m)	Separació conductor (m)	Separació armat
Pòrtic 1	40	Pòrtic-1	-17	0,12	1,084	0,64	1,341	> 1,20 m (d el)
1	40	1-2	-1	14,02	3,296	15,27	3,207	> 1,20 m (d el)
2	41	2-3	-5	14,11	3,486	15,36	3,376	> 1,20 m (d el)
3	46	3-4	-1	14,02	3,296	15,27	3,207	> 1,20 m (d el)
4	47	4-Pòrtic 2	16	0,11	1,079	0,61	1,33	> 1,20 m (d el)
Pòrtic 2	48							> 1,20 m (d el)

D.5.4 Distància entre conductors i parts posades a terra

La separació mínima entre els conductors i els seus accessoris en tensió i els suports no ha de ser inferior a D_{el} , amb un mínim de 0,2 m.

Els valors de D_{el} són els indicats, en funció de la tensió més elevada de la línia. En el cas del present projecte, per tractar-se d'una línia de 110 kV, li correspon una tensió més elevada de la xarxa de 123 kV, $D_{el} = 1 m$.

En el cas de les cadenes de suspensió, es consideraran els conductors i la cadena d'aïlladors desviats sota l'acció de la meitat de la pressió de vent corresponent a un vent de velocitat 140 km/h. A aquests efectes s'ha de considerar la tensió mecànica del conductor sotmès a l'acció de la meitat de la pressió de vent corresponent a un vent de velocitat 140 km/h i a la temperatura de -5°C per a zona A.

En aquest projecte les cadenes utilitzades són del tipus CS 160 230/4205 (segons designació N31E3) o 15x U160 BS (segons designació N31E2). Aquestes cadenes tenen una longitud de 2,190 m.

Amb aquesta longitud de cadenes es compleix en escriu el valor de $D_{el} = 1,20 m$, que és la distància entre conductors i parts posades a terra que assenyala el reglament.

En els casos torres en angle, i en els ponts de les creuetes exteriors d'aquestes torres, es podran incloure dispositius per a angle, com contrapesos, allargaments, aïllaments auxiliars...

Els contrapesos no s'han d'utilitzar en tota una línia de forma repetida, encara que es poden fer servir excepcionalment per reduir la desviació d'una cadena de suspensió, cas en què el projectista ha de justificar els valors de les desviacions i les distàncies al suport.

D.5.5 Distàncies al terreny, camins, sendes i cursos d'aigua no navegables

L'altura dels suports ha de ser la necessària perquè els conductors, amb la seva màxima fletxa vertical segons les hipòtesis de temperatura i de gel segons l'apartat 3.2.3 de la ITC-LAT 07, quedin situats per damunt de qualsevol punt del terreny, senda, viarany o superfícies d'aigua no navegables, a una altura mínima de:

$$D_{add} + D_{el} = 5,3 + D_{el} = 5,3 \text{ m} + 1 \text{ m} = 6,3 \text{ m}.$$

amb un mínim de 6 metres. No obstant això, en llocs de difícil accés aquestes distàncies poden ser reduïdes en un metre.

Les hipòtesis a considerar són les de l'apartat 3.2.3 de la ITC-LAT 07. És a dir:

- a) Hipòtesis de vent.– Sotmesos a l'acció del seu pes propi i a una sobrecàrrega de vent, segons l'apartat 3.1.2, per a una velocitat de vent de 140 km/h a la temperatura de + 15°C.
- b) Hipòtesis de temperatura.– Sotmesos a l'acció del seu pes propi, temperatura + 85°C.
- c) Hipòtesis de gel.– No s'aplica ja que la instal·lació del present projecte es troba a la Zona A.

Quan les línies travessin explotacions ramaderes encerclades o explotacions agrícoles l'altura mínima ha de ser de 7 metres, amb l'objecte d'evitar accidents per projecció d'aigua o per circulació de maquinària agrícola, camions i altres vehicles.

En la hipòtesi del càlcul de fletxes màximes sota l'acció del vent sobre els conductors, la distància mínima anterior es pot reduir en un metre, considerant-se en aquest cas el conductor amb la desviació produïda pel vent.

Entre la posició dels conductors amb la seva fletxa màxima vertical, i la posició dels conductors amb la seva fletxa i desviació corresponents a la hipòtesi de vent a) de l'apartat 3.2.3 de la ITC-LAT 07, les distàncies de seguretat al terreny estan determinades per la corba envoltant dels cercles de distància traçats en cada posició intermèdia dels conductors, amb un radi interpolat entre la distància corresponent a la posició vertical i a la corresponent a la posició de màxima desviació lineal de l'angle de desviació.

D.5.6 Distàncies a altres línies elèctriques aèries o línies de telecomunicació

Pel que fa als encreuaments amb línies elèctriques o telecomunicació aèries, serà d'aplicació l'apartat 5.6.1 de la ITC-LAT 07.

- La distància mínima entre els conductors de la línia inferior i les parts més pròximes del suport de la línia serà de 4 metres per una línia de 110 kV.

La mínima distància vertical entre els conductors de fase de les dues línies, en les condicions més desfavorables, no ha de ser inferior al que s'especifica a l'apartat 5.6.1 de la ITC-LAT 07. No serà inferior al que indica a l'equació (64).

$$D_{min} = D_{add} + D_{pp} \quad (64)$$

On:

- D_{add} és la distància addicional, que per una línia de 110 kV és de 3 metres.
- D_{pp} s'ha trobat anteriorment i és de 1,15 metres

Per tant, substituint els valors dona una distància mínima de:

$$D_{min} = 3 + 1,15 = 4,15 \text{ m}$$

En el cas de que la línia inferior tingui instal·lat cable de terra, la mínima distància vertical entre els conductors de fase de la línia elèctrica superior i els cables de terra de la línia inferior no han de ser inferior al que especifica a l'apartat 5.6.1 de la ITC-LAT.

$$D_{min} = D_{add} + D_{el} = 1,5 + D_{el} \text{ (amb un mínim de 2 metres)}$$

El valor de D_{el} s'indica a l'apartat 5.2 del ITC-LAT-07, en funció de la tensió més elevada de la línia. En el present projecte, per una tensió elevada de la línia de 123 kV el valor de D_{el} és de 1 metre.

Per tant, si es substitueixen els valors, es troba una distància mínima de:

$$D_{min} = 1,5 + 1 = 2,5 \text{ metres}$$

Pel que fa als paral·lelismes entre línies elèctriques aèries, serà d'aplicació el que disposa l'apartat 5.6.2 de la ITC-LAT 07. Es recomana una distància mínima igual a 1,5 vegades l'altura del suport més alt entre els conductors més pròxims de una i de l'altra línia.

Pel que fa als paral·lelismes entre línies elèctriques aèries i línies de telecomunicació, serà d'aplicació el que disposa l'apartat 5.6.3 de la ITC-LAT 07. Es manté entre les traces dels conductors més pròxims d'una i altra línia una distància mínima igual a 1,5 vegades l'altura de el suport més alt.

D.5.7 Distàncies a carreteres

Pel que fa als encreuaments entre carreteres serà d'aplicació el que disposa l'apartat 5.7.1 de la ITC-LAT 07.

L'altura mínima dels conductors sobre la rasant de la carretera compleix:

$$D_{min} = D_{add} + D_{el} \text{ (en metres)}$$

On:

- D_{add} és 6,3 per la categoria que ens ocupa.
- D_{el} és 1 per una tensió de 110 kV.

Substituint els valors, la distància mínima és de:

$$D_{min} = 6,3 + 1 = 7,3$$

A més, els suports s'han d'instal·lar preferentment fora de la zona afectada per la línia límit d'edificació.

La línia límit d'edificació es troba, mesurada des de la vora exterior de la calçada i en funció de la categoria de la carretera, a les distàncies indicades a continuació:

Per la xarxa de carreteres de l'Estat:

- Autopistes, autovies i vies ràpides: 50 metres
- Resta de carreteres de la xarxa estatal: 25 metres

Per la xarxa de carreteres autonòmiques de Catalunya:

- Autopistas i vies preferents: 100 metres
- Carreteres convencionals de la xarxa bàsica: 50 metres
- La resta de carreteres de les altres xarxes: 30 metres

En el cas que ens ocupa, la línia aèria objecte d'estudi passarà per un tram de l'AP-7, per tant al ser una carretera de l'Estat, la distància serà de 50 metres.

D.5.8 Distàncies a ferrocarrils electrificats i tramvies

L'alçada mínima dels conductors sobre el conductor més alt de totes les línies de la energia elèctrica, telefònica i telegràfica del ferrocarril no ha de ser inferior a l'especificada a l'apartat 5.9.1 de la ITC-LAT 07, on es compleix:

$$D_{min} = 3,5 + D_{el} \text{ (en metres)}$$

Si D_{el} és de 1 metre per una tensió de 110 kV, tenim una distància mínima de:

$$D_{min} = 3,5 + 1 = 4,5 \text{ metres}$$

En el cas que ens ocupa, no s'instal·len suports a prop dels ferrocarrils.

D.5.9 Distàncies a telefèrics i cables transportats

Serà d'aplicació el que disposa l'apartat 5.10.1 de la ITC-LAT 07.

La distància mínima vertical dels conductors de la línia elèctrica, amb la seva màxima fletxa vertical, i la part més elevada del telefèric, tenint en compte les oscil·lacions dels cables de mateix durant la seva explotació normal i la possible sobrelevació que pugui aconseguir per reducció de càrrega en cas d'accident serà de:

$$D_{min} = 4,5 + D_{el} \text{ (amb un mínim de 5 metres)}$$

Si D_{el} és de 1 metre per una tensió de 110 kV, tenim una distància mínima de:

$$D_{min} = 4,5 + 1 = 5,5 \text{ metres}$$

En el cas que ens ocupa, no s'instal·len suports a prop de telefèrics.

D.5.10 Distàncies a rius, navegables o flotables

La distància mínima vertical dels conductors, amb la seva màxima fletxa vertical, sobre la superfície de l'aigua per al màxim nivell que pugui assolir aquesta es calcula segons l'equació (65).

$$D_{min} = G + D_{add} + D_{el} \text{ en metres} \quad (65)$$

On:

- G és el gàlib (4,7 metres si no existeix un gàlib definit).
- D_{add} és de 2,3 metres per la línia que ens ocupa.
- D_{el} és de 1 metres per una tensió de 110 kV.

Per tant, si es substitueixen els valors, tenim una distància mínima de:

$$D_{min} = 4,7 + 2,30 + 1,00 = 8 \text{ metres}$$

D.5.11 Distàncies en boscos, arbres i masses d'arbrat

Quan es sobrevolin masses d'arbrat s'obriran carrers lliures de qualsevol vegetació que pugui afavorir un incendi, sempre que es compti amb l'autorització de l'organisme competent.

S'estableix una zona de protecció de la línia definida per la zona de servitud de vol, incrementada per la següent distància de seguretat a banda i banda d'aquesta projecció:

$$D_{min} = D_{add} + D_{el} = 1,5 + D_{el} \text{ (en metres)}$$

Si D_{el} és de 1 metre per una tensió de 110 kV, tenim una distància mínima de:

$$D_{min} = 1,5 + 1 = 2,5 \text{ metres}$$

En cas de no disposar del permís necessari per obrir el carrer, es mantindrà entre els conductors en la seva posició més desfavorable i la massa d'arbrat una distància vertical suficient per permetre el desenvolupament complet de l'espècie sobrevolada sense necessitat de realitzar podes periòdiques de la mateixa. Per tant la distància dels conductors a terra haurà de ser l'altura màxima de l'espècie sobrevolada, incrementada en la distància de la taula anterior expressada en funció de la tensió de la línia.

D.5.12 Distàncies en edificis, construccions i zones urbanes

Serà d'aplicació el que indica l'apartat 5.12.2 de la ITC-LAT 07

No es construiran línies per sobre d'edificis i instal·lacions industrials a la franja definida per la servitud de vol, incrementada per la següent distància mínima de seguretat a banda i banda:

$$D_{min} = D_{add} + D_{el} = 3,3 + D_{el} \text{ (amb un mínim de 5 metres)}$$

Si D_{el} és de 1 metre per una tensió de 110 kV, tenim una distància mínima de:

$$D_{min} = 3,3 + 1 = 4,3 \text{ metres}$$

S'observa que la distància calculada és inferior a la distància mínima exigida pel reglament, de manera que queda incrementada per una distància de seguretat a banda i banda de 5 metres.

No obstant això, en els casos de mutu acord entre les parts, les distàncies mínimes que hi ha d'haver en les condicions més desfavorables, entre els conductors de la línia elèctrica i els edificis o construccions que estiguin a sota seran les indicades en l'ap. 5.12.2 de la ITC-LAT 07.

- Sobre punts accessibles a les persones

$$D_{min} = 5,5 + D_{el} = 5,5 + 1,00 = 6,5 \text{ m (amb un mínim de 6 metres)}$$

- Sobre punts no accessibles a les persones:

$$D_{min} = 3,3 + D_{el} = 3,3 + 1,00 = 4,3 \text{ m (amb un mínim de 4 metres)}$$

A la Taula 22 es poden observar les distàncies en metres per a cada tipus de distància que indica el Reglament.

Taula 22. Distàncies mínimes que indica el reglament

Tipus de distància	Distància (m)
Entre els conductors i el terreny	6,3
Entre conductors i accessoris en tensió a suports	1
Entre conductors	Veure a la Taula 21
Entre conductors i a parts posades a terra	1,2
Distàncies al terreny, camins, sendes i cursos d'aigua no navegables	7
Encreuaments amb línies elèctriques o telecomunicació aèries	4
Distància vertical entre conductors de fase de les dues línies	4,15
Distància vertical entre els conductors de fase de la línia elèctrica superior i els cables de terra de la línia inferior	2,5
Encreuaments a carreteres	7,3
Distància entre carreteres	50
A ferrocarrils electrificats i tramvies	4,5
A telefèrics i cables transportats	5,5
Distància mínima vertical dels conductors a rius, navegables o flotables	8
Distàncies en boscos, arbres i masses d'arbrat	2,5
Distàncies en edificis, construccions i zones urbanes	5

D.6 Mètode càlcul mecànic

D.6.1 Equacions de la catenària

Per descriure la corba dels conductors flexibles subjectats entre dos punts i sotmesos a les càrregues de la gravetat i a altres càrregues com pot ser la càrrega de vent sobre els conductors, utilitzen les corbes de la catenària.

La posició en funció de l'ordenada x , de la força horitzontal (T_{hor}) i del pes del conductor per unitat de longitud (p) ve donada per l'equació (66), que es troba a la pàgina 25 del llibre del Dr. Julián Moreno Clemente.

$$y = \frac{T_{hor}}{p} \cdot Ch \frac{x}{\frac{T_{hor}}{p}} \quad (66)$$

La longitud de l'arc de la catenària es troba amb el sinus hiperbòlic, segons el que indica l'equació (67).

$$L = \frac{T_{hor}}{p} \cdot Sh \frac{x}{\frac{T_{hor}}{p}} \quad (67)$$

Partint d'una distància a , entre dos punts i un desnivell h entre aquests, es pot trobar una ordenada X situada a $\pm \frac{a}{2}$ dels dos suports de la següent manera.

$$z = \frac{h}{2 \cdot \frac{T_{hor}}{p} \cdot Sh \frac{a}{2 \cdot \frac{T_{hor}}{p}}} \quad (68)$$

$$X = \frac{T_{hor}}{p} \cdot \ln \left(z + \sqrt{z^2 + 1} \right) \quad (69)$$

$$x_1 = X - \frac{a}{2} \quad (70)$$

$$x_2 = X + \frac{a}{2} \quad (71)$$

$$y_1 = \frac{T_{hor}}{p} \cdot Ch \frac{x_1}{\frac{T_{hor}}{p}} \quad (72)$$

$$y_2 = \frac{T_{hor}}{p} \cdot Ch \frac{x_2}{\frac{T_{hor}}{p}} \quad (73)$$

La força en qualsevol punt del conductor es troba utilitzant l'equació (74) (pàgina 25 Dr. Julián Moreno Clemente)

$$T_1 = p \cdot y_1 \quad (74)$$

D.6.2 Equacions de canvi de condicions

Coneguda la corba de la catenària per a unes condicions inicials, es pot trobar la variació d'aquesta catenària si varia la temperatura o les condicions del pes propi o càrrega de vent.

Si augmenta la temperatura, l'augment de longitud del conductor de longitud L_0 , en funció del coeficient de dilatació lineal δ , es troba a partir de l'equació (75).

$$\delta(t - t_0) \cdot L_0 \quad (75)$$

Si les tensions dels conductors canvien, la variació de longitud del conductor, en funció del mòdul de Young E , ve donada per l'equació (76).

$$\frac{T_{hor1} - T_{hor0}}{S \cdot E} \cdot L_0 \quad (76)$$

Per trobar l'increment de longitud, s'hauria d'agafar la tensió mitjana entre el principi del tram i el final del tram.

Se suposa que l'ordre en què es produeixen els canvis és indiferent. Per exemple si primer es refreda un cable i després es tensa, el resultat és el mateix que si es tensa a la tensió final i després es refreda.

Si un conductor tensat entre dos extrems, es refreda, la seva longitud disminueix.

Aleshores la tensió entre els dos extrems augmenta per incrementar la seva longitud. El resultat d'increments de longitud tindrà un valor que complirà també, que sumat a la longitud inicial serà igual a la longitud de l'arc de la catenària amb la nova tensió incògnita.

La longitud de l'arc de la catenària entre les coordenades x_2 i x_1 es troba amb l'equació (77).

$$L = \frac{T_{hor1}}{p_1} \cdot \sinh \frac{x_2}{\frac{T_{hor1}}{p_1}} - \frac{T_{hor1}}{p_1} \cdot \sinh \frac{x_1}{\frac{T_{hor1}}{p_1}} \quad (77)$$

Igualant els dos membres, es troba l'equació simplificada, que és l'equació (78).

$$L_0 + \delta(t - t_0) \cdot L_0 + \frac{T_{hor1} - T_{hor0}}{S \cdot E} \cdot L_0 = \frac{T_{hor1}}{p_1} \cdot \sinh \frac{x_2}{\frac{T_{hor1}}{p_1}} - \frac{T_{hor1}}{p_1} \cdot \sinh \frac{x_1}{\frac{T_{hor1}}{p_1}} \quad (78)$$

En a l'equació (78) la incògnita és T_{hor1} .

Si en el primer membre de l'equació (78), $T_{hor1} - T_{hor0}$, se substitueixen per la tensió mitjana entre els dos extrems del tram, es poden ajustar més els resultats.

D.6.3 Equació del càlcul de la fletxa

A les equacions (79), (80) i (81) es poden observar les equacions que es fan servir per fer el càlcul de la fletxa en un tram.

$$x_f = \frac{T_{hor}}{p} \cdot \ln \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\frac{h^2}{a^2} + 1} \right) \quad (79)$$

$$y_f = \frac{T_{hor}}{p} \cdot \cosh \frac{x_f}{\frac{T_{hor}}{p}} \quad (80)$$

$$f = y_2 - \frac{h}{a} \cdot (x_2 - x_f) - y_f \quad (81)$$

El mètode explicat anteriorment s'ha adaptat en una fulla de càlcul de Excel, on el procediment per poder trobar la tensió màxima i la fletxa màxima és el que s'explica a continuació:

1. S'introdueixen les dades del conductor a l'apartat corresponent.

Les dades que s'introdueixen són les que es poden observar a la Taula 23.

Taula 23. Dades del conductor que s'introdueixen a la plantilla de l'Excel

Conductor	242-A11/39-St1A
Secció Alumini (mm²)	241,6
Secció Acer (mm²)	39,5
Secció Total (mm²)	281,1
Equivalent en coure (mm²)	151,9
Diàmetre (D) Ànima (mm)	8,04
Diàmetre (D) Total (mm)	21,8
Total Filferros Alumini	26
Diàmetre filferros Alumini (mm)	3,44
Total Filferros d'acer	7
Diàmetre filferros d'acer (mm)	2,68
Resistència a la tracció assignada (kN)	84,89
Resistència elèctrica en c.c (Ω/km)	0,1195
Massa per unitat de longitud (kg/km)	976,20
Mòdul d'elasticitat E (daN/mm²)	7300
Coefficient de dilatació lineal delta (mm·10⁻⁶)	18,9
Intensitat admissible màxima	581,2
CHS %	23
EDS %	15

Un cop introduïdes les dades a la plantilla de Excel, la plantilla calcula els següents paràmetres:

- Tensió màxima admissible

El coeficient de ruptura ha de ser de 3. Per tant, la tensió màxima admissible ha de ser de:

$$Tensió\ màxima\ admissible = \frac{8489\ daN}{3} = 2.829,67\ daN$$

- Càrrega de vent

Segons el que indica el RD 223/2008, la pressió del vent per un conductor de més de 16 mm de diàmetre es calcula segons l'equació (82).

$$q = 50 \cdot \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \cdot d \left(\frac{daN}{m}\right) \quad (82)$$

On:

- V_v és la velocitat del vent considerada. En el cas que ens ocupa és 140 km/h.
- d és el diàmetre del conductor en m (0,0218 mm).

Per tant, la càrrega de vent és:

$$q = 50 \cdot \left(\frac{140}{120}\right)^2 \cdot 0,0218 = 1,4836 \frac{daN}{m}$$

- Càrrega de gel

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, al estar en Zona A, no es tindrà en compte la sobrecàrrega provocada pel gel.

2. S'introdueixen les dades dels suports a la plantilla de l'Excel.

Les dades que s'introdueixen a la plantilla de l'Excel sobre els suports es poden observar a la Taula 24. L'alçada és l'alçada respecte el nivell del mar

Taula 24. Dades sobre els suports introduïdes a la plantilla de Excel

Suport	Funció	Alçada (m)	Tram	Separació entre suports
Pòrtic	Fi de línia	40,00	Pòrtic-1	20
1	Especial com Fi de línia	40,00	1-2	325
2	Amarrament	41,00	2-3	326
3	Amarrament	46,00	3-4	325
4	Especial com Fi de línia	47,00	4- Pòrtic	20
Pòrtic	Fi de línia	48,00		

Un cop s'introdueixen les dades, la plantilla de l'Excel calcula la diferència d'alçades.

Si els suports tenen la mateixa alçada, la diferència d'alçades es calcula com:

$$\begin{aligned}
 & \text{Diferència d'alçades (m)} \\
 & = \text{Alçada sobre nivell del mar suport 1} \\
 & \quad - \text{Alçada sobre el nivell del mar suport 2}
 \end{aligned}$$

Si els suports tenen diferents alçades, com per exemple entre un pòrtic i un suport, es calcula com:

$$\begin{aligned}
 & \text{Diferència d'alçades(m)} \\
 & = \text{Alçada sobre el nivell del mar suport 1} + \text{Alçada pòrtic} \\
 & \quad - \text{Alçada sobre el nivell del mar suport 2} - \text{Alçada suport}
 \end{aligned}$$

Tal i com es pot observar, s'ha de suposar una alçada pels pòrtics i una alçada pels suports.

Per realitzar el càlcul amb l'Excel es suposa una alçada del pòrtic de 11 metres i una alçada del suport de 28 metres, que són les mides que se solen agafar per fer aquest tipus de càlcul.

3. Es troba per cada tram, quina es la força horitzontal que fa que la tensió màxima al conductor no superi un terç de la càrrega de trencament. Per fer-ho, s'utilitza el Solver de l'Excel.
4. S'estudien les condicions de tracció màxima que diu el reglament per zona A (a vent 140 km/h i -5°C).
5. Aplicant l'equació de canvis de condicions es mira que a -5°C, no se superi del 15% de la càrrega de trencament en cap tram. S'escull el valor de força horitzontal més petita de tots els trams.
6. S'escull la menor força horitzontal (T_h) comparant el resultat dels punts 1 i 2.
7. A partir d'aquest moment s'apliquen les equacions de variació de condicions per a les hipòtesis tracció màxima i per fletxa màxima que estableix el reglament.

D.6.4 Forces i fletxes per a cada tram

Un cop aplicat la fulla d'Excel, ens dona la informació de la Taula 25 i la Taula 26.

Taula 25. Forces horitzontals per no sobrepassar en cap punt una força de 2.829,67 daN

Suport	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	T y1	T y2
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	2.144,47	2.829,67	2.799,47
1	40	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	2.813,95	2.829,67	2.827,89
2	41	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	2.809,97	2.829,67	2.820,79
3	46	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	2.813,95	2.829,67	2.827,89
4	47	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	2.198,44	2.801,25	2.829,67
Pòrtic	48								

Taula 26. Forces horitzontals per no sobrepassar un terç de la càrrega de trencament ni un 15% de la càrrega a -5°C a 140 km/h

Suport	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	T y1	T y2
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	1.739,00	2.297,53	2.267,34
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	1.739,00	1.763,90	1.762,12
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	1.739,00	1.767,80	1.758,92
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	1.739,00	1.763,90	1.762,12
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	1.739,00	2.212,90	2.241,32
Pòrtic	48,00								

Des de la Taula 27 fins a la Taula 41 es poden observar les forces horitzontals i la fletxa de cada tram per un canvi de condicions en concret.

Taula 27. Zona A a 15°C per aconseguir una EDS<15%

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	963,03	1.272,27	1.255,67	0,07	9,99
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	956,18	969,86	968,89	13,51	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	956,19	972,02	967,13	13,60	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	956,18	969,86	968,89	13,51	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	983,64	1.251,92	1.267,54	0,06	10,01
Pòrtic	48,00										

Taula 28. Zona A Vent (140 km/h) a -10°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	1.929,04	2.546,94	2.516,74	0,06	9,99
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	1.755,59	1.780,27	1.778,49	13,39	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	1.755,51	1.784,08	1.775,20	13,47	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	1.755,59	1.780,27	1.778,49	13,39	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	1.754,06	2.232,18	2.260,60	0,06	10,01
Pòrtic	48,00										

Taula 29. Zona A a -15°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	2.110,37	2.778,06	2.761,47	0,03	10,00
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	1.017,77	1.030,66	1.029,68	12,69	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	1.017,39	1.032,42	1.027,54	12,77	162,94
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	1.017,77	1.030,66	1.029,68	12,69	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	2.130,98	2.721,20	2.736,82	0,03	10,00
Pòrtic	48,00										

Taula 30. Vent 140 km/h + 15°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	1.004,67	1.333,84	1.303,65	0,12	9,98
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	1.676,56	1.702,36	1.700,58	14,02	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	1.676,89	1.706,57	1.697,69	14,11	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	1.676,56	1.702,36	1.700,58	14,02	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	1.025,63	1.299,41	1.327,82	0,11	10,02
Pòrtic	48,00										

Taula 31. Pes propi a 0°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	1.532,43	2.019,56	2.002,96	0,04	9,99
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	985,60	998,88	997,91	13,11	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	985,41	1.000,85	995,96	13,19	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	985,60	998,88	997,91	13,11	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	1.553,09	1.981,15	1.996,77	0,04	10,01
Pòrtic	48,00										

Taula 32. Pes propi a 5°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	1.340,98	1.768,29	1.751,70	0,05	9,99
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	975,50	988,92	987,94	13,24	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	975,37	990,94	986,06	13,33	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	975,50	988,92	987,94	13,24	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	1.361,65	1.735,99	1.751,61	0,05	10,01
Pòrtic	48,00										

Taula 33. Pes propi a 10°C

Suport	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	1.150,83	1.518,74	1.502,14	0,06	9,99
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	965,69	979,24	978,26	13,38	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	965,65	981,34	976,46	13,46	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	965,69	979,24	978,26	13,38	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	1.171,50	1.492,48	1.508,10	0,05	10,01
Pòrtic	48,00										

Taula 34. Pes propi a 20°C

Suport	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	779,82	1.031,84	1.015,24	0,08	9,99
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	946,93	960,75	959,77	13,64	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	946,99	962,95	958,06	13,73	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	946,93	960,75	959,77	13,64	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	770,00	978,34	993,96	0,08	10,01
Pòrtic	48,00										

Taula 35. Pes propi a 25°C

Suport	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	606,27	804,08	787,48	0,11	9,98
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	937,94	951,88	950,90	13,77	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	938,04	954,12	949,24	13,86	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	937,94	951,88	950,90	13,77	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	603,18	764,73	780,34	0,10	10,02
Pòrtic	48,00										

Taula 36. Pes propi a 30°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	453,06	603,03	586,43	0,14	9,98
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	929,18	943,24	942,27	13,91	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	929,33	945,53	940,65	13,99	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	929,18	943,24	942,27	13,91	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	450,00	568,59	584,21	0,14	10,02
Pòrtic	48,00										

Taula 37. Pes propi a 35°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	335,28	448,50	431,90	0,19	9,97
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	920,65	934,84	933,86	14,03	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	920,84	937,17	932,29	14,12	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	920,65	934,84	933,86	14,03	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	338,93	426,39	442,01	0,18	10,03
Pòrtic	48,00										

Taula 38. Pes propi a 40°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	257,79	346,84	330,25	0,25	9,96
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	912,34	926,66	925,68	14,16	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	912,57	929,03	924,15	14,25	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	912,34	926,66	925,68	14,16	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	262,00	327,92	343,54	0,24	10,04
Pòrtic	48,00										

Taula 39. Pes propi a 45°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	209,66	283,72	267,12	0,31	9,95
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	904,24	918,68	917,71	14,29	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	904,51	921,09	916,21	14,38	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	904,24	918,68	917,71	14,29	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	213,50	265,85	281,47	0,29	10,05
Pòrtic	48,00										

Taula 40. Pes propi a 50°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	178,59	242,99	226,39	0,36	9,94
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	896,34	910,91	909,93	14,42	162,49
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	896,65	913,35	908,47	14,50	162,93
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	896,34	910,91	909,93	14,42	162,49
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	182,49	226,18	241,80	0,34	10,06
Pòrtic	48,00										

Taula 41. Pes propi a 85°C

Support	Alçada m	Tram	Separació entre suports m	Diferència d'alçades m	Pes per m daN/m	Càrrega de vent 140 km/h	T horitzontal daN	Ty1 inici tram daN	Ty2 final tram daN	Fletxa m	Distància X1 a fletxa m
Pòrtic	40,00	Pòrtic-1	20	-17,00	0,98	1,48	100,56	140,81	124,21	0,64	9,90
1	40,00	1-2	325	-1,00	0,98	1,48	846,32	861,73	860,75	15,27	162,48
2	41,00	2-3	326	-5,00	0,98	1,48	846,82	864,36	859,47	15,36	162,92
3	46,00	3-4	325	-1,00	0,98	1,48	846,32	861,73	860,75	15,27	162,48
4	47,00	4- Pòrtic	20	16,00	0,98	1,48	102,95	124,55	140,17	0,61	10,10
Pòrtic	48,00										

A les pròximes taules es pot observar la tensió horitzontal i la fletxa de cada tram per cada hipòtesi que s'ha considerat.

Taula 42. Tram Pòrtic 1 - Suport 1

Línia Aèria 110 kV			
Entre Pòrtic 1 i Suport 1			
Secció (mm²)	281,1	Mòdul Elàstic, daN/mm²	7.300,00
Diàmetre (mm)	21,8	Coeficient de dilatació, °C-1	0,0000189
Pes, daN/m	0,98	Carga de ruptura, daN	8.489,00
Pes+vent, daN/m	0,98		
Fletxa màxima	0,64	Fletxa mínima	0,03
Hipòtesis		Tensió Horitzontal (daN)	Fletxa (m)
	Vent, -5 °C	1.739,00	
	15°C	963,03	0,07
	Vent -10°C	1.929,04	0,06
	-15°C	2.110,37	0,03
	Vent +15°C	1.004,67	0,12
	Pes propi + 0°C	1.532,43	0,04
	5°C	1.340,98	0,05
	10°C	1.150,83	0,06
	20°C	779,82	0,08
	25°C	606,27	0,11
	30°C	453,06	0,14
	35°C	335,28	0,19
	40°C	257,79	0,25
	45°C	209,66	0,31
	50°C	178,59	0,36
	85°C	100,56	0,64

Taula 43. Tram Suport 1-Suport 2

Línia Aèria 110 kV			
Entre suports 1 i 2			
Secció (mm²)	281,1	Mòdul Elàstic, daN/mm²	7.300,00
Diàmetre (mm)	21,8	Coefficient de dilatació, °C⁻¹	0,0000189
Pes, daN/m	0,98	Carga de ruptura, daN	8.489,00
Pes+vent, daN/m	0,98		
Fletxa màxima	15,27	Fletxa mínima	12,69
Hipòtesis		Tensió Horitzontal (daN)	Fletxa (m)
	Vent, -5 °C	1.739,00	
	15°C	956,18	13,51
	Vent -10°C	1.755,59	13,39
	-15°C	1.017,77	12,69
	Vent +15°C	1.676,56	14,02
	Pes propi + 0°C	985,60	13,11
	5°C	975,50	13,24
	10°C	965,69	13,38
	20°C	946,93	13,64
	25°C	937,94	13,77
	30°C	929,18	13,91
	35°C	920,65	14,03
	40°C	912,34	14,16
	45°C	904,24	14,29
	50°C	896,34	14,42
	85°C	846,32	15,27

Taula 44. Tram Suport 2- Suport 3

Línia Aèria 110 kV			
Entre suports 2 i 3			
Secció (mm²)	281,1	Mòdul Elàstic, daN/mm²	7.300,00
Diàmetre (mm)	21,8	Coefficient de dilatació, °C⁻¹	0,0000189
Pes, daN/m	0,98	Carga de ruptura, daN	8.489,00
Pes+vent, daN/m	0,98		
Fletxa màxima	15,36	Fletxa mínima	12,77
Hipòtesis		Tensió Horitzontal (daN)	Fletxa (m)
	Vent, -5 °C	1.739,00	
	15°C	956,19	13,60
	Vent -10°C	1.755,51	13,47
	-15°C	1.017,39	12,77
	Vent +15°C	1.676,89	14,11
	Pes propi + 0°C	985,41	13,19
	5°C	975,37	13,33
	10°C	965,65	13,46
	20°C	946,99	13,73
	25°C	938,04	13,86
	30°C	929,33	13,99
	35°C	920,84	14,12
	40°C	912,57	14,25
	45°C	904,51	14,38
	50°C	896,65	14,50
	85°C	846,82	15,36

Taula 45. Tram Suport 3 - Suport 4

Línia Aèria 110 kV			
Entre suports 3 i 4			
Secció (mm²)	281,1	Mòdul Elàstic, daN/mm²	7.300,00
Diàmetre (mm)	21,8	Coefficient de dilatació, °C⁻¹	0,0000189
Pes, daN/m	0,98	Carga de ruptura, daN	8.489,00
Pes+vent, daN/m	0,98		
Fletxa màxima	15,27	Fletxa mínima	12,69
Hipòtesis		Tensió Horitzontal (daN)	Fletxa (m)
	Vent, -5 °C	1.739,00	
	15°C	956,18	13,51
	Vent -10°C	1.755,59	13,39
	-15°C	1.017,77	12,69
	Vent +15°C	1.676,56	14,02
	Pes propi + 0°C	985,60	13,11
	5°C	975,50	13,24
	10°C	965,69	13,38
	20°C	946,93	13,64
	25°C	937,94	13,77
	30°C	929,18	13,91
	35°C	920,65	14,03
	40°C	912,34	14,16
	45°C	904,24	14,29
	50°C	896,34	14,42
	85°C	846,32	15,27

Taula 46. Tram Suport 4 - Pòrtic 2

Línia Aèria 110 kV			
Entre suport 4 i Pòrtic 2			
Secció (mm²)	281,1	Mòdul Elàstic, daN/mm²	7.300,00
Diàmetre (mm)	21,8	Coefficient de dilatació, °C⁻¹	0,0000189
Pes, daN/m	0,98	Carga de ruptura, daN	8.489,00
Pes+vent, daN/m	0,98		
Fletxa màxima	0,61	Fletxa mínima	0,03
Hipòtesis		Tensió Horitzontal (daN)	Fletxa (m)
	Vent, -5 °C	1.739,00	
	15°C	983,64	0,06
	Vent -10°C	1.754,06	0,06
	-15°C	2.130,98	0,03
	Vent +15°C	1.025,63	0,11
	Pes propi + 0°C	1.553,09	0,04
	5°C	1.361,65	0,05
	10°C	1.171,50	0,05
	20°C	770,00	0,08
	25°C	603,18	0,10
	30°C	450,00	0,14
	35°C	338,93	0,18
	40°C	262,00	0,24
	45°C	213,50	0,29
	50°C	182,49	0,34
	85°C	102,95	0,61

D.7 Hipòtesis de càlcul dels esforços dels suports

El R.D 223/2008 indica les diferents hipòtesis que s'han de tenir en compte en el càlcul dels esforços dels suports. Ho classifica segons la zona (A, B o C) i els tipus de suports.

En el cas que ens ocupa, s'utilitzen les hipòtesis de la Zona A.

Les hipòtesis pels suports que són de suspensió o amarratge es poden observar a la Taula 47.

Taula 47. Hipòtesis dels suports en suspensió o amarratge en Zona A

TIPO DE APOYO	TIPO DE ESFUERZO	1ª HIPÓTESIS (Viento)	3ª HIPÓTESIS (Desequilibrio de tracciones)	4ª HIPÓTESIS (Rotura de conductores)
Suspensión de Alineación o Suspensión de Ángulo	V	Cargas permanentes (apdo 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea.		
	T	Esfuerzo del viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea, sobre: - Conductores y cables de tierra. - Apoyo. SÓLO ÁNGULO: Resultante de ángulo (apdo. 3.1.6.)	ALINEACIÓN: No aplica. ÁNGULO: Resultante de ángulo (apdo. 3.1.6.)	
	L	No aplica.	Desequilibrio de tracciones (apdo 3.1.4.1)	Rotura de conductores y cables de tierra (apdo. 3.1.5.1)
Amarre de Alineación o Amarre de Ángulo	V	Cargas permanentes (apdo 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea.		
	T	Esfuerzo del viento (apdo. 3.1.2) para una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea, sobre: - Conductores y cables de tierra. - Apoyo. SÓLO ÁNGULO: Resultante de ángulo (apdo. 3.1.6.)	ALINEACIÓN: No aplica. ÁNGULO: Resultante de ángulo (apdo. 3.1.6.)	
	L	No aplica	Desequilibrio de tracciones (apdo 3.1.4.2)	Rotura de conductores y cables de tierra (apdo. 3.1.5.2)
Para la determinación de las tensiones de los conductores y cables de tierra se considerarán sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea y a la temperatura de -5 °C.				
		V = Esfuerzo vertical	L = Esfuerzo longitudinal	T = Esfuerzo transversal

Les hipòtesis pels suports que són d'ancoratge o final de línia es poden observar a la Taula 48.

Taula 48. Hipòtesis dels suports d'ancoratge o final de línia en Zona A

TIPO DE APOYO	TIPO DE ESFUERZO	1ª HIPÓTESIS (Viento)	3ª HIPÓTESIS (Desequilibrio de tracciones)	4ª HIPÓTESIS (Rotura de conductores)
Anclaje de Alineación o Anclaje de Ángulo	V	Cargas permanentes (apdo 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea.		
	T	Esfuerzo del viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea, sobre: - Conductores y cables de tierra. - Apoyo. SÓLO ÁNGULO: Resultante de ángulo (apdo. 3.1.6.)	ALINEACIÓN: No aplica. ÁNGULO: Resultante de ángulo (apdo. 3.1.6.)	
	L	No aplica	Desequilibrio de tracciones (apartado 3.1.4.3)	Rotura de conductores y cables de tierra (apdo. 3.1.5.3.)
Fin de línea.	V	Cargas permanentes (apdo 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea.	No aplica	Cargas permanentes (apdo 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea.
	T	Esfuerzo del viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea, sobre: - Conductores y cables de tierra. - Apoyo.		No aplica
	L	Desequilibrio de tracciones (apdo. 3.1.4.4).		Rotura de conductores y cables de tierra (apdo. 3.1.5.4)
Para la determinación de las tensiones de los conductores y cables de tierra se considerarán sometidos a una sobrecarga de viento (apdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 120 ó 140 km/h según la categoría de la línea y a la temperatura de -5 °C.				
		V = Esfuerzo vertical	L = Esfuerzo longitudinal	T = Esfuerzo transversal

A la Taula 49 es pot observar els tipus de suports de la instal·lació objecte d'estudi.

Taula 49. Tipus de suports a la instal·lació

Suport	Tipus de Suport
Pòrtic 1	Fi de línia
Suport 1	Especial Fi de línia
Suport 2	Suspensió - Alineació
Suport 3	Amarratge - Alineació
Suport 4	Especial Fi de línia
Pòrtic 2	Fi de línia

D.7.1 Desequilibri de traccions

Per a desequilibri en suports d'alineació i d'angle amb cadenes d'aïllament de suspensió:

- Per a línies de tensió nominal superior a 66 kV s'ha de considerar, per aquest concepte, un esforç longitudinal equivalent al 15% de les traccions unilaterals de tots els conductors i cables de terra. Aquest esforç s'aplica en el punt de fixació dels conductors i cables de terra en el suport. S'ha de tenir en compte, per tant, la torsió a què aquests esforços poden donar lloc. En els suports d'angle amb cadena d'aïllament de suspensió s'ha de valorar l'esforç d'angle creat per aquesta circumstància.

Per a desequilibri en suports d'alineació i d'angle amb cadenes d'aïllament d'amarratge:

- Per a línies de tensió nominal superior a 66 kV s'ha de considerar, per aquest concepte, un esforç equivalent al 25% de les traccions unilaterals dels conductors i cables de terra. Aquest esforç s'ha d'aplicar en el punt de fixació dels conductors i els cables de terra en el suport. S'ha de tenir en compte, per tant, la torsió a què aquests esforços poden donar lloc. En els suports d'angle amb cadena d'aïllament d'amarratge s'ha de valorar l'esforç d'angle creat per aquesta circumstància.

Per a desequilibri en suports d'ancoratge:

- Per aquest concepte s'ha de considerar un esforç equivalent al 50% de les traccions unilaterals dels conductors i cables de terra. Per a línies de tensió nominal superior a 66 kV, aquest esforç s'aplica en el punt de fixació dels conductors i cables de terra en el suport. S'ha de tenir en compte, per tant, la torsió a què aquests esforços poden donar lloc. En els suports d'ancoratge amb angle s'ha de valorar l'esforç d'angle creat per aquesta circumstància.

Per a desequilibri en suports de fi de línia:

- S'ha de considerar pel mateix concepte un esforç igual al 100% de les traccions unilaterals de tots els conductors i cables de terra, i s'ha de considerar aplicat cada esforç en el punt de fixació del corresponent conductor o cable de terra al suport. S'ha de tenir en compte, per tant, la torsió a què aquests esforços poden donar lloc.

D.7.2 Esforços longitudinals per trencament de conductors

S'ha de considerar el trencament dels conductors (un o diversos) d'una sola fase o cable de terra per suport, independentment del nombre de circuits o cables de terra que hi estiguin instal·lats. Aquest esforç es considera aplicat en el punt que produeixi la sol·licitud més desfavorable per a qualsevol element del suport, tenint en compte la torsió produïda en cas que aquell esforç sigui excèntric.

Pel que fa al trencament de conductors en suports d'alineació i angle amb cadenes d'aïllament de suspensió

- S'ha de considerar l'esforç unilateral, corresponent al trencament d'un sol conductor o cable de terra. En els suports d'angle amb cadena d'aïllament de suspensió s'ha de valorar, a més de l'esforç de torsió que es produeix segons el que s'indica, l'esforç d'angle creat per aquesta circumstància en el seu punt d'aplicació. Amb les justificacions prèvies pertinents, es pot tenir en compte la reducció d'aquest esforç, mitjançant dispositius especials adoptats per a aquest fi, així com la que pugui originar la desviació de la cadena d'aïlladors de suspensió. Tenint en compte aquest últim concepte, el valor mínim admissible de l'esforç de trencament que s'ha de considerar ha de ser el 50% de la tensió del cable trencat en les línies amb un o dos conductors per fase, i el 75% de la tensió del cable trencat en les línies amb tres conductors per fase, i no es pot considerar cap reducció per desviació de la cadena en les línies amb quatre conductors o més per fase.

L'esforç de trencament de conductors en suports amb cadenes d'aïllament de suspensió que s'aplica es pot observar a la Taula 50.

Taula 50. Esforç de trencament aplicable en funció del nombre de conductors per fase

Nombre de conductors per fase	%
1	50
2	50
3	75
≥ 4	100

Pel que fa al trencament de conductors en suports d'alineació i angle amb cadenes d'amarratge:

- S'ha de considerar l'esforç corresponent al trencament d'un sol conductor per fase o cable de terra, sense cap reducció de la seva tensió. En els suports d'angle amb cadenes d'amarratge s'ha de valorar, a més de l'esforç de torsió que es produeix segons el que s'indica, l'esforç d'angle creat per aquesta circumstància en el seu punt d'aplicació.

Pel que fa al trencament de conductors en suports d'ancoratge:

- S'ha de considerar l'esforç corresponent al trencament d'un cable de terra o d'un conductor en les línies amb un sol conductor per fase, sense cap reducció de la seva tensió i, en les línies amb conductors en feixos múltiples, s'ha de considerar el trencament d'un cable de terra o el trencament total dels conductors d'un feix de fase, però aquells suposats amb una tensió mecànica igual al 50% de la que els correspon en la hipòtesi que es consideri, sense que sigui admissible cap reducció sobre els esforços anteriors. En els casos d'ancoratge amb angle s'ha de valorar, a més de l'esforç de torsió que es produeix segons el que s'indica, l'esforç d'angle creat per aquesta circumstància en el seu punt d'aplicació.

L'esforç de trencament de conductors en suports d'ancoratge que s'aplica es pot observar a la Taula 51.

Taula 51. Esforç de trencament aplicable en funció del nombre de conductors per fase

Nombre de conductors per fase	%
1	100
≥ 2	50

Pel que fa al trencament de conductors en suports de fi de línia:

- S'ha de considerar aquest esforç com en els suports d'ancoratge, però suposant, en el cas de les línies amb feixos múltiples, els conductors sotmesos a la tensió mecànica que els correspongui, d'acord amb la hipòtesi de càrrega.

Pel que fa al trencament de conductors en suports especials:

- S'ha de considerar segons la funció que tingui cada circuit instal·lat en el suport, i es considera l'esforç que produeixi la sol·licitud més desfavorable per a qualsevol element del suport, tenint en compte la torsió produïda en cas que l'esforç sigui excèntric.

D.7.3 Esforços en els suports

A la Taula 52, Taula 53 i Taula 54 es poden observar els esforços en el suports segons Hipòtesis 1, 3 i 4, respectivament.

Taula 52. Esforços en els suports segons Hipòtesis 1 (Vent 140 km/h -5°C)

		Càrrega de vent daN/m	Longitud vent a - 5°C i 140 km/h	V daN	T daN	L daN
Pòrtic 1	Fi de línia	1,48	26,25	2476,01	58,42	5217
Suport 1	Especial Fi de línia	1,48	326,50	-2886,13	785,00	5217
Suport 2	Suspensió - Alineació	1,48	327,55	-993,20	1455,51	No aplica
Suport 3	Amarratge - Alineació	1,48	326,50	-922,23	1455,51	No aplica
Suport 4	Especial Fi de línia	1,48	25,61	-2725,87	783,59	5217
Pòrtic 2	Fi de línia			2331,69	57,00	5217

Taula 53. Esforços en els suports segons Hipòtesis 3 (Desequilibri de traccions)

		Càrrega de vent daN/m	Longitud vent a - 5°C i 140 km/h	V daN	T daN	L daN
Pòrtic 1	Fi de línia	1,48	26,25	No aplica	No aplica	No aplica
Suport 1	Especial Fi de línia	1,48	326,50	No aplica	No aplica	No aplica
Suport 2	Suspensió - Alineació	1,48	327,55	-993,20	No aplica	782,55
Suport 3	Amarratge - Alineació	1,48	326,50	-922,23	No aplica	1304,25
Suport 4	Especial Fi de línia	1,48	25,61	No aplica	No aplica	No aplica
Pòrtic 2	Fi de línia			No aplica	No aplica	No aplica

Taula 54. Esforços en els suports segons Hipòtesis 4 (Trencament de conductors)

		Càrrega de vent daN/m	Longitud vent a - 5°C i 140 km/h	V daN	T daN	L daN
Pòrtic 1	Fi de línia	1,48	26,25	2476,01	0,00	1739
Suport 1	Especial Fi de línia	1,48	326,50	-2886,13	0,00	1739
Suport 2	Suspensió - Alineació	1,48	327,55	-993,20	0,00	1739
Suport 3	Amarratge - Alineació	1,48	326,50	-922,23	0,00	1739
Suport 4	Especial Fi de línia	1,48	25,61	-2725,87	0,00	1739
Pòrtic 2	Fi de línia			2331,69	0,00	1739

S'han comprovat els esforços que poden aguantar els suports de la marca FUNTAM i no hi ha cap inconvenient.

Els suports que s'utilitzaran seran de la marca FUNTAM, l'armat serà TC62, la sèrie AM-18 i tindrà una altura de 27,5 metres.

D.8 Estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de la contaminació electromagnètica de la derivació de la línia aèria de 110 kV

Tal i com s'ha explicat a l'apartat B.6. Estudi d'avaluació de l'impacte en matèria de contaminació electromagnètica de la subestació de transformació a 110 kV, per superposició, el camp electromagnètic sota la línia es trobarà segons l'equació (83).

$$\vec{B} [T] = \sum_i 2 \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{\vec{I}_i [A] \times \hat{r}_i}{R_i [m]} \quad (83)$$

On:

- i és el conductor i de la línia,
- R_i és la distància radial des de la línia al punt P, al qual es calcula el camp magnètic.
- \hat{r}_i és el vector posició unitari des de la secció de la línia que s'està considerant, fins al punt P.
- \vec{I}_i és el vector intensitat que circula pel conductor que s'està considerant.

I en el cas de finals de línia, el camp electromagnètic es calcula amb l'equació (84).

$$\vec{B} [T] = \sum_i \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{\vec{I}_i [A] \times \hat{r}_i}{R_i [m]} \quad (84)$$

El camp electromagnètic per la línia de simple circuit a 110 kV degut únicament al corrent de 50 Hz, en cap cas serà superior a:

$$\vec{B} [T] < 6 \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{A^{-2}} \right] \frac{581,22 [A] \times \hat{r}_i}{11 [m]} \cdot 10^6 = 31.70 \mu T$$

Es fa servir la fórmula de semi línia infinita (entrada pòrtic, 11 m d'alçada) i se superposen les aportacions dels tres conductors com si estiguessin en fase.

Les restriccions bàsiques i nivells de referència s'expliquen a l'apartat B.7.2. Restriccions bàsiques i nivells de referència del Reial Decret 1066/2001.

E CÀLCUL JUSTIFICATIUS SUBESTACIÓ DE SECCIONAMENT

En aquest apartat es justificaran els càlculs de la subestació de seccionament de 110 kV.

E.1 Càlcul mecànic d'embarrats rígids

E.1.1 Hipòtesis de disseny

Les hipòtesis de disseny que s'utilitzaran pel càlcul mecànic d'embarrats rígids són les següents:

I_{cc3} en 110 kV (simètrica) = 31,5 kA

R/X (sistema) = 0,07

Durada del curtcircuit: 0,5 s.

Es realitzaran les interconnexions en tubs d'alumini.

En una tensió de 110 kV, els tubs tindran les característiques que s'observen a la Taula 55.

Taula 55. Característiques tub de 120/100 mm de diàmetre

Diàmetre exterior (mm)	120
Diàmetre interior (mm)	100
Secció (mm²)	3.456
Intensitat permanent permisible (A)	2.960

La geometria i les condicions d'ancoratge en els extrems del vol considerat com a més desfavorables es poden observar a la Taula 56.

Taula 56. Geometria i condicions d'ancoratge en els vols més desfavorables

Longitud del vol (m)	10
Distància entre fases (m)	2,5
Ancoratge	Elàstic – Fixe

E.1.2 Condicions de la instal·lació

La subestació de seccionament objecte d'estudi es troba en una parcel·la ubicada a 40 m sobre el nivell del mar. Per tant, es troba per sota dels 500 metres (Zona A segons RLAT).

Al estar a la Zona A no es calcularan les càrregues del gel. Però, les càrregues del gel es calcularien segons l'equació (85) si la subestació de seccionament estigués a la Zona B.

$$180 \sqrt{D} \quad (85)$$

Les càrregues del vent sobre una superfície cilíndrica es calculen segons l'equació (86).

$$q_v = 70 \cdot \left(\frac{v \left[\frac{km}{h} \right]}{120} \right)^2 \quad (86)$$

Les característiques del tub 120/100 es poden observar a la Taula 57.

Taula 57. Característiques del tub 120/100

Aliatge	E-AlMgSi0,5, F22.
Diàmetre exterior (D) i interior (d)	120/100 mm.
Gruix de la paret (e)	10 mm.
Pes propi unitari (P_{pt})	9,33 kg/m.
Secció (A)	3.455,75 mm ² .
Càrrega de ruptura del material (σ_R)	235,44 N/mm ² .
Moment d'inèrcia (J)	527 cm ⁴ .
Moment resistent (W)	87,83 cm ³ .
Mòdul d'elasticitat (Young) (E)	70.000 N/mm ² .
Límit de fluència mínim del material (R_{p02})	156,96 N/mm ² .
Coefficient de dilatació lineal (α)	0,023 mm/m°C.
Intensitat màxima del material 65°	2.960 A.

Les característiques dels aïlladors C6-650, que s'instal·len al tram del vol A, que és el tram corresponent a les barres de 110 kV, es poden observar a la Taula 58.

Taula 58. Característiques aïlladors C6-650

Càrrega de ruptura a flexió	6.000 N
Càrrega de ruptura a torsió	3.000 N·m
Tensió nominal	145 kV
Tensió suportada de curta durada a freqüència industrial	275 kV
Tensió suportada a impulsos tipus llamp	650 kV
Alçada de l'aïllador	1.500 mm
Alçada de la peça de suport	140 mm

E.2 Càlcul mecànic de l'embarrat principal en 110 kV

E.2.1 Corrent de curtcircuit

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la intensitat simètrica de curtcircuit trifàsic (I_{cc}) a efectes de disseny és de 31,5 kA.

La intensitat de cresta es calcula segons l'equació (87).

$$I_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc} \quad (87)$$

On:

- I_{cc} és la intensitat de curtcircuit.
- χ Paràmetre que es calcula segons l'equació (88).

$$\chi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot R}{X}} \quad (88)$$

On:

- R/X és la relació d'impedàncies equivalents del sistema en el punt de curtcircuit, per a la xarxa de transport en aquest nivell de tensió, sol tenir un valor típic de 0,07.

Per tant, $\chi = 1,814$ i $I_p = 80,81 \text{ kA}$

E.2.2 Tensió en el tub

Els esforços pel vent es calculen segons l'equació (89).

$$F_v = q_v \cdot D \quad (89)$$

On:

- q_v es calcula amb l'equació (90) segons RLAT 2008.

$$q_v = 70 \frac{DaN}{m^2} \quad (90)$$

Per tant, la força provocada pel vent és de:

$$F_v = 84 \text{ N/m}$$

Els esforços pel pes propi són els següents:

$$F_{pp} = 91,53 \text{ N/m}$$

Un altre pes que s'ha de tenir en compte és el del cable amortidor. Es tindrà en compte 1,52 kg/m en els 4/3 del vol.

$$\frac{4}{3} \cdot 1,52 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 19,9 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Per tant, en total F_p és de:

$$F_p = 91,53 \frac{\text{N}}{\text{m}} + 19,9 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 111,41 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Pel que fa als esforços per curtcircuit, la força estàtica per unitat de longitud entre dos conductors paral·lels recorreguts per una intensitat s'obté de l'equació (91).

$$F_{m3st} = 0,866 \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_{p3}^2}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (91)$$

On:

- I_{p3} és la intensitat de cresta de curtcircuit trifàsic.
- a és distancia mitja entre fases.

Un cop es substitueix, l'esforç per curtcircuit dona el següent valor:

$$F_{m3st} = 0,866 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \cdot 80.809,577^2 A^2}{2 \cdot \pi \cdot 2,5 m} = 452,42 \frac{N}{m}$$

Els esforços dinàmics depenen a la vegada de la freqüència de vibració pròpia del tub. És en funció del tub, del vol i dels suports, i que permet calcular els dos coeficients que determinen l'esforç dinàmic en curtcircuit sobre el tub:

V_{σ} = factor que té en compte l'efecte dinàmic

V_r = factor que té en compte el reenganxament

La freqüència de vibració d'un tub es pot calcular segons l'equació (92).

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \quad (92)$$

On:

- I és la inèrcia de la secció (527 cm^4).
- m és la massa unitari del tub, inclòs el cable amortidor ($10,85 \text{ kg/m}$).
- E és el mòdul de Young del material (70.000 N/mm^2).
- l és la longitud del vol (10 m).
- γ és el coeficient del tub i dels suports ($2,45$).

Si substituïm i operem trobem el següent valor:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} = \frac{2,45}{(10 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{70.000 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 10^6 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \cdot 527 \text{ cm}^4 \cdot \frac{\text{m}^4}{10^8 \text{ cm}^4}}{10,85 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}}}} = 4,52 \text{ Hz}$$

La relació entre la freqüència d'oscil·lació i la freqüència nominal del sistema estableix els valors de V_{σ} i V_r . La relació es pot veure a l'equació (93).

$$\frac{f_c}{f} = \frac{4,52 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,090 \quad (93)$$

La tensió de treball en el tub per esforç dinàmic de curtcircuit es pot expressar segons l'equació (94).

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3st} \cdot l^2}{8 \cdot z} \quad (94)$$

On:

- β és un factor que depèn del tipus i número dels suports, segons taula 3 del S/CEI 865 (0,73).
- V_σ és el factor que té en compte l'efecte dinàmic (0,498).
- V_r és el factor que té en compte el reenganxament (1,64).
- F_{m3st} és el valor de cresta de l'esforç entre conductors (452,42 N/m).
- l és la longitud del vol (10 m).
- z és el mòdul resistent de la secció (87,83 cm³).

Substituint i operant, s'obté un valor de:

$$\sigma_m = 38,44 \frac{N}{mm^2}$$

La tensió de treball total en el tub ve donada per la suma geomètrica de les tensions produïdes pels diferents esforços, que s'acumulen, en les seves respectives direccions, a la ja calculada de curtcircuit. En aquest cas i considerant totes les càrregues uniformement repartides, es pot observar el càlcul a l'equació (95).

$$\sigma_i = \frac{P \cdot l^2}{8 \cdot z} \quad (95)$$

On:

- l és la longitud del vol (10 m).
- z és el mòdul resistent de la secció.
- P és la càrrega repartida que produeix l'esforç.

Per tant, si es té una càrrega unitària del vent de 84 N/m, la tensió de treball pel vent en el tub serà la següent:

$$\sigma_v = \frac{84 \frac{N}{m} \cdot 10 m \cdot 10 m \cdot \frac{1.000 mm}{1 m}}{8 \cdot 87,83 cm^3 \cdot \frac{1.000 mm^3}{1 cm^3}} = 11,95 \frac{N}{mm^2}$$

Si es té una càrrega unitària del pes propi de 91,53 N/m, la tensió de treball pel pes propi serà la següent:

$$\sigma_{pp} = \frac{91,53 \frac{N}{m} \cdot 10 m \cdot 10 m \cdot \frac{1.000 mm}{1 m}}{8 \cdot 87,83 cm^3 \cdot \frac{1.000 mm^3}{1 cm^3}} = 13,03 \frac{N}{mm^2}$$

La tensió màxima es calcula segons l'expressió (96).

$$\sigma_{total} = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_v)^2 + (\sigma_{pp} + 0)^2} \quad (96)$$

Per tant, el resultat és el següent:

$$\sigma_{total} = \sqrt{(38,43 + 11,95)^2 + (13,03 + 0)^2} = 52,03 \frac{N}{mm^2}$$

El coeficient de seguretat del tub enfront al límit de fluència val 156,96 N/mm².

Per tant,

$$C_s = \frac{156,96 \frac{N}{mm^2} (\text{límite de fluència mínimo del material})}{52,03 \frac{N}{mm^2}} = 3,02$$

$$C_s > 1,5 \text{ compleix}$$

En quan a l'esforç de curtcircuit, la norma CEI 865 estableix que el tub suporta l'esforç si es compleix l'equació (97).

$$\sigma_{total} \leq q \cdot R_{p02} \quad (97)$$

On:

- q és el factor que es defineix per tubs, segons CEI 865 amb l'equació (98).

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^4} \quad (98)$$

On:

- D és el diàmetre exterior (120 mm).
- s és el gruix (10 mm).

Per tant tenim un factor amb el següent valor:

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot 10 \text{ mm}}{120 \text{ mm}}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot 10 \text{ mm}}{120 \text{ mm}}\right)^4} = 1,383$$

Per un factor q de 1,383, i $R_{p0,2} = 156,96 \text{ N/mm}^2$.

Tal i com es pot observar, el tub està molt lluny del límit d'esforços en curtcircuit:

$$\sigma_{total} \leq q \cdot R_{p02}$$

$$52,90 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 1,383 \cdot 156,92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 217,12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

E.2.3 Reaccions sobre aïlladors suport

El màxim esforç en els vols considerats, es produirà en els aïlladors suport dels suports entremitjos, considerant dos vegades l'esforç produït a l'extrem d'un vol, segons CEI 865.

Les accions a considerar en aquest cas són només horitzontals, així, el vent sobre el tub serà de:

$$F_v = 700 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 84 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Pel que fa a l'esforç en curtcircuit, segons el valor de referencia, el valor d'esforç sobre els suports ve donada per l'equació (99).

$$F_{m3d} = 0,866 \cdot V_f \cdot V_r \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_{p3}^2}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (99)$$

On:

- V_f és el factor de càrrega, que depèn de:

$$\frac{f_c}{f_n} = \frac{4,52 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,090$$

Per tant val, $V_f = 0,40$

- V_r és el factor de reenganxament (1,642130233)

Per tant,

$$F_{m3d} = 0,866 \cdot 0,40 \cdot 1,642130233 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot (80.809 \text{ A})^2}{2 \cdot \pi \cdot 2,5 \text{ m}} = 257,36 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La suma dels esforços sobre els suports, en la unió sobre el suport, es calcula segons l'equació (100).

$$F_t = 2 \cdot (F_v + F_{m3d}) \cdot l \cdot \alpha \quad (100)$$

On:

- α és 0,5.

Per tant, substituint els valors:

$$F_t = 2 \cdot \left(84 \frac{\text{N}}{\text{m}} + 257,36 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \cdot \frac{10}{2} \text{ m} = 3.413,6 \text{ N}.$$

Per l'esforç en el cap de l'aïllador s'ha de tenir en compte l'altura del racor. S'aplica un factor de 1,1.

$$F_{t'} = 1,1 \cdot 3.413,6 \text{ N} = 3.754 \text{ N}$$

L'aïllador treballarà, en les pitjors condicions, amb una coeficient de seguretat en front a la càrrega inferior de ruptura de:

$$\frac{6.000 \text{ N}}{3.754 \text{ N}} = 1,6 > 1,25 \text{ compleix}$$

E.2.4 Fletxa en el tub

La fletxa màxima per un vol s'obté de l'equació (101).

$$f = \frac{1}{185} \frac{P \cdot l^4}{E \cdot I} \quad (101)$$

On:

- 1/85 és un factor segons el tipus de suport. S'obté de la taula 3 del CEI 865.
- P és la càrrega vertical distribuïda que s'obté de l'equació (102).
- l és la longitud del vol (1000 cm).
- E és el mòdul de Young (7000000 N/cm²).
- I és la inèrcia de la secció (527 cm⁴).

$$\frac{\left(9,33 \frac{kg}{m} \text{ peso tubo} + 1,52 \frac{kg}{m} \text{ peso cable}\right) \cdot 9,81 N}{100 \frac{cm}{1 m}} = 1,06 \frac{N}{cm} \quad (102)$$

Substituint i operant, obtenim:

$$f = \frac{1}{185} \cdot \frac{1,06 \frac{N}{cm} \cdot (1.000 \text{ cm})^4}{7.000.000 \frac{N}{cm^2} \cdot 527 \text{ cm}^4} = 1,56 \text{ cm}$$

$$1,56 \text{ cm} < \frac{1}{250} \cdot L < \frac{1}{250} \cdot 1.000 \text{ cm} < 4 \text{ cm}$$

E.2.5 Allargament de l'embarrat

El tub que forma l'embarrat, per efectes tèrmics es dilatarà, d'acord amb l'equació (103).

$$\Delta l = l_o \cdot \alpha \cdot \Delta \theta \quad (103)$$

On:

- l_o és la longitud inicial del tub (10 m).
- α és el coeficient de dilatació lineal del tub (0,023 mm/m°C).
- $\Delta \theta$ és l'increment de temperatura entre la de muntatge (35°C) i la de servei (80°C).

Per tant, en les condicions esmentades anteriorment, obtenim:

$$\Delta l = l_o \cdot \alpha \cdot \Delta \theta = 13,5 \cdot 0,023 \cdot (80 - 35) = 13,97 \text{ mm}$$

Donat l'allargament del vol, s'instal·laran peces especials que permetin absorbir aquesta dilatació.

E.2.6 Esforç tèrmic en curtcircuit

La intensitat tèrmica en curtcircuit ve donada, segons CEI 865, per l'equació (104).

$$I_\theta = I_p \cdot \sqrt{(m + n)} \quad (104)$$

On:

- m i n són coeficients tèrmics de dissipació ($m=0,097$ i $n= 0,897$).
- I_p és intensitat simètrica de curtcircuit trifàsic.

Per tant, obtenim una intensitat tèrmica en curtcircuit de:

$$I_{\theta} = 31,5 \text{ kA} \cdot \sqrt{(0,097 + 0,897)} = 31,41 \text{ kA}.$$

Aquest valor ha de ser menor que la capacitat tèrmica del tub, amb densitat de corrent de curtcircuit r de 116 A/mm^2 (procés adiabàtic).

La secció de l'embarat 120/100 mm és de $3.455,75 \text{ mm}^2$

Pel tub actual, la capacitat tèrmica és la següent:

$$S \cdot r = 3.455,75 \text{ mm}^2 \cdot 116 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} = 400.867 \text{ A} = 400,87 \text{ kA}.$$

Per tant, és un valor molt superior a la corrent tèrmica de curtcircuit de la instal·lació.

E.2.7 Intensitat nominal de les barres

La intensitat nominal teòrica del tub escollit, segons fabricant, és de 2.960 A , amb $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de treball del tub.

Així mateix, s'han de tenir en compte els següents factors:

k_1 = Factor de correcció per les variacions de capacitat de càrrega en relació a la conductivitat. $k_1 = 0,925$ per l'aliatge escollit.

k_2 = Factor de correcció per altres temperatures del aire y/o de l'embarat (Por exemple $1,25$ para temperatura final de $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

$k_2 = 1.$

k_3 = Factor de correcció por les variacions de capacitat de càrrega tèrmica degut a diferencia en el disseny (1 para tubs).

$k_3 = 1.$

k_4 = Factor de correcció per las variacions de la capacitat de càrrega elèctrica degut a les diferencies en el disseny (1 per tubs)

$k_4 = 1.$

k_5 = Factor de correcció per l'altura (0,98 para instal·lació a menys de 1.500 m.s.n.m.). $k_5 = 0,98$.

Per tant, segons la citada norma, la intensitat màxima vindrà donada per l'equació (105).

$$I_{m\grave{a}x} = I_n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (105)$$

Per tant, la intensitat màxima és de:

$$I_{m\grave{a}x} = 2.960 \cdot 0,925 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,98 = 2.683,24 \text{ A}$$

Per aquesta intensitat en qüestió, s'obté una potència de 511 MVA, potència molt superior a la necessària.

E.3 Càlcul de l'efecte corona

E.3.1 Càlcul de la tensió disruptiva

Pel càlcul de la tensió crítica disruptiva (U_c), a partir del qual l'efecte corona es pot manifestar, es pot aplicar la fórmula de Peek, aplicada a conductors cilíndrics. La fórmula de Peek ve donada per l'equació (106).

$$U_c = m_0 \cdot \delta \cdot E_{0f} \cdot r_1 \cdot \ln\left(\frac{D}{r_1}\right) \quad (106)$$

On:

- m_0 és el coeficient de irregularitat del conductor, que té un valor de 1 per tubs cilíndrics i llisos.
- r_1 és el radi exterior del tub en cm. Per un tub de diàmetre 120 mm, el valor és de 6 cm.
- D és la distància entre conductors. Donat que es troben situats en un mateix plànol i equidistant entre sí:

$$D = 1,26 \cdot 280 \text{ cm} = 352,8 \text{ cm}$$

- δ és la densitat de l'aire que ve donada per l'equació (107).
- E_{0f} és el valor eficaç del camp elèctric crític per l'aparició de l'efecte corona. L'expressió del valor màxim ve donada per l'equació (108).

$$\delta = \frac{3,92 \cdot H}{(273 + \phi)} \quad (107)$$

On:

- H és la pressió atmosfèrica en cm de mercuri
- ϕ és la temperatura de l'aire (en el cas que ens ocupa son 45°C per les condicions més desfavorables).

La subestació de seccionament en qüestió es troba a una altura sobre el nivell del mar inferior a 1.000 m, pel que es consideren 760 mm Hg de pressió. Substituint es troba:

$$\delta = \frac{3,92 \cdot 76 \text{ cm Hg}}{(273 + 45)} = 0,9369$$

Per conductors paral·lels el valor màxima de camp ve donat per l'equació (108).

$$E_0 = 30 \cdot m_0 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r_1}}\right) \frac{kV}{cm} \quad (108)$$

Substituint es troba el següent valor del camp magnètic:

$$E_0 = 30 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{6}}\right) \frac{kV}{cm} = 33,67 \frac{kV}{cm}$$

El valor màxim de camp és de $33,67 \frac{kV}{cm}$. En valor eficaç tenim:

$$E_{0f} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} = 23,81 \frac{kV}{cm}$$

Substituint els valors trobats a l'equació (106), obtenim el següent:

$$U_c = 1 \cdot 0,9369 \cdot 23,81 \frac{kV}{cm} \cdot 6 \text{ cm} \cdot \ln\left(\frac{352,8 \text{ cm}}{6 \text{ cm}}\right) = 545 \text{ kV}.$$

Aquesta tensió disruptiva està calculada per un bon temps. Pels casos de neu, boira o tempesta, s'ha de disminuir un 20%. Per tant, s'obté:

$$U_c = 530 \text{ kV} \cdot 0,8 = 436 \text{ kV}$$

Pel fet que els conductors estiguin en el mateix plànol, la tensió disruptiva referida al conductor central ha de ser disminuïda en un 4% i augmentada en un 6% pels conductors laterals, respectivament.

Com es pot observar els valors obtinguts estan molt allunyats de la tensió eficaç entre fase i terra dels conductors ($\frac{110}{\sqrt{3}}$ kV, para 110 kV), pel que no és d'esperar que l'efecte corona apareixi.

E.4 Determinació de les distàncies mínimes en embarrats estesos

E.4.1 Hipòtesis de disseny

Les distàncies mínimes, des del punt de vista de les aproximacions entre fases que puguin produir-se quan es desplacin de forma simultània dos conductors contigus en condicions de fletxa màxima i amb vent de 140 km/h, s'han establert de la forma que s'indica per un vol de les següents característiques:

Parc de 110 kV (es sobredimensiona per 132 kV)

Longitud del vol:	$L = 19 \text{ m.}$
Fletxa màxima	$0,659 \text{ m.}$
Tipus de conductor:	Cóndor.
Número de conductors por fase:	$n_s = 1.$
Diàmetre del conductor:	$\varnothing = 27,76 \text{ mm.}$
Secció del conductor:	$A_s = 455,10 \text{ mm}^2.$
Pes propi del conductor:	$m_s = 1,522 \text{ kg/m.}$
Mòdul de elasticitat:	$E = 69.000 \text{ N/mm}^2.$
Distància entre fases:	$a = 2,8 \text{ m.}$
Longitud mitja de cadenes	$l_1 = 0 \text{ m.}$
Separació entre conductores de la mateixa fase:	$d_1 = 0 \text{ m.}$
Rigidesa dels suports:	$S = 7,5 * 10^4 \text{ N/m.}$
Temps de rebuig de defecte:	$T_{k1} = 0,5 \text{ seg.}$
Intensitat de curtcircuit:	$I_{k3} = 31,5 \text{ kA}$
Relació R/X del sistema:	$R/X = 0,07.$
Tensió màxima a 50°C:	$F_{st} = 10.300,5 \text{ N.}$
Velocitat del vent:	$V_v = 140 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$
Distància d'aïllament segons RD 337/2014	$D_a = 1.300 \text{ mm.}$
Coeficient de dilatació tèrmica	$C_{th} = 2,7E - 19 \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}$

A més, es comprovarà el desplaçament màxim en curtcircuit i la pèrdua de distància que això produeix, d'acord amb el que estipula la norma CEI / UNE / EN 865.

E.4.2 Desplaçament del vol amb vent

La força de vent segons ITC-LAT 07, RD 223/2008 Reglament sobre condicions tècniques i garanties de seguretat en línies aèries d'alta tensió i les seves instruccions tècniques complementàries ITC-LAT 01 a 09, ve donada per l'equació (109).

$$F_v = q \cdot A_s. \quad (109)$$

On:

- q és la pressió del vent sobre conductors, que és:

$q = 60 \cdot \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \frac{daN}{m^2}$	Per ϕ del conductor ≤ 16 mm.
$q = 50 \cdot \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \frac{daN}{m^2}$	Per ϕ del conductor > 16 mm.

Per tant, s'obté una força del vent de:

$$F_v = 50 \cdot \left(\frac{V_v}{120}\right)^2 \frac{DaN}{m^2} \cdot \frac{0,02776 m \cdot 1 m}{m} = 1,89 \frac{kp}{m}$$

L'angle de desplaçament ve donat per l'equació (110).

$$\theta = \text{artg}\left(\frac{F_v}{P}\right) \quad (110)$$

Per tant, s'obté un valor de:

$$\theta = \text{artg}\left(\frac{1,89 \frac{kp}{m}}{1,522 \frac{kp}{m}}\right) = 51,14$$

El desplaçament màxim del conductor ve donat per l'equació (111).

$$d_{m\acute{a}x} = \text{fletxa} \cdot \sin \theta \quad (111)$$

Per tant, s'obté:

$$d_{m\acute{a}x} = 0,659 \text{ m} \cdot \sin(51,14^\circ) = 0,51 \text{ m}$$

Sense tenir en compte el curtcircuit, la distància mínima de separació entre fases contigües de conductors paral·lels, per l'acció de vent, i tenint en compte que la distància d'aïllament es pot reduir en un 25% en aquests casos, serà:

$$D_{min} = 0,75 \cdot D_a + 2 \cdot d_{m\acute{a}x} + d_1 = 0,75 \cdot 1,3 \text{ m} + 2 \cdot 0,51 \text{ m} = 2 \text{ m}.$$

Distància inferior a l'adoptada que és de 2,8 m per als conductors estesos.

E.4.3 Efecte en conductors per corrent de curtcircuit

L'esforç degut a un efecte bifàsic ve donat per l'equació (112).

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I''_{k3})^2 l_c}{a l} \quad (112)$$

On:

- I''_{k3} es la corrent simètrica de curtcircuit (31,5 kA).
- l_c = longitud de tram sense cadenes.
- l = longitud total del tram (en aquest cas $l_c = l$, ja que la longitud de la cadena = 0).
- a = separació entre fases (2,8 m).

Per tant, s'obté el següent valor:

$$F' = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} 0,75 \frac{(31.500 \text{ A})^2}{2,8} \frac{19 \text{ m}}{19 \text{ m}} = 53,16 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La proporció entre la força de curtcircuit i el pes propi ve donada per l'equació (113).

$$r = \frac{F'}{n \cdot m_s \cdot g} \quad (113)$$

On:

- n és el numero de conductors per fase (1).
- m_s és 1,522 kg/m.

Per tant, s'obté el següent resultat:

$$r = \frac{53,16 \frac{N}{m}}{1 \cdot 1,522 \frac{kg}{m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 3,560.$$

La direcció resultant de la força serà:

$$\delta_1 = \arctan(3,560) = 74,31^\circ.$$

La fletxa estàtica en el conductor està ve donada per l'equació (114).

$$b_c = \frac{n \cdot m_s \cdot g \cdot l^2}{8 \cdot F_{st}} \quad (114)$$

On:

- F_{st} és la força de tracció estàtica del conductor pel cas més desfavorable (que serà el de la fletxa màxima a 50°C), 10.300,5 N.

Per tant, s'obté el següent resultat:

$$b_c = \frac{1 \cdot 1,522 \frac{kg}{m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot (19 m)^2}{8 \cdot 10.300,5 N} = 0,065 m$$

El període de oscil·lació per una fletxa ve donat per l'equació (115).

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,8 \frac{b_c}{g}} \quad (115)$$

Per tant, s'obté el següent resultat:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{0,065 m}{9,81 \frac{m}{s^2}}} = 0,459 s$$

El període resultant en cas de curtcircuit ve donat per l'equació (116).

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90}\right)^2\right]} \quad (116)$$

Per tant, s'obté el següent resultat:

$$T_{res} = \frac{0,459 \text{ s}}{\sqrt[4]{1 + 3,560^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{74,31^\circ}{90} \right)^2 \right]} = 0,27 \text{ s}$$

El mòdul de Young real del conductor, en funció de la càrrega límit del cable σ_{fin} ($\sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$), ve donat per l'equació (117).

$$E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \text{sen} \left(90 \frac{F_{st}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \right) \right] \quad (117)$$

Per tant, s'obté el següent resultat:

$$E_s = 69.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \text{sen} \left(90 \frac{10.300,5 \text{ N}}{1 \cdot 455,10 \text{ mm}^2 \cdot \frac{\text{m}^2}{10^6 \text{ mm}^2} \cdot 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \right) \right] =$$

$$= 5,22 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}.$$

El factor de càrrega del conductor ve donat per l'equació (118).

$$\xi = \frac{(n \cdot m_s \cdot g \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st}^3 \cdot N} \quad (118)$$

On:

- N és la rigidesa del sistema mecànic compost, que es troba amb l'equació (119).

$$N = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n \cdot E \cdot A_s} \quad (119)$$

On:

- S és $7,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}$

Per tant, el valor de la rigidesa del sistema mecànic compost és el següent:

$$N = \frac{1}{7,5 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 19 \text{ m}} + \frac{1}{1 \cdot 69.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 455,1 \text{ mm}^2} = 7,33 \cdot 10^{-7}$$

Per tant, s'obté el següent resultat:

$$\xi = \frac{\left(1 \cdot 1,522 \frac{kg}{m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 19 m\right)^2}{24 \cdot (10.300,5 N)^3 \cdot 7,33 \cdot 10^{-7}} = 0,0027$$

L'angle d'oscil·lació de l'obertura durant el pas, o a la fi de la mateixa, del corrent de curtcircuit ve donat per l'equació (120).

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \cdot \left(1 - \cos\left(360 \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res}}\right)\right) & \text{si } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \\ 2 \cdot \delta_1 & \text{si } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (120)$$

On:

- T_{k1} és el temps de rebuig del defecte (0,5 s)
- T_{res} és el període resultat en cas de curtcircuit (0,27 s)

En el cas que ens ocupa,

$$\frac{T_{k1}}{T_{res}} = \frac{0,5 s}{0,27 s} = 1,87 > 0,5$$

Per tant, l'angle d'oscil·lació d'obertura durant el pas té el següent valor:

$$\delta_k = 2 \cdot \delta_1 = 2 \cdot 74,31 = 148,62^\circ$$

L'angle màxim d'oscil·lació que es pot produir correspon a una durada de curtcircuit inferior o igual a la durada del curtcircuit establerta T_{k1} , i es calcula amb l'equació (121).

$$\delta_m = \begin{cases} 1,25 \cdot \arccos \chi & \text{si } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{si } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{si } \chi \leq -0,985 \end{cases} \quad (121)$$

On

- χ ve donat per l'equació (122).

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \cdot \sin(\delta_k) & \text{si } 0 \leq \delta_k \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{si } \delta_k > 90^\circ \end{cases} \quad (122)$$

En aquest cas, $\delta_k = 148,62^\circ$, per tant:

$$\chi = 1 - 3,56 = -2,56$$

$$\delta_m = 180^\circ$$

E.4.4 Força de tensió per oscil·lació durant el curtcircuit

D'acord amb la norma de referència, la força de tensió en curtcircuit, per a conductors, es calcula segons l'equació (123).

$$F_t = F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi) \text{ Per conductor únic} \quad (123)$$

$$F_t = 1,1 \cdot F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi) \text{ Per conductor compost (haz)}$$

On:

- F_{st} és la força estàtica en el conductor
- φ és el paràmetre de càrrega, que té en compte l'esforç combinat de pes i curtcircuit en funció de el temps d'aclarida de el defecte davant el període d'oscil·lació del conductor, i es calcula segons l'equació (124).

$$\varphi = \begin{cases} 3 \cdot (\sqrt{1 + r^2} - 1) & \text{si } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ 3 \cdot (r \cdot \text{seno } \delta_k + \cos \delta_k - 1) & \text{si } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (124)$$

Per tant,

$$\frac{T_{res}}{4} = \frac{0,27 \text{ s}}{4} = 0,067$$

Per trobar la condició en concret,

$$T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4}$$

$$0,5 \geq 0,067$$

Per tant, el valor del paràmetre de càrrega és el següent:

$$\varphi = 3 \cdot \left(\sqrt{1 + 3,56^2} - 1 \right) = 8,09$$

- ψ és un paràmetre que combina els dos factors de càrrega, ξ i φ , i que es calcula com una solució real de l'equació (125).

$$\varphi^2 \cdot \psi^3 + \varphi \cdot (2 + \xi) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot \xi) \psi - (2 + \varphi) \cdot \xi = 0 \quad (125)$$

El factor de càrrega del conductor ξ val 0,00269.

Els resultats de les solucions reals de l'equació (125), en funció dels paràmetres ξ y φ es troben tabulats a la figura 7 de la Norma CEI 865-1.

Pel cas de l'estesa en 110 kV.

$$T_{k1} = 0,5 > \frac{T_{res}}{4} = 0,067 \cdot \varphi = 8,09 \text{ i } \xi = 0,00269$$

Amb els paràmetres anteriors es pot trobar $\psi = 0,020$ (amb l'equació (125) o la Figura 7 de la Norma CEI 865-1).

Per tant, es troba que la força de tensió per oscil·lació durant el curtcircuit és la següent:

$$F_t = 10.300,5 \text{ N} \cdot (1 + 8,09 \cdot 0,02) = 11.994,34 \text{ N}$$

E.4.5 Aproximació de conductors

El valor del desplaçament màxim per oscil·lació en curtcircuit es pot calcular segons l'equació (126).

$$b_h = C_f \cdot C_d \cdot b_c \cdot \text{seno } \delta_1 \quad \text{si } \delta_m > \delta_1 \quad (126)$$

$$b_h = C_f \cdot C_d \cdot b_c \cdot \text{seno } \delta_m \quad \text{si } \delta_m < \delta_1$$

Anteriorment s'ha calculat:

$$\delta_1 = 74,31^\circ, \quad \delta_m = 180^\circ$$

C_f és un factor experimental que cobreix les variacions de la corba d'equilibri del cable durant el defecte, i el seu valor es calcula segons l'equació (127).

$$C_f = \begin{cases} 1,05 & \text{si } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 \cdot r & \text{si } 0,8 \leq r \leq 1,8 \\ 1,15 & \text{si } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (127)$$

En el cas que ens ocupa, $r=3,56$. Per tant, $C_f=1,15$.

El factor C_d considera els augments de la fletxa deguts a l'elongació elàstica i tèrmica i pot obtenir-se per l'equació (128).

$$C_d = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{l}{b_c}\right)^2 \cdot (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (128)$$

On:

- b_c és la fletxa estàtica en el conductor. Tal i com s'ha calculat, $b_c=0,065$ m.
- ε_{ela} és la deformació elàstica que ve donada per l'equació (129).

$$\varepsilon_{ela} = (F_t - F_{st}) \cdot N \quad (129)$$

Per tant, obtenim el següent valor de la deformació elàstica:

$$\varepsilon_{ela} = (11.994,34 \text{ N} - 10.300,5) \cdot 7,3 \cdot 10^{-7} = 0,00124$$

- ε_{th} és la deformació tèrmica i ve donada per l'equació (130).

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n \cdot A_s}\right)^2 \cdot \frac{T_{res}}{4} & \text{si } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ c_{th} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n \cdot A_s}\right)^2 \cdot \frac{T_{k1}}{4} & \text{si } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (130)$$

On:

- C_{th} és el factor de dilatació tèrmica que val $2,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^4/\text{A}^2\text{s}$, degut a que la secció Al / Secció Acer > 6

Per saber la condició, substituïm:

$$0,5 \text{ s} \geq \frac{0,27 \text{ s}}{4}$$

Per tant, el valor de la deformació tèrmica és la següent:

$$\varepsilon_{th} = 2,7 \cdot 10^{-19} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}} \cdot \left(\frac{31.500 \text{ A}}{1 \cdot 455,10 \text{ mm}^2 \frac{1 \text{ m}^2}{10^6 \text{ mm}^2}} \right)^2 \cdot \frac{0,27 \text{ s}}{4} = 8,62 \cdot 10^{-5}$$

Resolent l'equació (128), s'obté el següent resultat:

$$C_d = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{19}{0,0654 \text{ m}} \right)^2 \cdot (0,00124 + 8,62 \cdot 10^{-5})} = 6,56$$

Resolent l'equació (126), s'obté el desplaçament horitzontal màxim del vol per curtcircuit.

$$b_h = 1,15 \cdot 6,56 \cdot 0,0654 \cdot \sin 74,31^\circ = 0,475 \text{ m}$$

E.4.6 Distància mínima

La distància entre els punts mitjos de dos conductors durant el curtcircuit trifàsic, en el cas més desfavorable, es calcularà segons l'equació (131).

$$a_{min} = a - 2 \cdot b_h - d_1 \quad (131)$$

$$a = 2,8 \text{ m (distància entre fases)}$$

$$d_1 = 0 \text{ m (separació entre conductors de la mateixa fase)}$$

Per tant, la distància entre els punts mitjos de dos conductors durant el curtcircuit trifàsic, serà la següent:

$$a_{min} = 2,8 \text{ m} - 2 \cdot 0,475 \text{ m} - 0 \text{ m} = 1,85 \text{ m}.$$

La separació mínima recomanada pel CIGRE és de 0,66 m. Per tant, la distància mínima calculada anteriorment és correcte.

E.5 Xarxa de terres inferiors

La malla de terra que s'instal·larà a la subestació de seccionament serà la mateixa que s'instal·larà a la subestació de transformació. Per tant, els càlculs són els mateixos. Els càlculs realitzats es poden observar a l'apartat B.3. Xarxa de terres inferiors.

E.6 Xarxa de terres superiors

E.6.1 Posició parc intempèrie

La comesa del sistema de terres superiors és la captació de les descàrregues atmosfèriques i la seva conducció a la malla enterrada perquè siguin dissipades a terra sense que es posi en perill la seguretat del personal i dels equips de la subestació.

El sistema de terres superiors consisteix en un conjunt de fils de guarda i / o de puntes Franklin sobre columnes. Aquests elements estan units a la malla de terra de la instal·lació a través de l'estructura metàl·lica que els suporta, que garanteix una unió elèctrica suficient amb la malla.

Pel disseny de sistema de protecció de terres superiors s'ha adoptat el model elèctric geomètric de les descàrregues atmosfèriques i que és generalment acceptat per a aquest propòsit.

El criteri de seguretat que s'estableix és el d'apantallament total dels enfangats i dels equips que componen l'aparellatge, sent aquest criteri el que estableix que totes les descàrregues atmosfèriques que puguin originar tensions perilloses i que siguin superiors a el nivell de l'aïllament de la instal·lació, han de ser captades pels fils de guarda.

Aquest apantallament s'aconsegueix mitjançant una disposició que assegura que la zona de captació de descàrregues perilloses dels fils de guarda i de les puntes Franklin conté totalment a les parts sota tensió.

La zona de captura s'estableix a partir de el radi crític d'encebament (r) i que ve donat per l'equació (132).

$$r = 8 \cdot I^{0,65} \quad (132)$$

On:

- I es calcula segons l'equació (133).

$$I = \frac{U \cdot N}{Z} \quad (133)$$

On:

- U és la tensió suportada a impulsos tipus llamp (650 kV)
- N és el número de línies connectades a la subestació (2)
- Z és la impedància característica de les línies (400 Ω)

Substituint i aplicant els valors s'obté

$$I = \frac{U \cdot N}{Z} = \frac{650 \cdot 2}{400} = 3,25 \text{ kA}$$

Per tant, la zona de captura serà:

$$r = 8 \cdot 3,25^{0,65} = 17,21 \text{ m}$$

El radi crític de 17,21 m amb centre en les puntes Franklin, al centre en els amarratges dels fils de guarda i en el seu punt més baix, garanteix l'apantallament total de la instal·lació.

E.6.2 Edifici de control

La subestació de seccionament de 110 kV disposarà d'un edifici de comandament i control per albergar equips de control i comunicacions. S'aplica la norma NTE IPP per determinar si és necessària la instal·lació de parallamps o d'un altre sistema de captació de raigs en el seu exterior.

Segons aquesta norma, s'instal·laran parallamps si l'índex de risc és superior a 27. L'índex de risc es calcula com la suma de tres paràmetres: a + b + c.

El càlcul de la "a" es determina amb el mapa geogràfic de la Figura 15. Com que la subestació està a la província de Girona, a = 8.

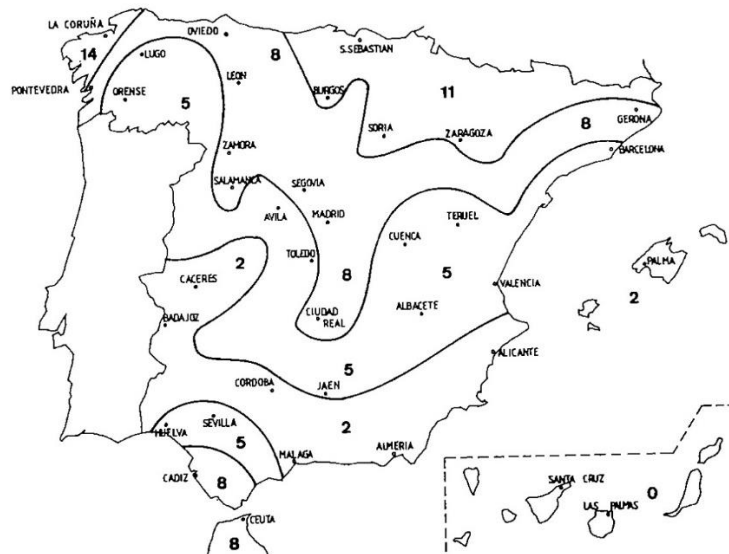


Fig. 2.9. Zonas isoceraúnicas de España.

Figura 15. Mapa geogràfic

El càlcul de la "b" es realitza segons la Figura 16, en funció del tipus d'estructura, del tipus de coberta i alçada.

Tabla 2.2. Cálculo de «b»

Tipo de estructura	Tipo de cubierta	Altura del edificio en metros																				
		4	9	12	15	18	20	22	24	26	28	30	31	33	34	36	38	39	40	42	43	44
Metálica o de hormigón armado	No metálica	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	*
	Metálica	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	*
De ladrillo, hormigón en masa o mampostería	No metálica	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	*
	Metálica	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	*	*	*	*
De madera	No metálica	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	*	*	*
Cualquiera	De ramaje vertical	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	*	*	*	*	*	*

* Instalación obligatoria de pararrayos.

Figura 16. Paràmetres pel càlcul de "b"

La sala de control serà d'estructura metàl·lica o de formigó armat, amb coberta no metàl·lica i una alçada inferior a 12 metres. Per tant, b=2.

El càlcul de la "c" s'obté a la Figura 17 que és en funció de les condicions topogràfiques, arbres i edificis circumdants.

Tabla 2.3 Cálculo de «c»

Condiciones topográficas		Árboles y edificios circundantes		Tipo de edificio		
Terreno	Altitud	Altura respecto del edificio	Número	Vivienda unifamiliar	Bloques de viviendas u oficinas	Otros edificios
Llano	Cualquiera	Igual o mayor	Abundante	0	5	8
		Igual o mayor	Escaso	3	8	11
		Menor	Cualquiera	8	13	16
Ondulado	Cualquiera	Igual o mayor	Abundante	4	9	12
		Igual o mayor	Escaso	7	12	15
		Menor	Cualquiera	12	17	20
Montañoso	300 a 900 m	Igual o mayor	Abundante	6	11	14
		Igual o mayor	Escaso	9	14	17
		Menor	Cualquiera	14	19	22
	Superior a 900 m	Igual o mayor	Abundante	8	13	16
		Igual o mayor	Escaso	11	16	19
		Menor	Cualquiera	16	21	24

Figura 17. Càlcul de "c"

L'edifici estarà en un terreny ondulat. Existeixen algunes estructures i construccions properes de major alçada que l'edifici (pòrtics d'arribada de línia, etc). Per tant, s'agafa el següent valor conservador, c=15.

Per tant, l'índex de risc és el següent:

$$a+b+c = 8+2+15=25 < 27$$

Per tant, no és necessària la instal·lació de parallamps en aquest edifici.

E.7 Estudi acústic de la subestació de seccionament a 110 kV

Els objectius de qualitat acústica s'apliquen els mateixos que s'han considerat a l'estudi acústic de la subestació de transformació a l'apartat B.5.1. Objectius de qualitat acústica.

E.7.1 Resultats experimentals

Per realitzar aquest estudi s'ha mesurat experimentalment el soroll, en el pòrtic amb 1 línia trifàsica (3 conductors en total) a 110 kV i a 9,5 m de la ubicació de la Subestació de Seccionament a 110 kV que es projecta.

Les mesures experimentals inclouen mesures d'evolució temporal amb ponderació freqüencial A, C i sense ponderació freqüencial. També s'ha realitzat l'anàlisi espectral del soroll de la Subestació de transformació en $\frac{1}{3}$ d'octava, sense filtre de ponderació.

El sonòmetre que s'ha emprat és un sonòmetre model SC-420; nombre de sèrie: T247535; classe 1: Microphone C140; nombre de sèrie: 14791; preamplificador PA020; nombre de sèrie : 510.

Tal com mostren les dades experimentals els resultats estan per sota dels 75 (d)- 75 (e)- 65 (n) dB, que corresponen als sectors del territori amb predomini de sòl d'ús Industrial, segons la taula A de l'Annex II del Reial decret 1367/2007, de 19 d'octubre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a zonificació acústica, objectius de qualitat i emissions acústiques.

A les Figura 18 i Figura 19 es pot observar l'evolució temporal en dB al pòrtic d'entrada de la Subestació de Seccionament, a 9,5 metres i els dB a 1/3 d'octava, respectivament.

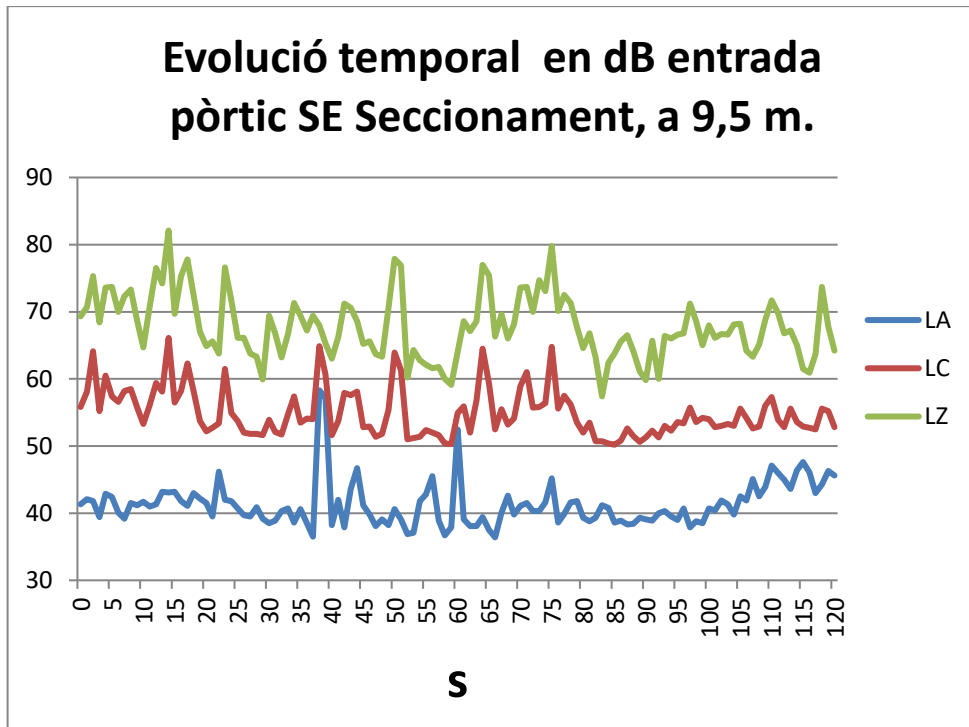


Figura 18. Evolució temporal en dB en el pòrtic a 9,5 metres

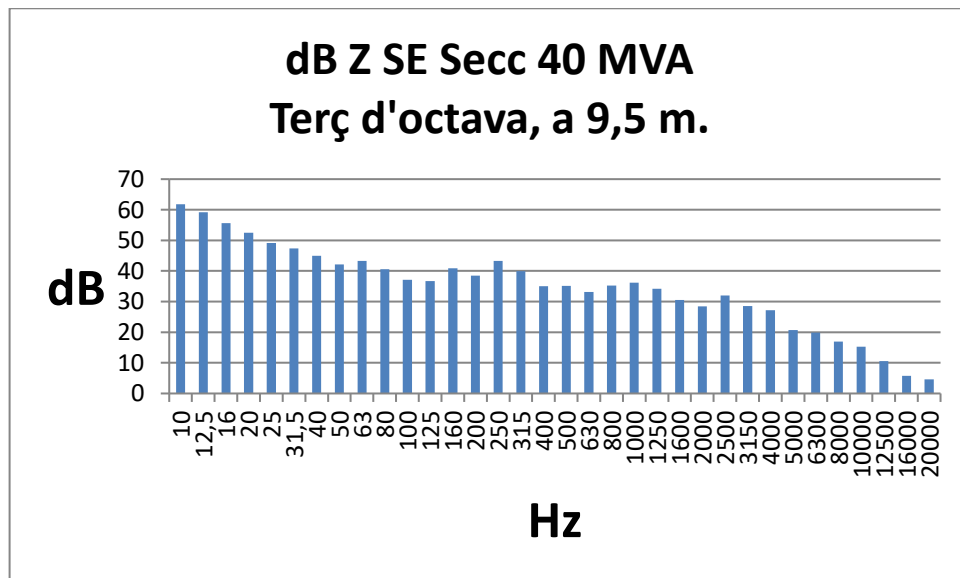


Figura 19. dB a 1/3 d'octava en el pòrtic a 9,5 metres

E.8 Camps elèctrics i magnètics sota la línia

Els conceptes i la normativa que s'ha aplicat en els càlculs dels camps magnètics de la subestació de transformació també s'aplicaran per a la subestació de seccionament:

B.7.1. Camp magnètic sota la línia

B.7.2. Restriccions bàsiques i nivells de referència del Reial Decret 1066/2001

B.7.3. Restriccions bàsiques

B.7.4. Nivells de referència

B.7.5. Nivells de camp

E.8.1 Càlcul del camp electromagnètic B, al punt més desfavorable de la caseta de control de la Subestació de Seccionament a 110 kV

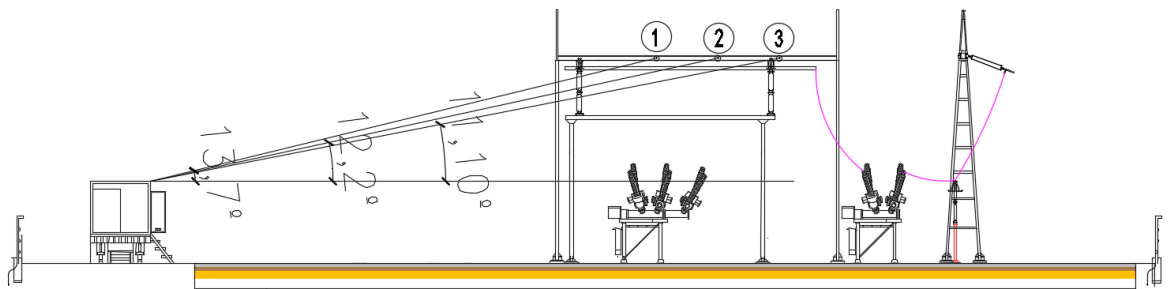


Figura 20. Angle entre la línia de 110 kV i la caseta de control

En tractar-se d'una línia de simple circuit, com la que es veu a la Figura 20, amb conductors 242-AL1/39-ST1A (antic LA 280), es considerarà que pels conductors hi circula la màxima intensitat admissible, 581,22 A.

La distància i l'angle de cada línia amb la caseta es pot observar a la Taula 59.

Taula 59. Distància i angle de la línia de simple circuit amb la caseta

	Línia	
	Angle amb l'horitzontal [graus sexagesimals]	Distància [m]
L1	13,70	25,42
L2	12,20	28,34
L3	11,10	31,28

Taula 60. Resultats de Bx/A per cada línia

	Bx/Ampère	By/Ampère	Mòdul [T/Ampère]	Angle radiants
L1	-9,32E-10	3,82E-09	3,93E-09	-1,33E+00
L2	-7,46E-10	3,45E-09	3,53E-09	-1,36E+00
L3	-6,15E-10	3,14E-09	3,20E-09	-1,38E+00

Taula 61. Mòdul i angle de la intensitat per cada fase

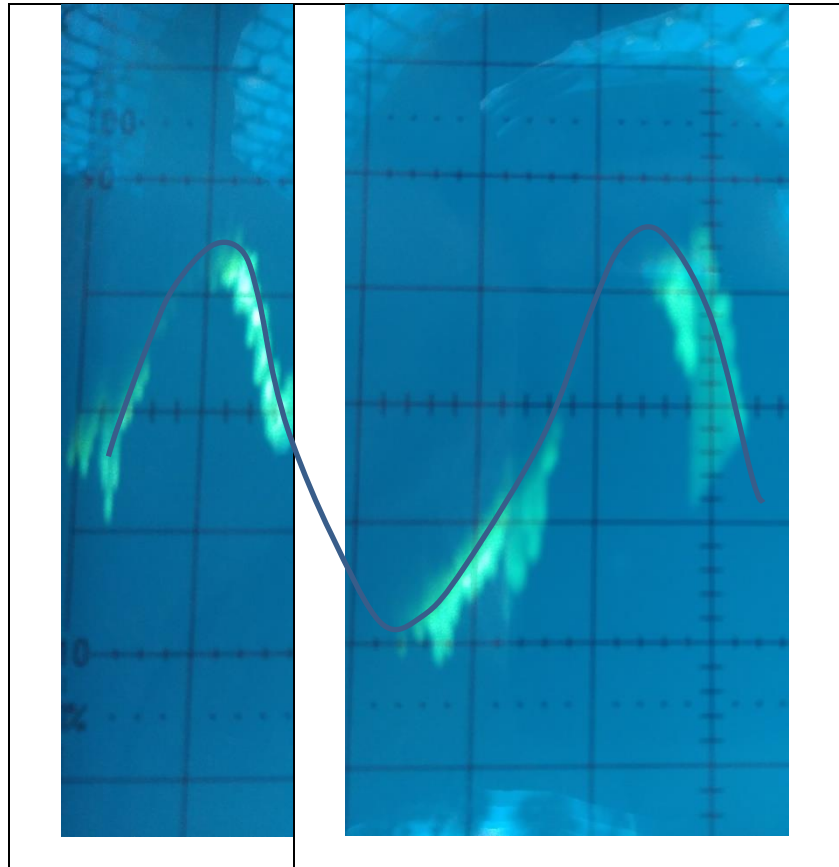
	Mòdul Ampère	Angle radiants
I1	581,22	0,00E+00
I2	581,22	2,09E+00
I3	806,96	4,188790205

Taula 62. Camp magnètic en T per a cada línia

	Mòdul [T]	Angle	Bx [T]	By [T]
L1	2,28E-06	-1,33E+00	5,42E-07	-2,22E-06
L2	2,05E-06	7,30E-01	1,52E-06	1,37E-06
L3	1,85E-06	2,81E+00	-1,76E-06	6,01E-07
			3,02E-07	-2,49E-07
			3,81E-07	Mòdul total [T]

Aquest valor de $0,381 \mu\text{T}$, es veu augmentat per l'aparellatge d'entrada, bobines, efecte corona i corrents capacitius.

La mesura experimental de camp electromagnètic a l'entrada de la Subestació de Seccionament a 110 kV, extrapolada a una línia trifàsica d'entrada i sortida, dóna un valor de $31,84 \mu\text{T}$.



El valor màxim de camp electromagnètic B, pren valors d'unes $31,84 \mu\text{T}$. Aquest valor és inferior a les $100 \mu\text{T}$, del Quadre 2, de Nivells de referència per a camps elèctrics, magnètics i electromagnètics (0 Hz- 300 GHz, valors rms impertorbats), del Reial Decret 1066/2001, de 28 de setembre, pel qual s'aprova el Reglament que estableix condicions de protecció del domini públic radioelèctric, restriccions a les emissions radioelèctriques i mesures de protecció sanitària davant d'emissions radioelèctriques.