



Projecte Final de Grau

# Estudi de l'efecte corona a les línies elèctriques aèries d'alta tensió

**Estudiant:** Xavier Corbi Diaz.

**Director:** Ricard Horta Bernús.

Grau en Enginyeria Elèctrica.

Universitat Politècnica de Catalunya.

Escola d'Enginyeria de Terrassa

Gener de 2017

## Índex

Índex de figures.....	5
Índex de taules.....	8
Índex de CD.....	10
Agraïments.....	11
Objectius.....	13
Distribució temporal i contingut.....	15
1. Història.....	19
2. Teoria de càlcul .....	23
2.1 Fonaments teòrics .....	23
2.1.1 Conductor positiu .....	24
2.1.2 Conductor negatiu .....	25
2.1.3 Tipus de descàrrega .....	27
2.1.4 Tipus de Corona .....	29
2.2 Càlcul del Gradient crític i la tensió crítica disruptiva. ....	32
2.2.1 Càlcul de la tensió crítica disruptiva, Fórmula de Peek. ....	32
2.2.2 Càlcul del camp crític o gradient crític, Fórmula de Peek. ....	34
2.3 Càlculs segons geometria .....	36
2.3.1 Conductors concèntrics.....	37
2.3.2 Conductors en paral·lel.....	38
2.3.3 Conductors paral·lels a un pla .....	39
2.3.4 Conductors en feix.....	40
2.3.5 Sistemes trifàsics .....	44
2.4 Configuració del número de subconductors. ....	47
2.5 Distribució simètrica. ....	48
2.6 Distribució asimètrica.....	50
2.7 Comportament reactiu dels conductors.....	52

---

2.8	Pèrdues per efecte corona.....	52
2.8.1	Fonaments físics de les pèrdues per efecte corona.....	54
2.8.2	Variació de la capacítancia d'un conductor per l'efecte corona.....	57
3.	Comparativa dels diferents mètodes de càlcul.....	51
3.1	Pèrdues per efecte corona segons Peek.....	61
3.1.1	Determinació de la matriu de coeficients de potencial per una línia simple.....	62
3.1.2	Determinació de la matriu de coeficients de potencial per una línia simple amb conductor de terra, i per una línia doble.....	66
3.1.3	Càlcul del camp elèctric a la superfície del conductor.....	67
3.2	Altres formes de càlcul de les pèrdues per efecte corona.....	70
3.2.1	Fórmula de Ryan i Henline.....	70
3.2.2	Fórmula de Peterson.....	72
3.2.3	Mètode d'Electricité de France (EDF).....	75
3.3	Discussió sobre els mètodes de càlcul.....	79
4.	Mètodes anticorona.....	81
5.	Aplicació dels diferents mètodes de càlcul a una línia real.....	85
5.1	Dimensionat elèctric de la línia aèria d'alta tensió.....	85
5.1.1	Dades de la instal·lació.....	85
5.1.2	Càlcul de les magnituds físiques i elèctriques de la línia.....	88
5.1.3	Càlcul de les equacions i dels coeficients de transmissió.....	93
5.2	Càlcul de l'efecte corona pel mètode de Peek.....	97
5.2.1	Dades necessàries i càlcul de les distàncies entre els conductors.....	97
5.2.2	Càlcul de la matriu de coeficients de potencial i de les càrregues equivalents de cada conductor.....	101
5.2.3	Càlcul del camp elèctric o gradient elèctric, a la superfície del conductor.....	106
5.2.4	Càlcul del camp crític i de la tensió crítica disruptiva.....	107
5.2.5	Obtenció de les pèrdues per l'efecte corona.....	110

5.3	Altres mètodes de càlcul de pèrdues per l'efecte corona.....	115
5.3.1	Fórmula de Ryan i Henline.....	115
5.3.2	Fórmula de Peterson.....	117
5.3.3	Mètode d'Electricité de France (EDF).....	122
5.4	Discussió dels resultats obtinguts.....	129
6.	Estudi de l'efecte corona al laboratori.....	131
6.1	Introducció.....	131
6.2	Característiques de la instal·lació.....	131
6.2.1	Esquema elèctric.....	131
6.2.2	Material utilitzat i característiques.....	133
6.2.3	Plànols.....	144
6.3	Assaigs realitzats.....	145
6.3.1	Assaig per veure l'efecte visual.....	145
6.3.2	Assaig d'un conductor de radi gran.....	148
6.3.3	Assaig d'un conductor de radi petit.....	151
6.3.4	Assaig de 2 conductors.....	153
6.3.5	Assaig de 4 conductors.....	157
6.3.6	Assaig amb 4 conductors agrupats.....	160
6.3.7	Assaig d'un conductor amb brutícia.....	162
6.4	Discussió dels assaigs realitzats.....	165
7.	Conseqüències de l'efecte corona sobre el medi ambient i les persones.....	169
7.1	Impacte del camp electromagnètic (CEM).....	169
7.1.1	Impacte sobre les persones del CEM.....	173
7.1.2	Impacte sobre el medi ambient del CEM.....	175
7.2	Impacte de l'ozó.....	177
7.2.1	Impacte sobre les persones de l'ozó.....	178

---

7.2.2	Impacte sobre el medi ambient de l'ozó.....	179
7.3	Impacte de l'àcid nítric.....	180
7.3.1	Impacte sobre les persones de l'àcid nítric.....	180
7.3.2	Impacte sobre el medi ambient de l'àcid nítric.....	181
7.4	Altres impactes.....	181
8.	Programa de càlcul de les pèrdues per l'efecte corona.....	183
8.1	Característiques i variacions del programa.....	183
8.2	Funcionament del programa.....	184
9.	Propostes d'ampliació del projecte.....	197
	Bibliografia.....	199
	Annexos.....	201
	Annex I. Plànols.....	201
	Annex II. Article tècnic.....	209

## Índex de figures

Figura I Diagrama de Gantt.....	17
Figura 1-1 Representació del foc de Sant Elm als extrems dels pals d'un vaixell (Hartwig, 1886).....	19
Figura 2-1 Etapes d'una descarrega positiva.....	25
Figura 2-2 Etapes d'una descarrega negativa.....	26
Figura 2-3 Posició cilíndrica per l'estudi de l'efecte corona en funció de radi del conductor.....	27
Figura 2-4 Alteració que pateix la intensitat de corrent (capacitiva) com a conseqüència de l'efecte corona positiu i negatiu al ser visualitzada amb un oscil·loscopi.....	28
Figura 2-5 Descàrregues característiques de l'efecte corona en les línies de transmissió, les tensions 1 i 4 són les tensions crítiques, per polaritat negativa i positiva, respectivament.....	31
Figura 2-6 Esquema de conductor concèntric.....	37
Figura 2-7 Conductors amb disposició paral·lela.....	38
Figura 2-8 Conductor paral·lel a un pla.....	39
Figura 2-9 Esquema de sis subconductors d'una fase amb els seus paràmetres més rellevants...	41
Figura 2-10 Representació d'un sistema trifàsic amb els seus conductors paral·lels al pla de terra.....	45
Figura 2-11 Distribució del gradient elèctric, en una configuració de 2 subconductors per fase.....	47
Figura 2-12 Distribució del gradient elèctric, en una configuració de 4 subconductors per fase.....	47
Figura 2-13 Gràfic on es mostra el valor del gradient elèctric al voltant del feix de conductors, per a 16 subconductors, en funció de la seva posició angular.....	49
Figura 2-14 Configuració asimètrica de 6 subconductors.....	50
Figura 2-15 Corba característica de l'efecte corona.....	54
Figura 2-16 Gràfic que mostra una sobretensió que supera la tensió disruptiva sobre un conductor.....	55
Figura 2-17 Histèresis per corona. Corba $Q=f(U)$ . Corba que relaciona la càrrega sobre un elèctrode, en funció de la tensió que se l'aplica.....	56
Figura 2-18 Deformació que pateix l'ona incident com a conseqüència del increment de la capacitància del conductor, ocasionada per l'efecte corona.....	59
Figura 3-1 Línia elèctrica trifàsica en presència del pla de terra. El punt $P_i$ correspon a un punt de la superfície del conductor i i la càrrega $q_j$ esta situada en el eix del conductor j.....	64
Figura 3-2 Camp elèctric en els conductors que formen el feix.....	69

---

Figura 3-3 Increment de les pèrdues en funció de la humitat.....	71
Figura 3-4 Funció de Peterson per relacions $V/ed$ entre 0,6 i 2,4.....	74
Figura 3-5 Funció de Peterson per relacions $V/ed$ entre 1 i 19.....	74
Figura 3-6 Gràfic que relaciona el gradient relatiu amb les pèrdues $P_o$ per conductors secs.....	75
Figura 3-7 Determinació del factor $m$ .....	77
Figura 3-8 Pèrdues específiques per corona en kW/km/fase.....	78
Figura 4-1 Anell Anticorona juntament amb la cadena d'aïlladors, en amarre.....	81
Figura 4-2 Anells Anticorona juntament amb la cadena d'aïlladors, en suspensió.....	81
Figura 5-1 Secció de la línia a estudiar, distàncies en mm.....	85
Figura 5-2 Conductor de 54+7 fils, de Alumini i acer galvanitzat.....	87
Figura 5-3 Secció de la línia amb l'alçada respecte al pla de terra, distàncies en mm.....	98
Figura 5-4 Secció de la línia amb els seus conductors i les seves imatges.....	99
Figura 5-5 Funció de Peterson per relacions $V/ed$ entre 0,6 i 2,4.....	120
Figura 5-6 Gràfic que relaciona el gradient relatiu amb es pèrdues $P_o$ per conductors secs.....	123
Figura 5-7 Detall del feix de la línia, distàncies en mm.....	125
Figura 5-8 Determinació del factor $m$ .....	127
Figura 5-9 Pèrdues específiques per efecte corona en kW/km i fase.....	127
Figura 6-1 Esquema elèctric visual.....	132
Figura 6-2 Esquema elèctric amb símbols, segons UNE.....	132
Figura 6-3 Autotransformador monofàsic regulable motoritzat.....	133
Figura 6-4 Placa de característiques del Autotransformador monofàsic regulable motoritzat.....	134
Figura 6-5 Placa de característiques del motor del autotransformador monofàsic regulable motoritzat.....	134
Figura 6-6 Transformador d'alta tensió de 220 / 75000 V.....	135
Figura 6-7 Placa de característiques del Transformador d'alta tensió.....	136
Figura 6-8 Divisor capacitiu.....	137
Figura 6-9 Transformador de Tensió.....	138
Figura 6-10 Placa de característiques del Transformador de Tensió.....	138
Figura 6-11 Resistència limitadora.....	139
Figura 6-12 Bancada d'efecte corona amb tub.....	140
Figura 6-13 Bancada d'efecte corona amb el pla de terra.....	141
Figura 6-14 Amperímetre de Pinça.....	142
Figura 6-15 Panell de control.....	143

Figura 6-16 Alçat, planta i perfil de la bancada d'efecte corona amb el tub.....	144
Figura 6-17 Alçat, planta i perfil de la bancada d'efecte corona amb el pla de terra.....	144
Figura 6-18 Configuració de conductors per l'assaig de l'efecte corona visual, distància en mm.....	145
Figura 6-19 Efecte corona visual .....	146
Figura 6-20 Detall del conductor en l'assaig del efecte corona visual.....	147
Figura 6-21 Bancada per l'assaig de l'efecte corona visual.....	147
Figura 6-22 Configuració del conductor per l'assaig d'un conductor de radi gran, distància en mm.....	149
Figura 6-23 Bancada per l'assaig d'un conductor de radi gran.....	149
Figura 6-24 Configuració del conductor per l'assaig d'un conductor de radi petit, distància en mm.....	152
Figura 6-25 Bancada per l'assaig d'un conductor de radi petit.....	152
Figura 6-26 Configuració dels conductors per l'assaig de dos conductors, distàncies en mm.....	154
Figura 6-27 Bancada per l'assaig de dos conductors.....	154
Figura 6-28 Configuració dels conductors per l'assaig de 4 conductors, distàncies en mm.....	158
Figura 6-29 Bancada per l'assaig de 4 conductors.....	158
Figura 6-30 Configuració dels conductors per l'assaig de 4 conductors agrupats, distàncies en mm.....	160
Figura 6-31 Configuració de 4 conductors agrupats.....	160
Figura 6-32 Muntatge i bancada de l'assaig de 4 conductors agrupats.....	161
Figura 6-33 Configuració dels conductors per l'assaig d'un conductor amb brutícia, distàncies en mm.....	162
Figura 6-34 Conductor amb brutícia per realitzar l'assaig.....	163
Figura 7-1 Espectre Electromagnètic.....	170
Figura 7-2 Variació CEM en funció de la distància per un conductor que transporta 100 A.....	172
Figura 7-3 Variació del camp elèctric i el camp magnètic, respecte els diferents nivells de tensió.....	173
Figura 8-1 Configuració en capa dels conductors.....	184
Figura 8-2 Subapartat d'introducció de dades i resultats del programa de càlcul de pèrdues per efecte corona.....	185
Figura 8-3 Subapartat del mètode dels gradients, del programa de càlcul de les pèrdues per efecte corona.....	189



---

Figura 8-4 Subapartat del càlcul de les tensions crítiques, del programa de càlcul de les pèrdues per efecte corona.....	193
Figura 8-5 Subapartat del càlcul de les pèrdues per efecte corona amb el mètode de Peek llarg, del programa de càlcul de les pèrdues per efecte corona.....	194

## Índex de taules

Taula I Distribució temporal.....	17
Taula 2-1 Configuracions més comuns de número de subconductors, junt amb el diàmetre del feix.....	48
Taula 3-1 Valors de m per diferents casos.....	73
Taula 3-2 Relació entre $\phi$ i V/ed.....	74
Taula 3-3 Determinació del factor m.....	78
Taula 3-4 Pèrdues específiques per corona en kW/km/fase.....	78
Taula 5-1 Tensions nominals i tensions més elevades de la xarxa. (RLAT, 2008).....	86
Taula 5-2 Valors dels paràmetres elèctrics per diferents estats de carrega.....	96
Taula 5-3 Distàncies entre conductors, i aquests amb les seves imatges.....	100
Taula 5-4 Tensions crítiques.....	109
Taula 5-5 Valors de m per diferents casos.....	119
Taula 5-6 Relació entre $\phi$ i V/ed.....	120
Taula 5-7 Determinació del factor m.....	127
Taula 5-8 Pèrdues específiques per efecte corona en kW/km i fase.....	128
Taula 5-9 Resultats de pèrdues per efecte corona pels diferents mètodes.....	130
Taula 6-1 Placa de característiques del autotransformador monofàsic regulable motoritzat....	134
Taula 6-2 Placa de característiques del motor del autotransformador monofàsic regulable motoritzat.....	134
Taula 6-3 Placa de característiques del Transformador d'alta tensió.....	136
Taula 6-4 Placa de característiques del Transformador de Tensió.....	139
Taula 6-5 Intensitat de pèrdues de la instal·lació en funció dels diferents nivells de tensió.....	148
Taula 6-6 Dades de l'assaig per un conductor de radi gran, amb la placa de terra a una alçada de 0 cm.....	150
Taula 6-7 Dades de l'assaig per un conductor de radi gran, amb la placa de terra a una alçada de 4,75 cm.....	150

Taula 6-8 Dades de l'assaig per un conductor de radi gran, amb la placa de terra a una alçada de 9,25 cm.....	151
Taula 6-9 Dades de l'assaig per un conductor de radi petit.....	153
Taula 6-10 Dades de l'assaig per 2 conductors, amb la placa de terra a una alçada de 0 cm.....	155
Taula 6-11 Dades de l'assaig per 2 conductors, amb la placa de terra a una alçada de 4,75 cm.....	155
Taula 6-12 Dades de l'assaig per 2 conductors, amb la placa de terra a una alçada de 9,25 cm.....	156
Taula 6-13 Dades de l'assaig per 2 conductors, sense placa de terra.....	156
Taula 6-14 Dades de l'assaig per 4 conductors.....	159
Taula 6-15 Dades de l'assaig per 4 conductors agrupats.....	161
Taula 6-16 Dades de l'assaig per un conductor amb brutícia.....	163
Taula 6-17 Potència de pèrdues per cada tipus de configuració.....	165
Taula 6-18 Resultats del programa per un conductor de radi petit i 30 kV.....	167
Taula 7-1 Valors mitjos de camps elèctrics i magnètics mesurats.....	171
Taula 8-1 Introducció de les dades de la línia.....	185
Taula 8-2 Tensió més elevada de la línia, segons (Indústria, 2008).....	186
Taula 8-3 Valor del coeficient $\alpha$ , per conductors d'alumini-acer.....	187
Taula 8-4 Dades de la línia calculades, a partir de les dades introduïdes.....	187
Taula 8-5 Resum de resultats de pèrdues, tensions i gradients.....	188
Taula 8-6 Taula de distàncies entre conductors i aquests i les seves imatges, per configuració capa.....	190
Taula 8-7 Matrius de distàncies entre conductors, entre aquests i les seves imatges i de coeficients de potencials, juntament amb les dades necessàries.....	190
Taula 8-8 Dades complementaries pel càlcul de la matriu de coeficients de potencial i per completar càlculs del mètode del gradient.....	191
Taula 8-9 Càlcul del vector de tensions.....	191
Taula 8-10 Càlcul dels determinants de la matriu de coeficient de potencial pel vector de tensions.....	192
Taula 8-11 Carregues equivalents, gradients mitjos i màxims per cada fase.....	192
Taula 8-12 Càlcul del vector de tensions, juntament amb el gradient crític.....	193
Taula 8-13 Càlcul de les tensions crítiques.....	194
Taula 8-14 Càlcul de gradients crítics i visual.....	195
Taula 8-15 Càlcul de les pèrdues per efecte corona, segons el mètode de Peek llarg.....	195

---

Taula 8-16 Càlcul de les pèrdues per efecte corona segons el mètode de Peek simplificat, en el programa de càlcul de pèrdues per efecte corona.....	196
---	-----

## Índex del CD

Plànols de la bancada utilitzada en el capítol 6, tant arxius AUTOCAD com PDF.

Programes realitzats pel càlcul de les pèrdues per efecte corona, al capítol 8.

Esquemes elèctrics realitzats al capítol 6, tant arxius AUTOCAD com imatges o PDF.

Fotografies realitzades als assaigs del capítol 6.

Articles o informes utilitzats, com el BOE 299/2016, o el reglament de línies aèries d'alta tensió de 2008, entre d'altres que han estat necessaris per la realització del projecte.

## **Agraïments**

Principalment vull agrair l'ajuda, el suport i la motivació, al meu tutor, i a tots els professors i docents per l'ajuda donada.

També vull agrair el suport a la meva família i amics, sobretot als meus pares, per ser sempre com són i donar-me les oportunitats que tinc a la vida.

A la meva germana per motivar-me i seguir endavant, i per donar-me suport en els moments difícils.

Al meu grup d'amics, que ens coneixem des de l'institut i sempre m'han recolzat i ajudat en els moments difícils.

Als meus companys de classe i amics de la universitat, què hem passat molt, però sempre ens hem superat en tot, i ja estem al final.

I a totes les persones què tenen a veure amb mi, que tots i cada un d'ells sap lo especial que és per mi.



## **Objectius**

Els objectius d'aquest projecte és, poder fer l'estudi de les pèrdues per l'efecte corona que pateixen les línies elèctriques aèries d'alta tensió, ja que apart de patir unes pèrdues de potencia, a les companyies elèctriques també proporciona unes pèrdues econòmiques.

Es farà l'estudi dels diferents mètodes de càlcul desenvolupats fins l'actualitat, així com fer la seva comparació i fer l'estudi de les seves fórmules i expressions, també es veuran les conseqüències de l'efecte corona al medi ambient i les persones.

Totes aquestes expressions desenvolupades, es duran a terme al càlcul d'una línia real i es compararan els resultats obtinguts, també s'estudiarà l'efecte corona en el laboratori, i es farà un estudi de les dades obtingudes en ell.

Per últim es farà un programa de càlcul, per tal de simplificar el llarg procés de càlcul de les pèrdues per efecte corona en una línia aèria d'alta tensió.



## **Distribució temporal i contingut.**

Així s'ha distribuït la feina realitzada en aquest projecte, s'ha representat al Diagrama de Gantt, des del 01/09/2016 fins el 10/01/2017, exposat a la Taula I, i a la Figura I.

A continuació s'anomenen les parts o capítols realitzats.

### **Treball previ**

- Cerca de informació, recopilació de material necessari, trobar bibliografia, etc..

### **Capítol 1**

- **Historia.**  
Base històrica de l'efecte corona, els seus principis, científics que ho van estudiar.

### **Capítol 2**

- **Teoria de Càlcul.**  
Explicar la base teòrica que hi ha a l'efecte corona, explicar els diferents tipus, desenvolupar les diferents formules.

### **Capítol 3**

- **Comparativa dels diferents mètodes de càlcul.**  
Comparar diferents mètodes de càlcul que hem trobat a les diferents bibliografies.

### **Capítol 4**

- **Mètodes anticorona**  
Anomenar i descriure els diferents mètodes o elements que es fan servir per millorar les pèrdues per efecte corona a les línies aèries de alta tensió.

### **Capítol 5**

- **Aplicació dels diferents mètodes de càlcul a una línia real**  
Calcular les pèrdues de l'efecte corona en una línia real, que compleixi el reglament.



## Capítol 6

- **Estudi de l'efecte corona al laboratori.**

Fer assaigs del fenomen de l'efecte corona, amb diferents distribucions dels conductor, com per exemple dúplex, tríplex, etc... i comparar els resultats.

## Capítol 7

- **Conseqüències de l'efecte corona sobre el medi ambient i les persones.**

Fer l'estudi de com l'efecte corona afecta a les persones, comprovar el reglament, estudiar les emissions de ozó, i veure tot el procés de com es crea, i quins efectes nocius comporten aquestes emissions.

## Capítol 8

- **Programa de càlcul de les pèrdues per l'efecte corona.**

Construir una fulla de càlcul per les pèrdues per efecte corona, i tots els càlculs pertinents sobre l'efecte, que pugui ser interactiu, per diferents distribucions de conductors, i per diferents dades de la línia que vulguem calcular.

## Capítol 9

- **Propostes d'ampliació del projecte.**

Llista amb les propostes què es fan per a projectes que es puguin realitzar en el futur, problemes que s'han trobat i què es podrien solucionar, altres camins per on fer recerca.

Part	Data de inici	Duració (dies)	Data de final
Treball previ	01/09/2016	10	11/09/2016
Capítol 1	12/09/2016	10	22/09/2016
Capítol 2	23/09/2016	20	13/10/2016
Capítol 3	13/10/2016	25	07/11/2016
Capítol 4	07/11/2016	5	12/11/2016
Capítol 5	09/11/2016	20	29/11/2016
Capítol 6	12/12/2016	20	01/01/2017
Capítol 7	28/11/2016	18	16/12/2016
Capítol 8	18/12/2016	20	07/01/2017
Capítol 9	06/01/2017	1	07/01/2017

Taula I Distribució temporal.

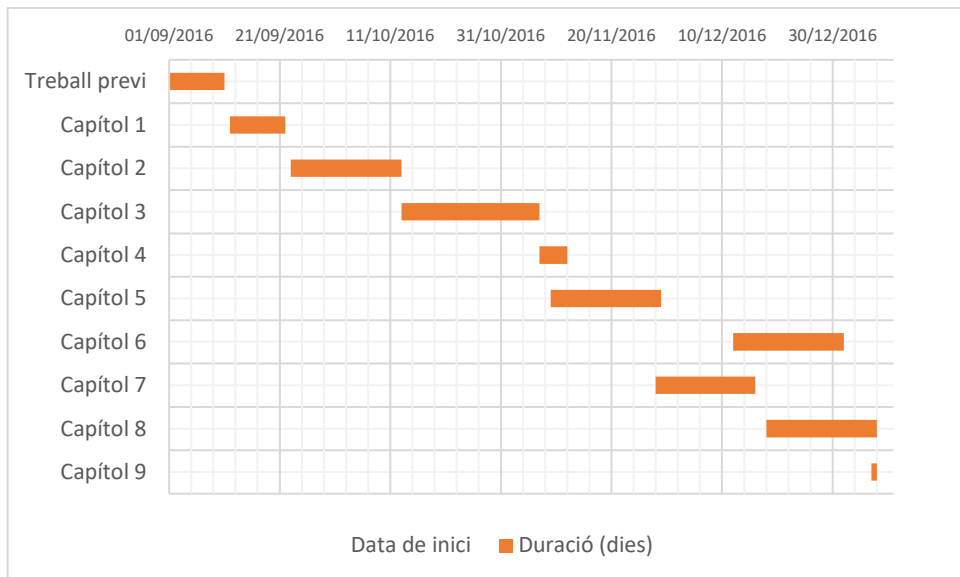


Figura I Diagrama de Gantt.



## 1 Història

La primera visió de l'efecte Corona, es pot situar sobre els voltants del segle XV, durant la conquesta d'Amèrica. Cristòbal Colon va poder veure el fenomen anomenat “foc de Sant Elm”, què va ser una descàrrega d'efecte corona electroluminescent, provocada per la ionització de l'aire, dins d'un fort camp elèctric produït per una tempesta, concretament era un plasma de baixa densitat i baixa temperatura, provocat per una gran diferència de potencial elèctric atmosfèric, què va sobrepassar el valor de ruptura dielèctrica, que en l'aire està al voltant d' uns 3 MV/m, és a dir uns 30 kV/cm.



**Figura 1-1 Representació del foc de Sant Elm als extrems dels pals d'un vaixell (Hartwig, 1886).**

En altres esdeveniments importants també va aparèixer aquest efecte, com per exemple en l'expedició on els mariners Magallanes y Juan Sebastian el Cano, van fer la primera volta al món, en moltes expedicions durant el segles XV i XVI va ser molt conegut aquest fenomen.

Aquest fenomen es pot observar amb freqüència en els pals dels vaixells durant tempestes elèctriques. Benjamin Franklin va observar en el 1749 que “el foc de Sant Elm” és de naturalesa

---

elèctrica, i pot aparèixer no només als pals dels vaixells, també en els avions, dirigibles o fins i tot a les banyes del bestiar.

Les primeres experiències sobre l'efecte corona què es van iniciar a principis de segle, van ser produïdes amb la ajuda de fils prims, d'alguns mil·límetres de diàmetre.

Quan en el fil se li aplicava una tensió suficient, al seu voltant es produïa un efecte lluminós, de color blau – violeta, de secció transversal circular.

La presència d'aquesta llum uniforme, al voltant del conductor a donat el nom universalment conegut com efecte corona.

En les línies de transmissió aèries aquest fenomen passa a partir dels 21,20 kV/cm (valor eficaç o rms<sup>1</sup>) o 30 kV/cm (Valor de pic), aquets valors representen el gradient disruptiu del aire sota condicions estàndard, es a dir 25°C i 760 mmHg<sup>2</sup>.

Es pot considerar que el verdader pioner de l'estudi científic de l'efecte corona, és un enginyer i investigador americà, F.W.Peek (Peek, 1911), treballador de General elèctric, que en el 1920 va establir una llei empírica expressant l'ombrall de l'aparició de la llum, llei cèlebre que avui dia és encara utilitzada.

Però la curiositat científica va ser sense cap dubte la gran motivació original dels investigadors, els primers transports d'energia en alta tensió, van mostrar ràpidament que l'efecte corona era una font de pèrdues, i llavors va ser quan les preocupacions d'origen econòmic, van impulsar als investigadors a aprofundir en aquests mecanismes.

Des de 1920 fins abans de la segona guerra mundial, sobre mitjans dels anys 30, van sortir nombroses teories per explicar la formació de les pèrdues pel moviment de les càrregues de l'espai, creades per ionització, al voltant dels conductors. Podem destacar en aquesta època els estudis de J..S. Carroll, M.M Rockwell, W.S. Peterson (Peterson, 1933), Ryan i Henline (1924) (Ryan, et al., 1924), Hesselmeyer i Kostko (1925), Holm (1927), tots aquests van aprofundir els coneixements obtinguts per Peek.

---

<sup>1</sup> Valor eficaç.

<sup>2</sup> Unitat de la pressió en mil·límetres de mercuri.

En aquest mateix període es va posar en evidència el fet en que l'efecte lluminós en els fils primers, evoluciona en descàrregues discretes quan el diàmetre del conductor utilitzat creix, això es mèrit de Trichel (1938), però més tard Loeb, va analitzar les característiques i els mecanismes de formació d'aquestes descàrregues, més comunament anomenades efluvis<sup>3</sup>.

Aquesta discretització s'observava en els cilindres perfectament polits, i es molt afavorida, en el cas dels conductors industrials, per les irregularitats de la superfície tals com, dipòsits de pols, pol·lució industrial, inclús de petits insectes. Totes aquestes aspors de la natura diferent, creen un reforç local del camp elèctric, i tenen com a conseqüència una reducció del nivell de tensió d'aparició d'efluvis. Aquesta influència de l'estat de la superfície del conductor se la coneixerà com a coeficient de l'estat de la superfície.

No va ser fins després de la segona guerra mundial quan es va començar tot l'estudi de les perturbacions radioelèctriques, sobretot en molt altes tensions, el què va introduir la utilització de conductors en feix.

De 1945 a 1955 es van efectuar les primeres instal·lacions experimentals, com ho son les de Chevilly – Larrue i Alpe – d'Huez.

També es va demostrar la formació d'ozó, i en cas d'humitat, la formació d'àcid nítrós, d'aquesta manera l'efecte corona pot ser detectat i reconegut pel soroll sibilant, i per la vista, degut a la luminescència dels efluvis blavosos i també per l'olfacte com a conseqüència de la formació d'ozó o àcid nítrós.

El seu nom es fonamenta en la corona o aureola què envolta el conductor, un cop el gradient disruptiu de l'aire s'ha vist excedit pel potencial del conductor.

L'efecte corona designa el conjunt de fenòmens relacionats amb l'aparició de conductivitat en un gas al voltant d'un conductor que transporta alta tensió.

La presència de camp elèctric en la proximitat del conductor origina la ionització del gas, què equival a un increment del seu diàmetre eficaç, sobretot en zones de gran curvatura (efecte de les puntes). Per això apareix una corrent de fuga, per tant es produeixen unes pèrdues de potència.

---

<sup>3</sup> Descàrrega elèctrica en els gasos o en l'aire, caracteritzada per una luminescència feble.

---

Aquest fenomen, s'observa tant en corrent altern com en corrent continu, i per polaritats positives i negatives.

Les pèrdues que ocasiona sobre les línies de transmissió s'han vist col·locades en segon pla, ja que la interferència sobre les comunicacions sense fils es la que té major importància, juntament amb el soroll audible a causa de l'existència de línies de transmissió de més de 800 kV, ja que en l'època dels estudis de Peek, la tensió màxima de les línies de transmissió estava al voltant dels 200 kV a nivell de experimentació, concretament Peek va fer els seus assaigs en una línia de 275 metres de longitud, alimentada per un transformador monofàsic de 200 kV, on el diàmetre dels conductors anava des de els pocs mil·límetres fins la polsada, que són uns 2,5 cm.

Es pot dir que aquest efecte avui dia es segueix estudiant, i sobretot té molta importància a causa de les pèrdues que provoca a les línies de transmissió.

## 2. Teoria de càlcul

L'efecte corona és característic dels sistemes de extra i ultra alta tensió, i s'observa quan el potencial d'un conductor sobrepassa la rigidesa dielèctrica del medi gasós que l'envolta. El cas més freqüent es, en el medi del aire, on aquest fenomen passa a partir dels 21,1 kV/cm, valor eficaç, o 29,8 kV/cm en valor de pic, són valors del gradient disruptiu sota condicions estàndard, és a dir a 25°C, i 760 mmHg.

Si un conductor d'una línia aèria, obté un potencial lo suficientment elevat com per produir un camp elèctric a la superfície dels seus conductors, igual o superior a la rigidesa dielèctrica del aire es produiran descàrregues incompletes en l'aire, denominades descàrregues corona. Aquestes descàrregues localitzades en la proximitat del conductor, produeixen pèrdues de potència y perturbacions radioelèctriques. Quan la tensió augmenta, les descàrregues corona es fan visibles en la foscor en forma d'un resplendor blanc-blavós, anomenats efluvis, al voltant de les zones del conductor i ferramentes amb major gradient de tensió.

A més, les descàrregues corona provoquen la degradació dels aïllaments dels materials compostos degut a l'aparició d'ozó, on més endavant tractarem aquest tema en profunditat, i òxids nítrics que en presència de la humitat del aire és forma àcid nítric. Aquest reacciona amb el material compost ennegrint la seva superfície, i conduint a la pèrdua d'elasticitat i de les propietats hidrofòbiques, que són les responsables del bon comportament d'aquests aïllaments enfront la contaminació.

La tensió a la que el camp elèctric produït és igual a la rigidesa dielèctrica del aire, s'anomena tensió crítica d'inici de les descàrregues tipus corona i aquella per la qual comencen els efluvis, tensió crítica visual de efecte corona. Les pèrdues corona comencen quan la tensió arriba a la tensió crítica d'inici de descàrregues corona.

### 2.1 Fonaments teòrics

Amb la teoria de Townsend es pot explicar la descàrrega coneguda com efecte corona. Els ions i els electrons lliures en l'aire, que han sigut generats per la radiació còsmica o radioactiva, es veuen exposats a l'acció del camp elèctric del conductor energitzat. Si aquest conductor transporta un corrent altern, la polaritat canvia a cada semicicle, per tant les partícules són



atretes o repel·lides. Si la intensitat del camp penetrant és suficientment elevada, aquestes partícules pateixen una acceleració, arriben a una energia cinètica suficient per ionitzar per col·lisió a altres partícules neutrals. Els electrons així alliberats participen en aquest procés, el qual va incrementant-se en forma d'allau, a partir de cert estat de la descàrrega, la fotoionització entra a fer un paper molt important. El número d'electrons format durant el procés d'allau i al llarg del camp de longitud  $s$  es pot expressar a partir de (Eq. 2.1).

$$n = \exp \left\{ \int_{E_1}^{E_2} (\alpha - \eta) \cdot ds \right\} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

On  $\alpha$  és un factor multiplicatiu que considera l'efecte d'allau, anomenat primer coeficient de Townsend i  $\eta$  considera l'absorció del medi, és a dir l'adhesió de les càrregues lliures a molècules neutrals, i  $s$  és refereix al camp de longitud on es formaran els electrons. Els 2 coeficients són una funció del gradient  $E$  i de la naturalesa del medi. La descàrrega només es pot dur a terme si l'allau d'electrons progressa, és a dir si es compleix  $\alpha > \eta$ . En el cas de l'aire com a medi aïllant, la descàrrega s'observa quan la intensitat del camp supera al gradient crític, és a dir, uns 30 kV/cm.

Per un conductor cilíndric, el gradient màxim s'observa a la superfície d'aquest, per què decreixi a mesura de que s'estableix una distància a partir d'ell. El volum d'aire en el qual pot passar l'allau primària és molt limitat.

Per què una allau arribi a una generació d'interferència significativa a de tindre una dependència de la polaritat, el què fa que es diferenciï entre corona positiva de la negativa, abans de tot es diferenciarà la polaritat del conductor.

### 2.1.1 Conductor positiu

Aquesta polaritat del conductor, tracta d'absorbir els electrons, formant així un núvol d'ions de major massa, major volum i menys mobilitat. Aquest núvol, que s'allunya del conductor positiu, dona origen a la formació d'una nova allau, la qual aconsegueix allunyar-se molt més del conductor que l'allau de polaritat negativa.

Al succeir aquesta segona allau s'observa un procés de fotoionització que actua sobre aquesta mateixa. Per això que l'allau aconseguix allunyar-se a gran velocitat més enllà de l'acció del camp elèctric dominant, per què l'allau es propagui fan falta  $10^8$  electrons, sent aquesta la condició crítica de desenvolupament de l'allau.

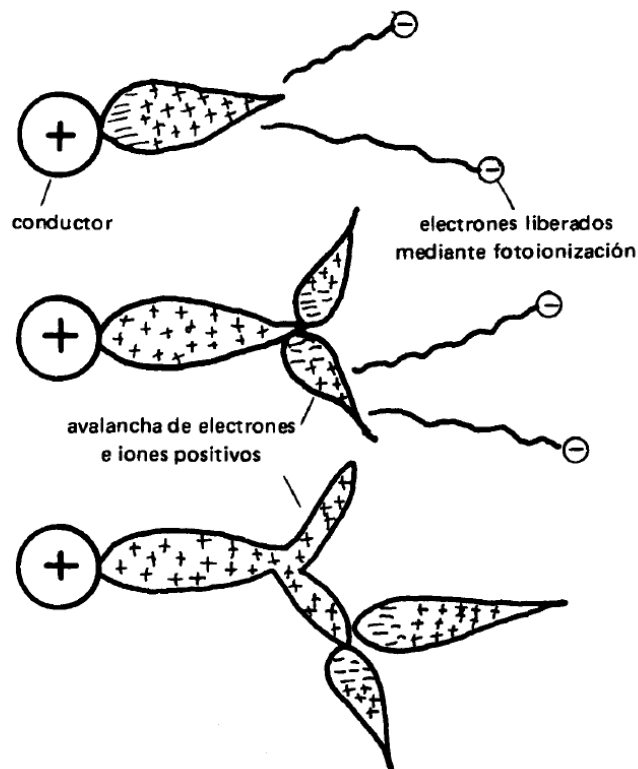


Figura 2-1 Etapes d'una descàrrega positiva

### 2.1.2 Conductor negatiu

L'allau electrònica es desenvolupa allunyant-se del conductor per frenar-se a determinada distància, a partir d'aquesta distància, el camp elèctric no manté el seu efecte multiplicador. Els ions positius, s'aproximen al conductor negatiu i entra en joc el procés gamma de la teoria de Townsend, amb el coeficient  $\gamma$  (Townsend, 1910). Aquest coeficient indica la probabilitat de ionització per xoc, el què permet formular un criteri per què el procés sigui sostenible.

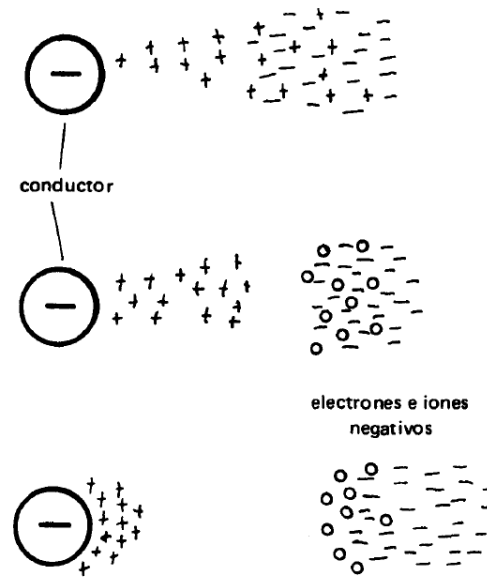


Figura 2-2 Etapes d'una descàrrega negativa

Aquesta relació (Eq. 2.2) es fonamenta en  $(n_c - 1)$  col·lisions per ionització en un procés que conte el número crític d'electrons  $n_c$ .

$$\int_{E_0}^{E_{min}} (\alpha - \eta) ds = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Amb  $E_{min} > E_0$

Aquesta expressió anterior, la part dreta és la coneguda condició de ruptura de Townsend.  $E_0$  és el gradient crític superficial i pot ser deduït per aquesta última relació, si es coneix la configuració del camp. El seu valor es pràcticament el mateix per la ionització positiva i negativa.

L'observació del fenomen pot concloure's que el procés de ionització positiu penetra molt més a l'aire, allunyant-se del conductor, que el negatiu.

### 2.1.3 Tipus de descàrrega

Si un conductor en la forma indicada com en la Figura 2-3 Posició cilíndrica per l'estudi de l'efecte corona en funció de radi del conductor:

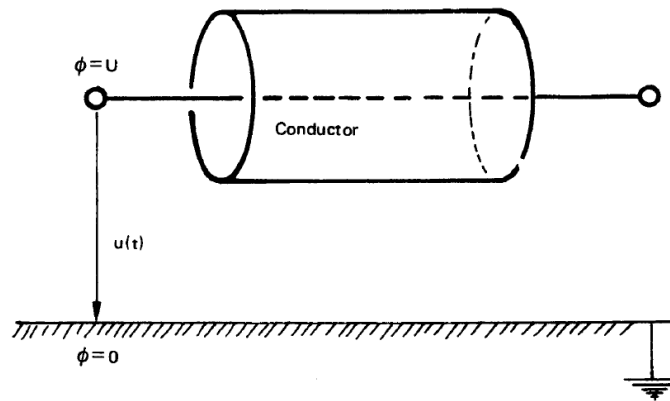
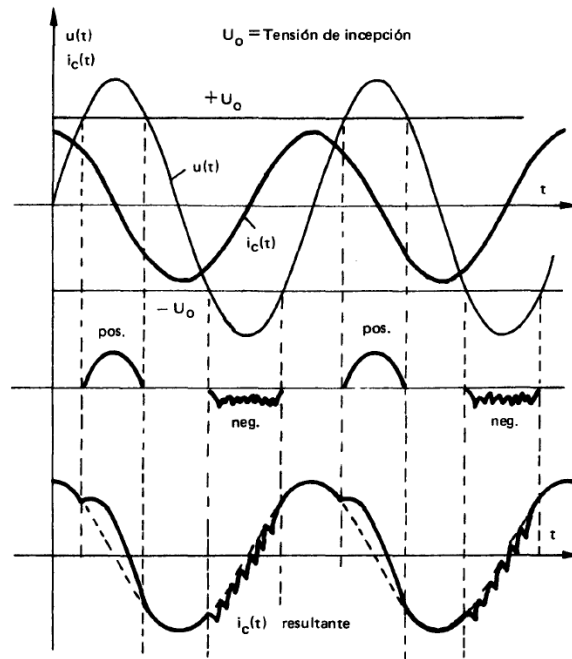


Figura 2-3 Posició cilíndrica per l'estudi de l'efecte corona en funció de radi del conductor

S'incrementen progressivament la tensió, pot observar-se que a partir d'un valor determinat de la mateixa, anomenada tensió crítica, s'observa una descàrrega característica de l'efecte corona per polaritat positiva i un altre per polaritat negativa. Si la tensió aplicada supera lleugerament la tensió d'inici o crítica del fenomen, s'observen impulsos Trichel durant el semicicle negatiu i una descàrrega lluminosa i estable, denominada glow, durant el semicicle positiu.



**Figura 2-4** Alteració que pateix la intensitat de corrent (capacitiva) com a conseqüència de l'efecte corona positiu i negatiu al ser visualitzada amb un oscil·loscopi.

L'impuls de Trichel s'observa només durant el semicicle negatiu, la descàrrega anomenada glow pot aparèixer amb una lluminositat constant ambdues polaritats.

Si s'observa l'assaig amb l'ajuda del oscil·loscopi, es nota una distorsió en la intensitat de corrent, la qual és de naturalesa capacitiva degut a la geometria de l'objecte de l'assaig. La intensitat de corrent denota dos components, una donada pel desplaçament elèctric i un altre per la intensitat de corrent que té que abandonar el conductor per alimentar les pèrdues característiques del fenomen.

Sabem que:

$$i = C \cdot \frac{du}{dt} + i_{cor} \quad \text{per } V > U_0 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

La intensitat de corrent  $i_{cor}$  es manifesta per  $U > U_0$ , creixent amb el valor momentani de la primera. El seu origen es deu al desplaçament dels ions en el medi circumdant, on es pot contemplar un índex característic de les pèrdues ocasionades per l'efecte en qüestió.

#### 2.1.4 Tipus de Corona

El tipus de corona ve influenciat per diferents factors, entre els quals està la geometria dels elèctrodes, la configuració del camp, les característiques de ionització del medi, la polaritat dels elèctrodes i les condicions ambientals, els diferents tipus de corona són:

- Glow Corona.
- Trichel Corona.
- Burst Corona.
- Corona Streamer.
- Corona Plume.
- Hermstein Glow.

Forma general:

- Corona positiva.
- Corona negativa.

Ara es dur a terme l'explicació de cada tipus de corona.

**Glow corona:** és una descàrrega que pot presentar-se per les dues polaritats i es caracteritza per ser estable, amb una lluminositat constant. Les pèrdues que ocasiona poden ser apreciables, la interferència sobre les comunicacions sense fils és menyspreable. La seva aparició en els sistemes convencionals de transmissió no és freqüent i és estranya.

**Trichel corona:** només s'observa amb polaritat negativa, un cop la tensió aplicada excedeix la tensió crítica de l'efecte. És el primer mode o tipus de corona que es sol observar en les proves. S'observa com un ventall purpuri que es mou constantment, té una amplitud de corrent de 10 mA, una freqüència de 10 a 100 kHz i molt poca durada. Les pèrdues que causa aquest tipus de descàrrega, solen ser molt baixes, quasi insignificants, al igual que la ràdio interferència, és un tipus de descàrrega molt freqüent.

**Burst corona:** Es considera com la descàrrega d'inici d'un glow positiu i s'observa només per aquesta polaritat. Aquesta descàrrega només es manifesta al superar la tensió crítica, encara que sigui lleugerament excedida. Aquest tipus de descàrrega s'observa lleugerament adherida a la superfície del conductor, com un vellut blavós. Els impulsos de corrent són característics per tindre poca amplitud i llarga duració. Les pèrdues igual que la ràdio interferència són de poca importància i magnitud.

**Corona streamer<sup>1</sup>:** Es una descàrrega repetitiva caracteritzada per un filament lluminós que s'estén fins a la regió de baixa intensitat del camp. S'observa tant per polaritat positiva com negativa, i per valors de la tensió per sobre del valor crític. A mesura que augmenta el gradient elèctric, augmenta el streamer positiu, caracteritzat per un raspall de color blau lluminós, per degenerar després en la descàrrega disruptiva. Aquesta s'identifica gràcies al filament blau que aconsegueix estendre's entre l'espai dels electrons, allunyant-se del elèctrode de partida. La intensitat de corrent d'aquesta descàrrega té una amplitud de uns 100 mA, amb una curta durada i una taxa de repetició de varis kHz. Tant en l'aspecte de les pèrdues com de la ràdio interferència són d'importància en les dues polaritats. L'estat final de descàrrega, és a dir la descàrrega predisruptiva, s'observa només per valors de tensió  $U \geq U_0$ .

**Corona plume:** S'anomena així els streamers positius abans descrits, en cas de que apareixen de forma múltiple. S'observen al desintegrar-se gotes d'aigua que estan sobre la superfície del conductor.

**Hermstein glow:** Es una descàrrega poc freqüent, difícil d'observar a la pràctica, es manifesta només a la polaritat positiva, causant elevades pèrdues, però relativament poca ràdio interferència.

Com a forma general existeixen 2 tipus de corona:

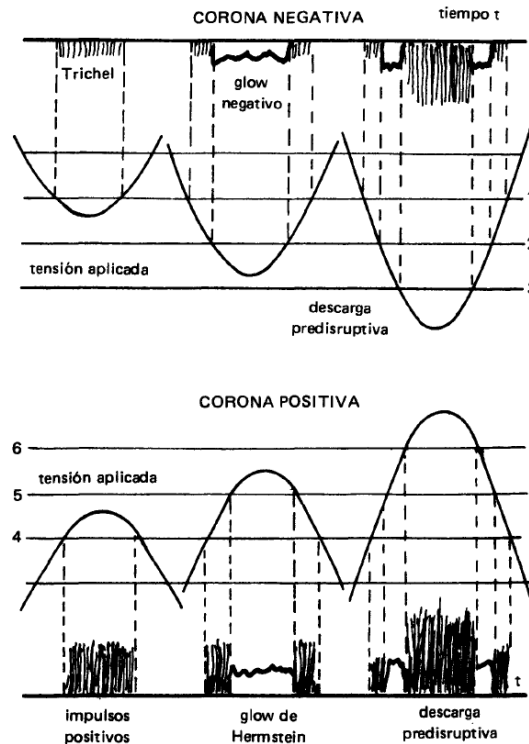
**Corona negativa:** El gradient crític no es excedit, sobre la superfície del conductor es manifesten impulsos Trichel, que si pugem la tensió deixen de ser repetitius per manifestar-se en forma constant com a glow negatiu. Un increment adicional de la tensió  $U \geq U_0$  condueix a una descàrrega predisruptiva, anomenada així per que està pròxima a la ruptura del medi. El corrent pren valor d'una elevada amplitud, amb una llarga duració i una baixa taxa de repetició.

---

<sup>1</sup> Fa referència, de l'anglès, a la forma de una serpentina.

**Corona positiva:** Els impulsos positius comencen un cop que el gradient arriba al valor crític. Si continua augmentant la tensió aplicada, aquests impulsos cedeixen pas a la descàrrega coneguda com Glow de Hermstein. Un increment major de la tensió  $U \geq U_0$  porta a la descàrrega predisruptiva.

En la Figura 2-5, es pot apreciar les descàrregues descrites anteriorment.



**Figura 2-5** Descàrregues característiques de l'efecte corona en les línies de transmissió, les tensions 1 i 4 són les tensions crítiques, per polaritat negativa i positiva, respectivament.

El comportament transitori d'aquestes descàrregues, tant amb polaritat positiva com negativa, pertorba el procés de relaxació, el qual es caracteritza per la formació de càrregues espacials, bloqueig d'allaus de càrregues elèctriques i atenuació dels núvols electrònics i iònics en el seu desplaçament a través de l'espai.



## 2.2 Càlcul del Gradient crític i la tensió crítica disruptiva.

Primer de tot es veurà els càlculs relacionats amb la tensió crítica disruptiva, i tot seguit es veurà els càlculs, per cada una de les configuracions existents, a partir de les fórmules de la tensió es troba les del camp i recíprocament, així que totes estan relacionades i tenen una estructura semblant.

Peek va observar que l'aparició de l'efecte corona és en funció del camp superficial, del radi del conductor, de la densitat del aire i de les tensions crítiques.

### 2.2.1 Càlcul de la tensió crítica disruptiva, Fórmula de Peek.

F.W. Peek, enginyer americà què treballava per General Elèctric, va deduir mètodes experimentals i fórmules empíriques què van permetre el càlcul de les tensions crítiques disruptives i visuals, i més endavant també es veuran les pèrdues que corresponen a tot això.

Totes aquestes equacions han sigut demostrades teòricament al 1971 per Schmitt, com es veurà, la llei de Peek es vàlida per conductors de geometria coaxial i es pot estendre per conductors disposats en forma que el seu camp superficial sigui constant, la tensió crítica disruptiva es calcula mitjançant (Eq. 2.4).

$$U_c = 21,1 \cdot \delta \cdot r_{cond} \cdot n \cdot k_c \cdot k_s \cdot \ln \frac{DMG}{R_{eq}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

On  $U_c$  és la tensió crítica disruptiva de fase en kV, els 21,1 es refereix a la rigidesa dielèctrica de l'aire en kV/cm, per unes condicions de 25°C i de 760 mmHg,  $\delta$  és la densitat de l'aire en Kg/m<sup>3</sup>,  $r_{cond}$  és el radi del conductor en cm,  $n$  és el nombre de conductors per feix de cada fase,  $k_c$  és el coeficient mediambiental,  $k_s$  és el coeficient de rugositat del conductor,  $DMG$  fa referència a la distància mitjana geomètrica i  $R_{eq}$  és el radi equivalent del feix de subconductors.

Aquests paràmetres es calcularan segons les indicacions i les expressions següents:

- Densitat de l'aire  $\delta$  (Eq. 2.5).

$$\delta = \frac{(273 + 25) \cdot p}{(273 + t) \cdot 760} = \frac{3,921 \cdot p}{273 + t} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

On  $p$  és la pressió en mmHg i  $t$  la temperatura en °C

- Coeficient mediambiental  $k_c$

$k_c$  pot tindre un valor amb un rang de 0,8 a 1, 0,8 per temps plujós o humit i 1 per temps sec.

- Coeficient de rugositat del conductor  $k_s$

$k_s$  pot tindre un valor amb un rang de 0,83 a 1, de 0,83 fins a 0,87 per a cables formats per fils, de 0,93 a 0,98 per a conductors vells, amb protuberàncies i 1 per a conductors nous.

- Distància mitjana geomètrica  $DMG$

La distància mitjana geomètrica depèn de la geometria què tenen els conductors

Per una configuració simple s'utilitza (Eq. 2.6).

$$DMG = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ca}} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Per una configuració doble i en feix s'utilitza l'equació o conjunt (Eq. 2.7).

$$DMG = \sqrt[3]{DMG_{ab} \cdot DMG_{bc} \cdot DMG_{ca}}$$
$$DMG_{ij} = \sqrt[4]{\prod d_{ij}} = \sqrt[4]{d_{i1j1} \cdot d_{i1j2} \cdot \dots} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

- Radi equivalent  $R_{eq}$

El radi equivalent per configuracions en feix es calcula amb (Eq. 2.8).

$$RMG' = R_{eq} = \sqrt[n]{n \cdot r_{con} \cdot r_{feix}^{n-1}} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

### 2.2.2 Càlcul del camp crític o gradient crític, Fórmula de Peek.

Com s'ha dit en l'apartat anterior (2.2.1), al 1920 Peek, enginyer de General Elèctric, va deduir experimentalment el camp crític de l'efecte corona per conductors cilíndrics, disposats en geometria coaxial, resultats que es van estendre posteriorment a conductors paral·lels, igual que va deduir les fórmules per aquests casos, però per la tensió crítica disruptiva com hem vist anteriorment. Encara que la rigidesa dielèctrica de l'aire en corrent altern de 50 Hz depèn de múltiples factors, un valor suficientment aproximat al del camp crític corona per un conductor en disposició coaxial en presència d'aire sec i condicions atmosfèriques de 25°C i 760 mmHg, es de 31 kV<sub>p</sub>/cm. Per altres condicions de pressió i temperatura ambient, el camp crític,  $E_c$ , varia proporcionalment a la densitat relativa del aire en les citades condicions de referència, segons (Eq. 2.9).

$$E_c = 31 \cdot \delta \left( \frac{kV_p}{cm} \right) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

On  $\delta$  és la densitat del aire, s'ha definit en l'apartat anterior (2.2.1), (Eq. 2.5),  $E_c$  és el valor de cresta del camp crític d'inici de descàrregues corona en kV<sub>p</sub>/cm, els 31 és el camp crític en kV<sub>p</sub>/cm, per un conductor en disposició coaxial en aire sec i condicions atmosfèriques estàndard<sup>2</sup>.

Respecte (Eq. 2.5), referent a la densitat de l'aire, descrita en l'apartat anterior (2.2.1), a nivell pràctic, i amb l'objectiu d'establir una relació entre l'altitud i la pressió atmosfèrica, s'aplica l'expressió recollida a la norma de coordinació de aïllament UNE-EN 60071-2.

---

<sup>2</sup> Condicions atmosfèriques estàndard: 25°C i 760 mmHg

$$\delta = \frac{273 + 25}{273 + t} \cdot e^{-h/8150} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

On  $h$ , és l'altitud mitja per on discorre la línia en metres.

En cas de que la superfície del conductor no sigui llisa i les condicions ambientals no corresponguin amb temps sec, (Eq. 2.9) deu corregir-se amb els factors  $k_s$  i  $k_c$ .

$$E_c = 31 \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta \left( \frac{kV_p}{cm} \right) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

On  $k_c$  i  $k_s$  són els mateixos factors anomenats en (Eq. 2.4) a l'apartat 2.2.1

El conductor comença a patir deformacions mecàniques durant el mateix procés de transport i muntatge, particularment quan es trenat, amb el qual el gradient crític resulta ser inferior al del conductor ideal. Això dona pas a les irregularitats superficials que duent a una concentració localitzada del camp elèctric, disminuint el gradient elèctric requerit per que el procés corona s'iniciï.

Per remeiar aquesta situació es recorre al factors  $k_c$  i  $k_s$ , determinats experimentalment, què considera l'estat de la superfície del conductor  $k_c \cdot k_s < 1$ . Un valor característic de  $k_c \cdot k_s$ , com a conseqüència del trenat del conductor, es 0,9, mentre que en cas de pluja, disminueix fins a 0,6.

El camp elèctric a partir del qual, les descàrregues a la superfície del conductor es converteixen en efluvis visibles correspon a un valor superior, què ve donat per (Eq. 2.12).

$$E_v = 31 \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta \cdot \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \left( \frac{kV_p}{cm} \right) \quad (\text{Eq. 2.12})$$

On  $r$  és el radi del conductor expressat en cm.

Per obtindre el valor eficaç cal dividir entre  $\sqrt{2}$ , ja què (Eq. 2.12) dona el valor de pic.

El factor 0,308 és un factor què té aquest valor per cables coaxials, i més endavant es veurà què aquest factor canvia per cables en paral·lel on té el valor de 0,301, és a dir que depèn de la disposició dels conductors.

(Eq. 2.12) es pot expressar en funció de la densitat relativa de l'aire  $\delta_{20}$  referida a 20°C en comptes de 25°C:

$$E_v = 31,53 \cdot m_p \cdot \delta_{20} \cdot \left( 1 + \frac{0,305}{\sqrt{\delta_{20} \cdot r}} \right) \left( \frac{kV_P}{cm} \right) \quad (\text{Eq. 2.13})$$

On  $m_p = k_c \cdot k_s$ .

El factor  $m_p$  el trobem de diferents magnituds en diferents bibliografies, per exemple per el càlcul del gradient superficial de conductors nous, on el seu diàmetre és inferior a 2,5 cm, considerem que  $m_p = 0,8$ . En el llibre *Transmission line reference book, 345 kV and above*, (Comber, et al., 1975) estipula un factor de  $m_p = 0,5$ , independentment del diàmetre del conductor.

Si és necessari considerar la presència d'unes altres fases, un sistema trifàsic o l'altura de conductor sobre el terra, llavors el camp elèctric, i en particular el gradient sobre el conductor, deixen de ser uniformes. Succeeix el mateix si tenim més d'un subconductor per fase (conductors en feix).

### 2.3 Càlculs segons geometria

Aquest apartat es centrarà en els càlculs dels gradients i tensions, així com altres magnituds necessàries per trobars aquests valors, bàsicament s'han de buscar les geometries més típiques de les línies aèries com són, conductors concèntrics, conductors en paral·lel, conductors paral·lels a un pla, conductors en feix i sistemes trifàsics.

### 2.3.1 Conductors concèntrics

Es pot anomenar conductors concèntrics als conductors que tenen tots el mateix centre o eix, (Figura 2-6 Esquema de conductor concèntric) o a un conductor consistent en un tub conductor amb un nucli també conductor en el seu interior que està aïllat. Als conductors concèntrics es poden anomenar també coaxials.

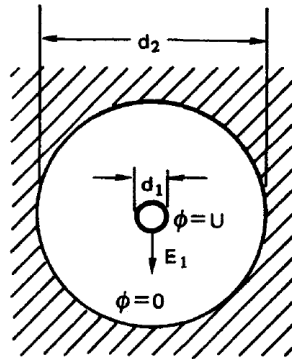


Figura 2-6 Esquema de conductor concèntric

Per la Figura 2-6 obtenim un gradient expressat per (Eq. 2.14).

$$E_1 = \frac{2 \cdot U_1}{d_1 \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

On  $d_1$  és el diàmetre del conductor interior en cm,  $d_2$  és el diàmetre del conductor exterior en cm i  $U_1$  és la tensió aplicada a aquests conductors en kV on el gradient  $E_1$  serà expressat en kV/cm.

També s'obté una capacítància mitjançant (Eq. 2.15).

$$C = \frac{55.6}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \text{ pF/m} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

La tensió crítica  $U_0$  en kV, com el gradient crític  $E_0$  en kV/cm, s'obté de les expressions (Eq. 2.16).

$$E_0 = 31 \cdot m_p \cdot \delta \cdot \left[ 1 + \frac{0.436}{\sqrt{\delta \cdot d_1}} \right]$$

$$U_0 = E_0 \cdot \left( \frac{d_1}{2} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$
(Eq. 2.16)

### 2.3.2 Conductors en paral·lel

Per configuracions de conductors en disposició paral·lela, Figura 2-7, la rigidesa dielèctrica de l'aire es redueix a 30 kV<sub>p</sub>/cm, el camp elèctric d'inici de descàrregues corona s'expressa per (Eq. 2.17).

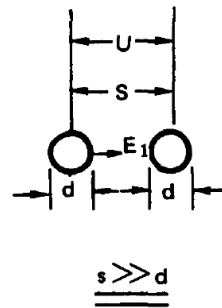


Figura 2-7 Conductors amb disposició paral·lela

On  $s$  és la distància entre els conductors,  $d$  és el diàmetre dels conductors,  $U$  és la tensió entre fases de la línia i  $E_1$  és el gradient a la superfície del conductor.

$$E_c^* = 30 \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta \left( \frac{kV_p}{cm} \right)$$
(Eq. 2.17)

El camp elèctric crític d'inici de corona visible, on es produiran la visualització d'efluvis, està expressat per (Eq. 2.18).

$$E_v^* = 30 \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right)$$
(Eq. 2.18)

Altres autors (Siegert, 1989) fan servir altres fórmules per conductors paral·lels, pel càlcul del gradient a la superfície del conductor, es fa servir (Eq. 2.19).

$$E_1 = \frac{U_1}{d \cdot \ln\left(\frac{2s}{d}\right)} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

On  $E_1$  és el gradient a la superfície del conductor en kV/cm,  $U_1$  és la tensió de fase a terra, en kV.

La capacitància en pF<sup>3</sup>/m s'obté mitjançant (Eq. 2.20).

$$C = \frac{55.6}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

On  $d_1$  i  $d_2$  són els diàmetres dels conductors.

Els valors crítics de tensió i de camp elèctric es poden obtenir amb (Eq. 2.21).

$$E_0 = 30 \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0.426}{\sqrt{\delta \cdot d}}\right]$$
$$U_0 = E_0 \cdot d \cdot \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (\text{Eq. 2.21})$$

### 2.3.3 Conductors paral·lels a un pla

Si tenim un conductor amb un diàmetre  $d$  una altura del pla del terra de  $h$ , com a la Figura 2-8, es pot calcular un gradient a la superfície del conductor  $E_1$  amb (Eq. 2.22), la seva capacitància amb (Eq. 2.23) i els valors crítics amb (Eq. 2.24).

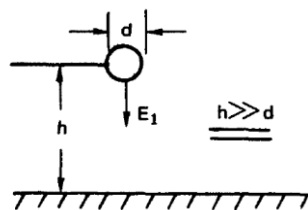


Figura 2-8 Conductor paral·lel a un pla

<sup>3</sup> Pico farad, unitat de la capacitància



$$E_1 = \frac{2 \cdot U_1}{d \cdot \ln\left(\frac{4h}{d}\right)} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

$$C = \frac{55.6}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

$$E_0 = 30 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0.426}{\sqrt{\delta \cdot d}}\right]$$

$$U_0 = E_0 \cdot \left(\frac{d}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \quad (\text{Eq. 2.24})$$

Com es pot observar, no totes les expressions són uniformes, per tant el gradient sol denotar un valor mitjà,  $E_a$ , i valors mínims  $E_{min}$ , o màxims  $E_{max}$ . Per l'expressió del conductor paral·lel a un pla, el valor màxim del gradient s'observa en la superfície que el conductor li ofereix al pla de terra, segons la configuració dels elèctrodes.

#### 2.3.4 Conductors en feix

Per sobre dels 300 kV, la majoria de línies de transmissió d'energia denoten més d'un conductor per fase, és a dir, que tenen conductors en feix. Que les línies tinguin aquest tipus de configuració, té com a finalitat limitar el valor del gradient elèctric superficial, a valors admissibles o tolerables. En algunes línies de 230 i 115 kV, els quatre subconductors per fase tenen com a finalitat augmentar la capacitat de transport per alimentar forns elèctrics de reducció. La utilització de conductors en feix no és exclusiu de l'extra o ultra alta tensió, sinó que és un recurs molt útil en sistemes de tensió inferior.

En general un feix de conductors es caracteritza per un radi  $r$  en cm dels subconductors, el nombre d'ells,  $n$ , els valors mitjos, màxim i mínim ( $E_a, E_{max}, E_{min}$ ) del gradient elèctric superficial, el radi equivalent ( $R_{eq}$ ) i la separació  $D$  entre els dos conductors adjacents.

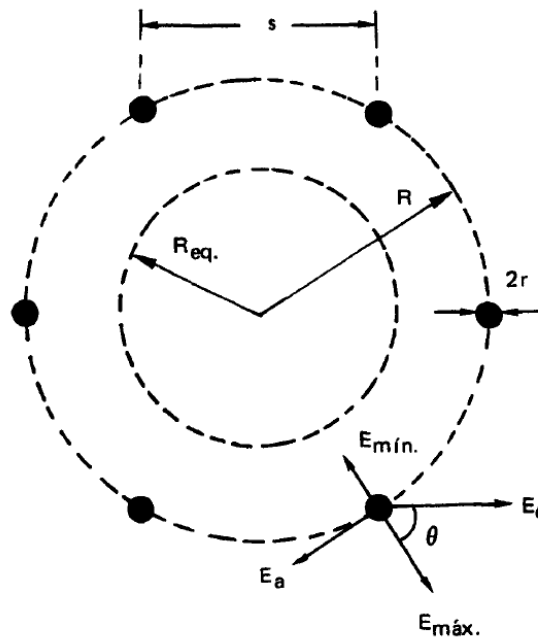


Figura 2-9 Esquema de sis subconductors d'una fase amb els seus paràmetres més rellevants

La distància entre subconductors del feix,  $s$  en cm, es pot calcular amb (Eq. 2.25).

$$s = 2R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (\text{Eq. 2.25})$$

On  $R$  és el radi que formen els subconductors del feix i  $n$  és el nombre de subconductors, es pot veure una interpretació gràfica d'aquests paràmetres en la Figura 2-9.

El radi equivalent  $R_{eq}$ , en cm, correspon al radi d'un cilindre imaginari que denota la mateixa capacitat del feix real respecte a tots els subconductors veïns i està donat per (Eq. 2.26).

$$R_{eq} = R \cdot \sqrt[n]{nr/R} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

On  $r$  és el radi del subconductor del feix en cm.

Per determinar els diferents valors d'importància que pot considerar el gradient elèctric es recorre als coeficients de potencial i es determina la càrrega total  $Q$  del feix de conductors, introduint el radi equivalent. D'aquesta manera s'obté el valor mig del gradient elèctric,  $E_a$ , (Eq. 2.27).

$$E_a = \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r} \quad (\text{Eq. 2.27})$$

On  $\varepsilon_0$  és la permitivitat del buit, que té un valor de  $8.84 \cdot 10^{-12}$  C/m, Q és la càrrega total del feix dels conductors en Coulombs, n és el número de subconductors del feix i r el radi dels subconductors en cm.

Podem dir que la càrrega total es troba uniformement distribuïda en els n subconductors del feix. Però l'efecte d'apantallament mutu d'un subconductor sobre l'altre porta a un valor major del gradient elèctric cap a fora del feix ( $E_{max}$ ) (Eq. 2.28), que cap endins ( $E_{min}$ ) (Eq. 2.29), per tant s'obtenen els valors limítrofs següents:

$$E_{max} = E_a \cdot \left[ 1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R} \right] \quad (\text{Eq. 2.28})$$

$$E_{min} = E_a \cdot \left[ 1 + \frac{d \cdot (n-1)}{s} \right]$$

I

$$E_{min} = E_a \cdot \left[ 1 - \frac{(n-1) \cdot r}{R} \right] \quad (\text{Eq. 2.29})$$

En termes generals es considera que el camp varia al voltant del feix, amb un angle  $\theta$ , tal i com es veu a la Figura 2-9, i es troba (Eq. 2.30).

$$E_\theta = E_a \cdot \left[ 1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R} \cdot \cos\theta \right] \quad (\text{Eq. 2.30})$$

A la pràctica, el valor més important és  $E_{max}$ , per què si excedim aquest al gradient crític ( $E_{max} > E_0$ ) en un punt qualsevol sobre la superfície dels conductors, comencen allà les descàrregues de tipus corona. Més endavant es veu que aquest valor es veurà influenciat pel cable de terra i el lloc que estigui col·locat dins de la configuració, ja que la fase central d'un sistema trifàsic pren valors més alts que aquests.

Altres bibliografies (Simón, y otros, 2011) tenen les següents expressions per obtindre els valors de tensió i de camp crític, per conductors disposats en feix:

Si es desitja determinar la tensió crítica en una línia aèria a la qual es produeix l'inici de descàrregues corona  $U_c$ , serà necessari correlacionar aquesta tensió amb el camp elèctric crític d'inici de descàrregues corona.

$$U_a = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (\text{Eq. 2.31})$$

On  $q_a$  és la càrrega equivalent de la línia concentrada en el eix del conductor que simula el conductor real a potencial  $U_a$ , en Coulombs.  $U_a$  que és la tensió de fase a terra en kV,  $DMG$  és la distància mitjana geomètrica en cm i  $RMG$  que és el radi mig geomètric en cm.

Cal aclarir que (Eq. 2.31) prové de la demostració de la tensió de fase-neutre  $U_a$  en presència del pla del terra, que pertany al càlcul de la susceptància d'una línia aèria.

El camp elèctric a la superfície del conductor creat per una càrrega lineal  $q_a$ , de longitud infinita situada a l'eix del conductor, es calcula amb (Eq. 2.32).

$$E = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad (\text{Eq. 2.32})$$

Dividint (Eq. 2.31) i (Eq. 2.32), és possible correlacionar la tensió al conductor amb el camp elèctric a la seva superfície.

$$E = \frac{U_a}{r \cdot \ln \frac{DMG}{RMG}} \quad (\text{Eq. 2.33})$$

Per disposicions de conductors en feix i conductors paral·lels, es pot relacionar que quan el camp elèctric obté el valor de la rigidesa dielèctrica del aire per conductors en disposició en paral·lel,  $E_c^*$ , és la tensió associada d'inici de descàrregues corona, que s'anomena tensió crítica de descàrregues corona,  $U_c^*$ , que mesurada en valor de pic respon a (Eq. 2.34), calculada en l'apartat 2.2.1.

$$U_c^* = 30 \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (\text{Eq. 2.34})$$

Aquesta equació anterior (Eq. 2.34), es pot expressar en valors eficaços de tensió, dividint entre  $\sqrt{2}$ , en (Eq. 2.35), suposant un ona perfectament sinusoidal.

$$U_c^* = 21,2 \cdot m_p \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (\text{Eq. 2.35})$$

On en aquest cas  $U_c^*$  està expressada en  $\text{kV}_{\text{rms}}^4$

Encara que el camp elèctric sigui inferior al camp crític de aparició visual d'efecte corona hi hauran pèrdues corona sempre que la tensió crítica d'aparició de descàrregues corona en valor eficaç  $U_c^*$ , sigui inferior a la tensió màxima fase neutre de la línia  $U_n/\sqrt{3}$ .

### 2.3.5 Sistemes trifàsics

Segui un sistema trifàsic, format primer com un sol conductor per fase. En vista de que la fase central té un gradient elèctric aproximadament un 5% superior al de les fases laterals, és convenient realitzar a la pràctica el càlcul respectiu per aquesta fase, utilitzarem els paràmetres mostrats a la Figura 2-10.

---

<sup>4</sup> Rms, fa referència a valor eficaç, valor de pic entre  $\sqrt{2}$ .

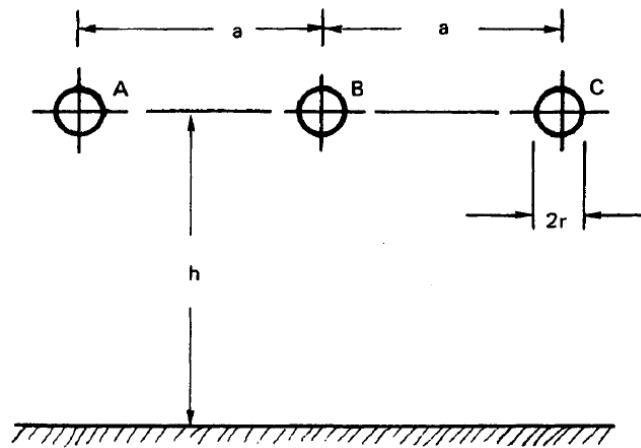


Figura 2-10 Representació d'un sistema trifàsic amb els seus conductors paral·lels al pla de terra.

On els paràmetres més rellevants de la Figura 2-10 són,  $a$ , que és la separació entre fases i, en el cas de conductors en feix, separació entre conductors de fases oposades,  $h$ , que és l'altura dels conductors sobre el pla de terra i  $r$ , que és el radi del conductor o d'un dels subconductors del feix.

Per obtenir el gradient mig d'un sistema trifàsic es fa servir (Eq. 2.36).

$$E_a = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_{eq}}{r}\right)} \quad (\text{Eq. 2.36})$$

On  $E_a$  és el gradient mig en kV/cm,  $U$  és la tensió de fase a neutre en kV i  $h_{eq}$  és l'altura equivalent de la fase central respecte al terra, que es pot expressar mitjançant (Eq. 2.37).

$$h_{eq} = \frac{h \cdot a}{\sqrt{4h^2 + a^2}} \quad (\text{Eq. 2.37})$$

S'ha de tindre en compte que l'altura equivalent sol ser lleugerament inferior a la meitat de la separació entre fases ( $h_{eq} < a/2$ ), en el que respecte a les parts a terra, també s'ha de tindre en compte que les barres de les subestacions, es troben col·locades sobre aïlladors de suport, per tant en el punt de recolzament l'altura equival a la longitud del aïllador de suport.

Si el sistema trifàsic està format per feixos de subconductors, és a dir més d'un conductor per fase, el càlcul es fa recorrent al radi equivalent i a l'altura equivalent.

Per un sistema trifàsic, compost de més d'un subconductor per fase, s'aplica (Eq. 2.38), què conte el radi i l'altura equivalents:

$$E = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\beta}{r \cdot \ln \left[ \frac{a}{R_{eq}} \cdot \frac{2h}{\sqrt{4h^2 + a^2}} \right]} \quad (\text{Eq. 2.38})$$

On el factor  $\beta$  és un factor que s'aplica a conductors multifilars, determinat per (Eq. 2.39).

$$\beta = \frac{1 + (n - 1) \cdot r/R}{n} \quad (\text{Eq. 2.39})$$

On  $n$  és el número de subconductors d'una mateixa fase,  $R$  és el radi dels subconductors agrupats en una mateixa fase,  $R_{eq}$  és el radi equivalent del feix i  $a$  és la separació entre fases o entre conductors de fases oposades.

El factor  $\beta$ , en general varia entre les diferents disposicions de conductors en feix, per una disposició en feix dúplex té un rang de valors entre 0,52 a 0,55, per una disposició tríplex té un rang de valors entre 0,35 a 0,38 i per una disposició quàdruplex té un rang de valors de 0,27 a 0,3. És a dir, es pot veure que mentre es va augmentant el número de subconductors per feix, el valor de  $\beta$  va disminuint.

## 2.4 Configuració del número de subconductors.

El increment dels nivells de tensió, a portat a que el número de subconductors per fase vagi creixent, tant en forma simètrica com en asimètrica, els conductors d'una mateixa fase no necessàriament han de ser equidistants.

Mentre que la configuració de 2 subconductors per fase és bastant conegut, inclús a nivells de tensions intermèdies, amb la finalitat d'augmentar la capacitat de transport, en els sistemes d'extra i ultra alta tensió s'observen configuracions de 3, 4 i fins i tot 6 i 8 subconductors. Algunes línies experimentals tenen de 12, 16 i fins i tot 18 subconductors. La utilització de subconductors fa que el gradient es distribueixi millor.

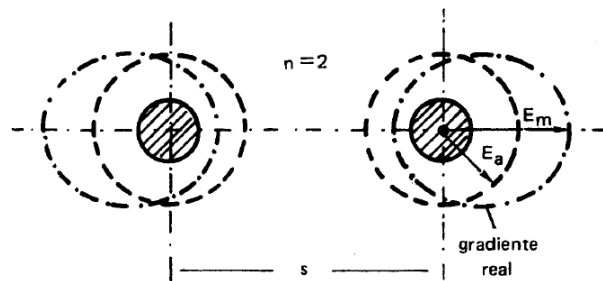


Figura 2-11 Distribució del gradient elèctric, en una configuració de 2 subconductors per fase.

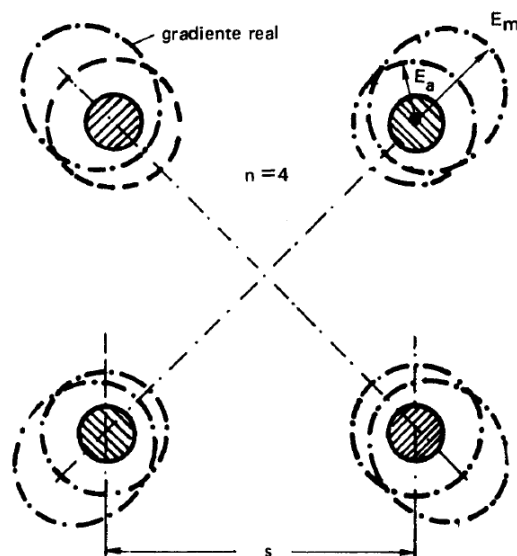


Figura 2-12 Distribució del gradient elèctric, en una configuració de 4 subconductors per fase.



Les configuracions més utilitzades de número de subconductors es poden veure en la Taula 2-1, juntament amb el diàmetre del feix.

Número de subconductors per fase (n)	Diàmetre del feix (cm)
2	45,7
3	52,8
4	64,7
6	91,4
8	101,6
12	127,0
16	152,4

**Taula 2-1 Configuracions més comuns de numero de subconductors, junt amb el diàmetre del feix.**

## 2.5 Distribució simètrica.

Aquesta distribució és la més freqüent i l'única utilitzada fins ara en els sistemes comercials de transmissió d'energia, on tots els subconductors d'una mateixa fase es troben equidistants els uns dels altres. Això no implica que el gradient elèctric sigui el mateix per les 3 fases, la fase central denota un increment d'aproximadament 5% respecte a les fases laterals. La configuració dels circuits sobre la torre, en el cas de que hi hagi més d'un per torre, al igual que la geometria global de tot el conjunt, tenen un paper molt important en els valors que pot considerar el gradient.

La distribució del gradient al voltant del feix de conductors s'apropa molt a la forma sinusoidal, com podem veure en la Figura 2-13.

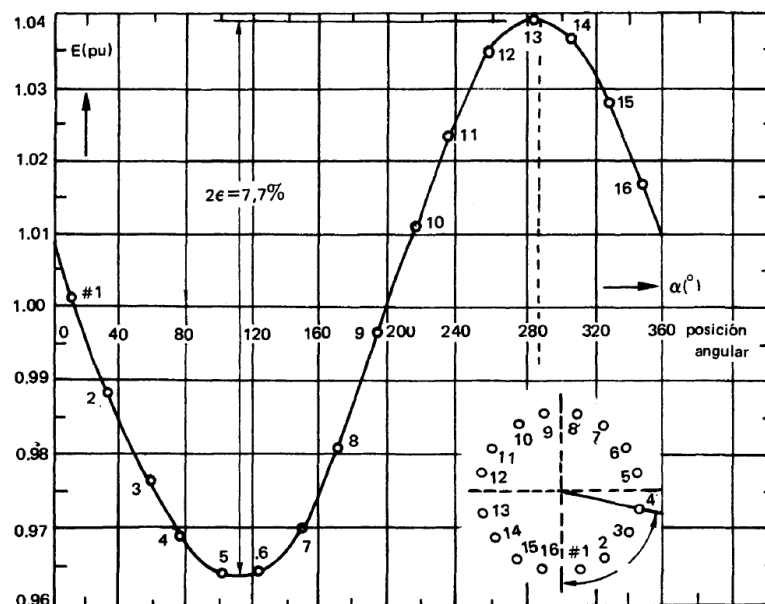


Figura 2-13 Gràfic on es mostra el valor del gradient elèctric al voltant del feix de conductors, per a 16 subconductors, en funció de la seva posició angular.

A la Figura 2-13, es mostra el valor del gradient elèctric de cada subconductor del mateix feix, per a 16 subconductors, en funció de la seva posició angular  $\alpha$ , corresponent a la fase central d'un sistema trifàsic.

Si es coneix les diferències relatives ( $2\epsilon$ ) entre els valors màxims i mínims de la distribució, al igual que la posició angular ( $\alpha_m$ ) del gradient màxim, es pot calcular el gradient de cada conductor per separat.

Per la fase central d'una línia de transmissió amb les seves 3 fases sobre el mateix pla horitzontal, paral·lel a terra, es té que  $\epsilon = 0$ . Per les fases laterals  $\epsilon$  depèn de la geometria del circuit. En cas de que es desitgi determinar els valors de  $\epsilon$  i  $\alpha_m$  per una línia determinada, es precis recórrer al càlcul computacional del gradient elèctric, ja que aquests valors no s'obtenen de gràfics generalitzats.

## 2.6 Distribució asimètrica

El feix de conductors òptims és aquest què té els menors costos de transmissió i el seu millor rendiment. En el cas de les línies de transmissió d'ultra alta tensió, el soroll audible, sota condicions humides, es el què influencia el disseny del feix de conductors. Aquest feix té 2 graus de llibertat, el número de subconductors i la posició de cada un d'ells dins del feix, tot això suposant que el diàmetre del feix i el radi dels subconductors, han estat optimitzats.

A la Figura 2-14 es pot veure una configuració de 6 subconductors, on el seu espai a la part inferior del feix a estat disminuït.

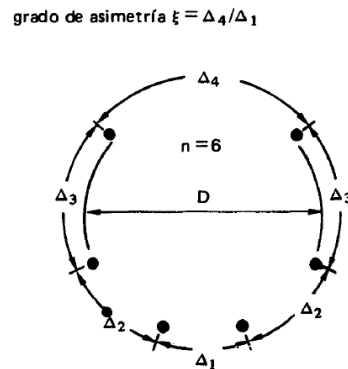


Figura 2-14 Configuració asimètrica de 6 subconductors.

Això no es pot efectuar per igual a les 3 fases, ja que es sap que la fase central es veu exposada a un major gradient. Les fases laterals, podrien constar d'un número inferior de subconductors de major i menor diàmetre, sense afectar al increment del soroll audible de tot el conjunt.

El càlcul del gradient elèctric en aquestes configuracions asimètriques és molt més complex, perquè tot i que coneixem la càrrega mitja, la seva distribució s'ignora. Aquesta peculiaritat exigeix l'ús de computadors digitals per poder atacar degudament aquest problema. Un cop s'ha detectat la configuració òptima asimètrica, s'ha de verificar si satisfà altres exigències, entre d'altres el soroll audible en condicions seques, soroll a la freqüència de ràdio (ràdio-noise) i el comportament aerodinàmic.

El valor òptim del grau de asimetria ( $\xi$ ) depèn del diàmetre de cada subconductor, del número d'ells que formen el feix i del diàmetre del cercle que els agrupa ( $d$ ,  $n$ ,  $D$ , respectivament). El màxim gradient, juga un paper molt rellevant.

Es coneixen avantatges i desavantatges de les configuracions asimètriques estudiades, és important destacar que l'estudi minimitzat d'aquets a de ser verificat a la pràctica, no només pels elevats costos sinó pels compromisos que a de patir l'enginyer projectista de la ferramenta i connectors respectius.

Algunes conseqüències de les distribucions o configuracions asimètriques son:

- La intensitat de corrent que circula per cada fase, sol·licitada per la càrrega, no és la mateixa a través de cada subconductor.
- Les sol·licitacions mecàniques i tèrmiques de la línia, com a conseqüència de lo anterior, mereixen especial atenció, per que difereixen en l'usual.
- Per feixos de 4 a 8 subconductors s'ha pogut demostrar que el diàmetre de cada un d'ells, exerceix una major influència sobre el gradient que la quantitat de subconductors per fase i el diàmetre del feix. La utilització de diàmetres diferents dins del feix complica considerablement el càlcul i la construcció de la configuració, en particular des de el punt de vista mecànic.
- No totes les configuracions asimètriques tenen subconductors sobre la mateixa circumferència. Això permet exercir una influència sobre el gradient elèctric de les fases laterals. El càlcul, es fa molt complex i entra en joc l'experimentació, que en el nivell d'ultra alta tensió té uns costos molt elevats.

## 2.7 Comportament reactiu dels conductors

D'acord amb la quantitat de subconductors, el seu diàmetre i la distància entre sí, els conductors multifilars o en feix denoten una capacitància bastant major i una inductància bastant menor que els conductors simples.

Per aquesta raó, la impedància d'ona, al igual que la radiació corona d'aquests conductors, resulten ser més baixes que el cas de conductors simples. La intensitat de corrent reactiu de càrrega i la potència natural que pot ser transmesa per la línia, son majors.

Això es fàcil de deduir, substituint en les relacions corresponents a la capacitància i a la inductància d'una línia aèria de transmissió, al radi del conductor pel radi equivalent.

Es possible determinar l'equivalència entre un feix de conductors i un senzill amb ajuda de taules i gràfics.

En relació amb els feixos asimètrics, utilitzats per millorar el comportament corona de línia sota condicions humides, convé ressaltar que en el rang de l'ultra alta tensió, amb un grau de simetria  $\xi = 2$ , anomenat a l'apartat 2.6, tant la reactància capacitiva com la inductiva, poden ser determinades utilitzant el procediment vàlid per la distribució simètrica. L'error comés és mínim, ja que la relació entre les inductàncies de seqüència positiva per  $\xi = 1$  i  $\xi = 2$  puja només a 0.996.

## 2.8 Pèrdues per efecte corona

L'efecte corona es veu caracteritzat per una descàrrega lluminosa, un soroll característic, formació d'ozó i una forta radiació electromagnètica d'alta freqüència. Tots aquests efectes porten a una distribució de l'energia, la qual es pot expressar com una pèrdua de potència per unitat de longitud (W/km).

Degut a l'influència de circumstàncies exteriors, les mesures de corona no son fàcils de dur a terme a la pràctica i els resultats obtinguts no son molt exactes. Més de 20 científics s'han dedicat al estudi de les pèrdues ocasionades per aquest efecte, els primers treballs daten de començament de segle, quan el fenomen, no tenia la importància que l'extra i l'ultra alta tensió

li han donat. Es per això que avui dia es continuen fent estudis de dissipació electromagnètica en dispositius expressament fets per aquesta finalitat.

La majoria de fórmules que quantifiquen de forma aproximada les pèrdues ocasionades per l'efecte corona, suposen condicions climàtiques bones o ideals, ja que es pot demostrar que les pèrdues sota la pluja, excedeixen notablement a aquelles calculades en condicions de bon temps. Les pèrdues per corona depenen de l'estat del temps, de les condicions del conductor i d'altres factors secundaris. Les fórmules més difoses, no contempen les pèrdues en els aïlladors, aquestes poden excedir a les pèrdues del conductor sota condicions de bon temps.

Com a fórmula base, de les pèrdues per efecte corona, considerarem la fórmula de Peek, ja que va ser el primer que va estudiar aquest fenomen, les altres fórmules de càlcul de pèrdues les considerarem en el capítol de comparació de mètodes de càlculs (3.2).

La fórmula per calcular les pèrdues per efecte corona segons Peek, data de l'any 1911 i es fonamenta de l'expressió (Eq. 2.40).

$$P_{cor} = k(U - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Eq. 2.40})$$

On  $k$  és una constant que depèn de la forma i la polaritat de l'ona, s'expressa en  $\text{kW} \cdot \text{s}/\text{km}$ .

$$k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{r/s}$$

On  $\delta$  fa referència a la densitat de l'aire en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , on es pot calcular mitjançant (Eq. 2.10) de l'apartat 2.2.2,  $f$  és la freqüència que té la línia en Hz,  $U$  és la tensió de fase a neutre en kV,  $U_0$  és la tensió crítica disruptiva en kV expressada per (Eq. 2.4) en l'apartat 2.2.1,  $r$  és el radi del conductor i  $DMG$  és la distància mitjana geomètrica en mm. El factor de 25 té en compte la recombinació de càrregues elèctriques en l'espai circumdant.  $P_{cor}$  són les pèrdues per l'efecte corona en una fase, expressada en  $\text{kW}/\text{km}$ .

En realitat (Eq. 2.40), s'ha d'aplicar només per a conductors superiors a  $5,3 \text{ mm}^2$  i en freqüències compreses entre 47 i 120 Hz. A freqüències més baixes, la fórmula discrepa del comportament anteriorment donat. Per corrent continu, és a dir  $f=0\text{Hz}$ , les pèrdues varien entre  $\frac{1}{4}$  i  $\frac{1}{2}$  de les pèrdues a 60 Hz i màxima tensió.

A continuació es veu la Figura 2-15 Corba característica de l'efecte corona.. On l'admitància corona ( $G_{cor}$ ) en funció de la tensió aplicada ( $U > U_0$ ), de  $P_{cor} = U \cdot I_{cor}$  amb  $I_{cor} = U \cdot G_{cor}$  s'obté la fórmula de Peek, (Eq. 2.40).

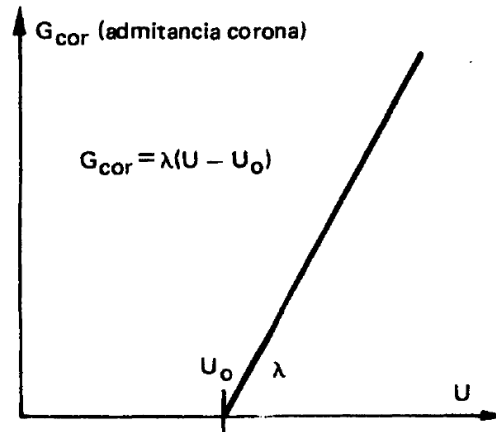


Figura 2-15 Corba característica de l'efecte corona.

### 2.8.1 Fonaments físics de les pèrdues per efecte corona

Es interessant analitzar el mecanisme de descàrrega del fenomen davant d'una sobretensió o impuls de polaritat definida.

A continuació es mostra en la Figura 2-16 que il·lustra una sobretensió de polaritat definida, que excedeix a la tensió crítica de l'efecte corona sobre un conductor. Mentre complim que en la zona afectada  $U > U_0$ , és la sobretensió la que té que suplir l'energia necessària per cobrir les pèrdues ocasionades per la ionització i el fregament associat de les càrregues elèctriques dins del límit de la descàrrega.

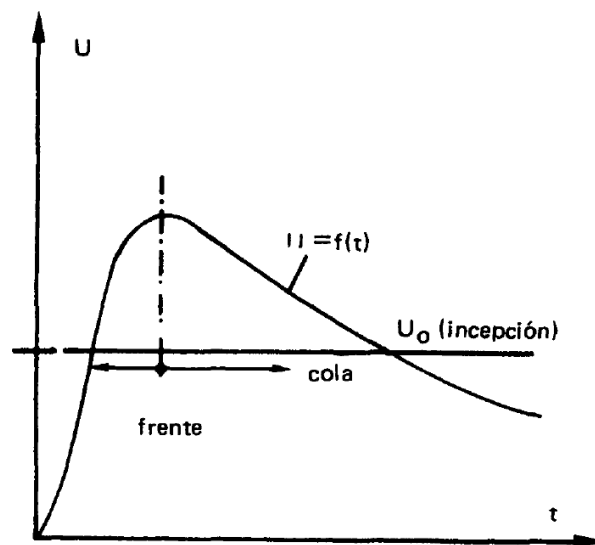


Figura 2-16 Gràfic que mostra una sobretensió que supera la tensió disruptiva sobre un conductor.

Es important diferenciar les dues zones, una corresponent al temps de formació de la cresta o de front d'ona i l'altre al de semi-amplitud o cua.

- Front d'ona: s'observa un augment vertiginós de la tensió i com a conseqüència, la formació de nous elements o càrregues per col·lisió. Si  $n$  és el número de col·lisions entre les partícules involucrades,  $m$  la massa constant i  $v$  la velocitat d'aquestes mateixes, s'obté (Eq. 2.41).

$$n \sim (U - U_0) \quad i \quad v \sim \left( \frac{1}{\sqrt{m}} \right) U \quad (\text{Eq. 2.41})$$

Això permet expressar les pèrdues a través de (Eq. 2.42):

$$P_{cor} = n \cdot m \cdot v \sim \sqrt{m} \cdot U(U - U_0) \quad (\text{Eq. 2.42})$$

En cas d'una ona negativa es tindria que considerar una presència major d'electrons, la qual la seva massa és notablement inferior a la dels ions. Les pèrdues, depenen de la polaritat i són mes grans per impulsos positius de tensió que per impulsos negatius.



- Cua de ona: aquest cas és molt més senzill, el número de càrregues elèctriques és quasi constant i les pèrdues es poden expressar en (Eq. 2.43).

$$P_{cor} \sim \sqrt{m} \cdot U \quad (\text{Eq. 2.43})$$

La determinació quantitativa de les pèrdues, al igual que la variació de la capacítància per l'increment del radi del conductor, es fonamenta en experiments. El més utilitzat consisteix en un explosor punta-placa, a la primera de les quals se l'aplica una tensió  $U$ , que és proporcional a la càrrega  $Q$  sobre l'elèctrode en estudi. La tensió es fa proporcional a la tensió que denotarà el conductor. D'aquesta manera s'obté la Figura 2-17, que s'assemblen molt a les corbes d'histèresis i la seva superfície és proporcional a les pèrdues per corona.

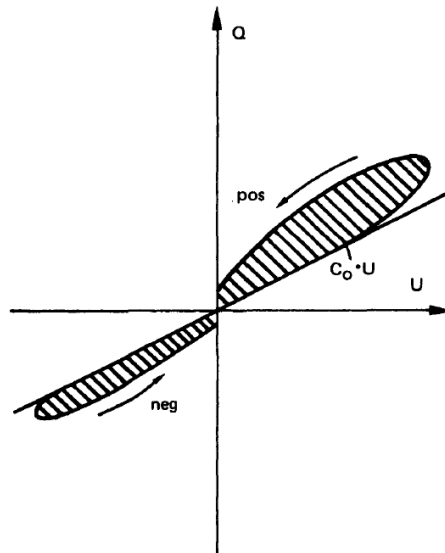


Figura 2-17 Histèresis per corona. Corba  $Q=f(U)$ . Corba que relaciona la càrrega sobre un elèctrode, en funció de la tensió que se l'aplica.

A partir de la Figura 2-17 es pot obtenir una expressió aproximada per les pèrdues d'efecte corona relacionant les dues variables de la corba  $Q = f(U)$ , (Eq. 2.44).

$$P_{cor} \sim \iiint U \cdot dQ \sim S_{Q \cdot U} \quad (\text{Eq. 2.44})$$

En vista de la semblança de la corba  $Q = f(U)$ , amb una paràbola, es justifica l'equació (Eq. 2.40) del apartat 2.8.

Com es pot apreciar, les pèrdues ocasionades per l'efecte corona deuen ser estimades per trams o sectors de línies, en particular si es tracta de línies llargues, on el potencial del conductor varia com a conseqüència de les diferents condicions climàtiques. Els resultats parcials, obtinguts per cada tram, s'integren de manera que es puguin obtenir les pèrdues totals.

### 2.8.2 Variació de la capacítància d'un conductor per l'efecte corona.

No és possible predir quina serà la variació de la capacítància d'un conductor afectat per l'efecte corona, degut a que no existeix una relació implícita entre la tensió aplicada i càrrega espacial. De la Figura 2-17 Histèresis per corona. Corba  $Q=f(U)$ . Corba que relaciona la càrrega sobre un elèctrode, en funció de la tensió que se l'aplica., es pot treure el comportament d'aquest increment. Empíricament s'ha trobat la següent relació (Eq. 2.45). per un impuls de polaritat definida:

$$C = 2 \cdot M \cdot K \cdot [(U - U_0/U - U_0/U \cdot \ln(U/U_0))] \quad (\text{Eq. 2.45})$$

On  $M$  i  $K$  són constants que depenen de la geometria, polaritat, etc.. del conductor i de l'ona o sobretensió. Aquesta equació (Eq. 2.44), permet dur a terme el present anàlisi, també les següents relacions (Eq. 2.46), ja conegudes, compleixen amb la mateixa funció, referint-se sempre a un conductor de radi  $r$  en m, a una altura  $h$  sobre el terra en m, amb una impedància de ona  $Z$ .

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}; Z = \sqrt{L/R}; v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Eq. 2.46})$$

On  $\epsilon_r$  és la permitivitat del conductor de radi  $r$ , en C/m, i  $v$  és la velocitat de propagació de l'ona.

Si el radi augmenta, com a conseqüència de la ionització circumdant, la capacítància  $C$  també augmenta, mentre que la impedància d'ona i la velocitat de propagació disminueixen.

Pot denominar-se al increment de la capacítància com  $\Delta C$ , per tant s'obté per la velocitat de propagació les següents equacions (Eq. 2.47).

$$v_{cor} = v \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C}}} \quad \text{per } U > U_0$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{per } U < U_0$$
(Eq. 2.47)

És a dir, que la velocitat de propagació pateix una desacceleració, per tant, els temps necessaris per que l'ona recorri el mateix trajecte  $x$  estan donats per (Eq. 2.48).

$$t_{cor} = \frac{x}{v} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C}} \quad i \quad t = \frac{x}{v}$$
(Eq. 2.48)

El retard respecte el temps s'obté de la següent relació (Eq. 2.49).

$$\frac{\Delta t}{x} = \frac{1}{v} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C}} - 1 \right] = f(U) \quad \text{per } \begin{cases} U > U_0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} > 0 \\ \Delta t = t_{cor} - 1 \end{cases}$$
(Eq. 2.49)

D'aquesta última relació (Eq. 2.49), es dedueix que cada punt del front d'ona d'una sobretensió denotarà un retard temporal respecte l'ona original per  $U > U_0$ . La següent figura permet apreciar la deformació que pateix la ona original si es coneix  $\Delta C/C$ . Es pot veure la deformació que pateix l'ona incident com a conseqüència del increment de la capacítància del conductor, ocasionada per l'efecte corona.

Aquesta interessant apreciació sobre el retràs que pateix l'ona viatgera, tot just la seva tensió excedeix a la disruptiva de l'efecte corona sobre el conductor a través del qual es desplaça ( $U > U_0$ ), ha donat lloc a nombrosos estudis i consideracions teòriques. Aparentment l'efecte corona

es manifesta de la mateixa forma en quan a la tensió crítica i les seves pèrdues, així que es tracta d'un fenomen dinàmic molt ràpid o molt lent. L'efecte corona es comporta pràcticament igual en condicions de regim transitori com permanent. Sobre la física de l'efecte sota condicions de regim transitori, s'ha estudiat relativament poc, degut a la incertesa que encara caracteritza aquest fenomen sota condicions de regim permanent. L'increment de la capacítància, Figura 2-18, porta altres conseqüències, l'efecte protector del conductor de guarda disminueix entre aquest en el procés de descàrrega per corona.

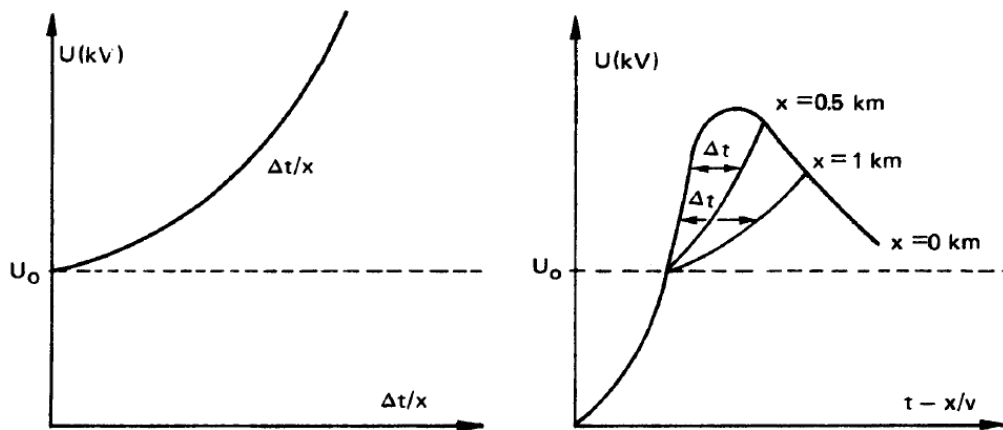


Figura 2-18 Deformació que pateix l'ona incident com a conseqüència del increment de la capacítància del conductor, ocasionada per l'efecte corona.



### 3. Comparativa dels diferents mètodes de càlcul .

En aquest capítol es veu els diferents mètodes de càlcul, de les pèrdues per efecte corona, principalment ja que pel càlcul del gradient, ja es va veure les diferents formes de càlcul segons la configuració dels conductors, si eren simples, si estaven en paral·lel o en feix, apartat 2.3. Així que es procedirà a veure els diferents mètodes, principalment segons els autors que van fer els estudis de les expressions com (Peek, 1911), (Peek, 1929), (Ryan, et al., 1924) i (Peterson, 1933).

Primer es desenvoluparà la fórmula de (Peek, 1911) i tot el càlcul relacionat amb el camp elèctric i les pèrdues.

#### 3.1 Pèrdues per efecte corona segons Peek

Les pèrdues per efecte corona en un conductor avaluades per Peek, de forma més específica, i actual, correspon a (Eq. 3.1), on en l'apartat 2.8 s'anuncia (Eq. 2.40) però referida de forma general, i la utilitzada als principis dels seus estudis.

$$P_{corona} = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \left( \frac{U_s}{\sqrt{3}} - U_c^* \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{r}{DMG}} \cdot 10^{-5} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

On  $U_s$  és la tensió més elevada de la línia i  $U_c^*$ , és la tensió crítica d'aparició de corona en valor eficaç, calculada en 2.2.1,  $P_{corona}$  són les pèrdues per l'efecte corona per fase, s'expressa en kW/Km.

S'ha de tindre en compte que pel cas de línies trifàsiques les pèrdues per efecte corona corresponen a la contribució per cada fase.

Els passos per calcular les pèrdues per efecte corona són els següents:

- Càlcul de la matriu de coeficients de potencial (3.1.1) i (3.1.2).
- Càlcul del camp elèctric o gradient elèctric a la superfície dels conductors (3.1.3).
- Càlcul del camp crític o tensió crítica disruptiva (2.2.1).
- Obtenció de les pèrdues per efecte corona, (Eq. 3.1).

### 3.1.1 Determinació de la matriu de coeficients de potencial per una línia simple.

En aquest apartat es determinarà el procediment per obtenir la matriu de coeficients de potencial d'una línia simple, amb només les 3 fases.

Per determinar el camp elèctric a la superfície dels conductors d'una línia elèctrica, amb objecte de comprovar si és superior al camp elèctric crític d'inici de descàrregues corona, o si és superior al camp elèctric visual d'efecte corona, s'utilitza el mètode de simulació de càrregues equivalents, i el mètode de les imatges.

El mètode numèric de simulació de càrregues, consisteix en calcular un conjunt de  $n$  càrregues  $q_j$  ( $j=1\dots n$ ) equivalents a les reals, situades al eix dels  $n$  conductors que satisfan la condició de tensió coneguda en els  $n$  conductors.

La distribució de potencial elèctric en qualsevol punt de l'espai i en particular, a la superfície dels conductors, es determina com la superposició del potencial creat per cada una de les  $n$  càrregues equivalents que substitueix a la configuració real, es pot veure en (Eq. 3.2).

$$V_i = V_{i1} + V_{i2} + V_{i3} + \dots + V_{ij} + \dots + V_{in} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Per  $i=1,\dots,n$ .

On  $V_i$  és el potencial elèctric en el punt  $P_i$  de l'espai i  $V_{ij}$  és el potencial elèctric en el punt  $P_i$  creat per la càrrega  $q_j$ .

La contribució  $V_{ij}$  de la càrrega  $q_j$  al potencial del punt  $P_i$  ve donada per (Eq. 3.3).

$$V_{ij} = p_{ij} \cdot q_j \quad (\text{Eq. 3.3})$$

On el coeficient de potencial  $p_{ij}$  representa el valor de potencial en el punt  $P_i$  produït per la càrrega lineal del longitud infinita  $q_j$ , quan aquesta té un valor de l'unitat.

Per tindre en compte el pla de terra, es considera simètricament respecte aquest un altre conjunt de  $n$  càrregues lineals  $-q_j$ , denominades càrregues imatge, iguals en mòdul però de signe

oposat a les que simulen els conductors. D'aquesta forma, en el pla de terra la contribució de potencial d'una càrrega i la seva simètrica es cancel·la. El coeficient de potencial conjunt  $p_{ij}$ , d'una càrrega genèrica  $q_j$ , junt amb la seva imatge  $-q_j$ , en un punt  $P_i$ , està compostat per 2 sumands, un degut a la pròpia càrrega  $q_j$ , i l'altre corresponent a la seva imatge  $-q_j$ , on la seva composició es pot expressar en (Eq. 3.4).

$$p'_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

On  $D_{ij}$  és la distància entre el punt  $P_i$  i la càrrega  $q_j$ ,  $H_{ij}$  és la distància entre el punt  $P_i$  i la càrrega imatge  $-q_j$ ,  $\epsilon_0$  és la permitivitat elèctrica de l'aire.

Quan  $j = i$ , (Eq. 3.4) pren la forma com (Eq. 3.5).

$$p'_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{H_i}{r_i} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

On  $r_i$  és el radi del conductor  $i$  en m i  $H_i$  és la distància entre el punt  $P_i$  i la càrrega imatge  $-q_i$ .

Totes aquestes relacions es poden veure a la Figura 3-1.



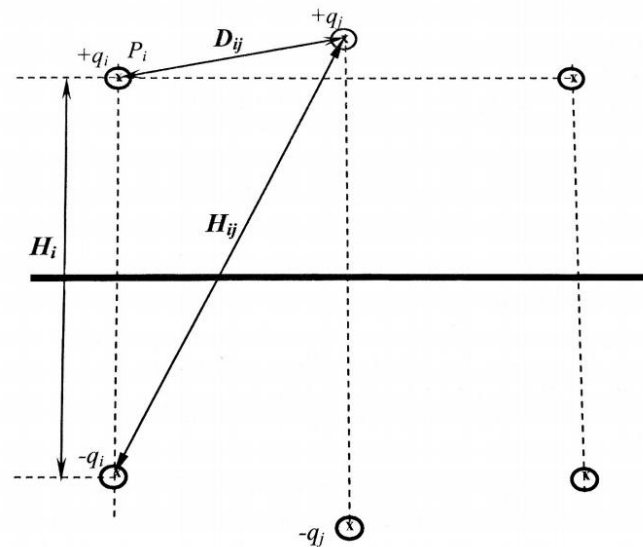


Figura 3-1 Línia elèctrica trifàsica en presència del pla de terra. El punt  $P_i$  correspon a un punt de la superfície del conductor  $i$  i la càrrega  $q_j$  està situada en el eix del conductor  $j$ .

Si es planteja (Eq. 3.6) de la distribució de potencial elèctric per cada un dels conductors, s'obindrà un sistema de  $n$  equacions lineals amb  $n$  incògnites, el valor de les  $n$  càrregues. A la pràctica, s'utilitza una càrrega centrada en l'eix de simetria de cada conductor, amb el què el número d'incògnites es redueix a tantes com conductors existeixin a la configuració de la línia.

$$V_i = \sum_{j=1}^n p'_{ij} \cdot q_j \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Què de forma matricial s'expressa amb (Eq. 3.7).

$$[\bar{V}] = [p'] \cdot [\bar{q}] \quad (\text{Eq. 3.7})$$

On  $[\bar{V}]$  és el vector de potencials en els  $n$  conductors,  $[\bar{q}]$  és el vector incògnita de les  $n$  càrregues lineals què simulen els  $n$  conductors i  $[p']$  és la matriu de coeficients de potencial de  $n \times n$ .

Normalment les matrius són de  $3 \times 3$  elements o de  $4 \times 4$  elements, és a dir per les 3 fases o per les 3 fases i el cable de terra, respectivament, es veurà que per una línia doble obtindrem matrius de  $6 \times 6$ , és a dir 3 fases més 3 fases, tot això es desenvolupa a l'apartat (3.1.2).

Si aïllem el vector incògnita obtenim (Eq. 3.8).

$$[\bar{q}] = [p']^{-1} \cdot [\bar{V}] \quad (\text{Eq. 3.8})$$

On  $[p']^{-1}$  és la matriu de capacitats  $[C]$  per unitat de longitud.

Al tractar-se de tensió alterna es treballa en un camp complex considerant que els vectors  $[\bar{V}]$  i  $[\bar{q}]$  són complexos associats a les variables sinusoidals  $u(t)$  i  $q(t)$ . Els valors complexos estaran definits pel seu mòdul expressat en valor de cresta i el seu angle, què correspondrà amb el desfasament entre fases, prenen una de les tensions de fase com a referència. Com a conseqüència, els mòduls resultants dels elements del vector solució  $[\bar{q}]$  seran els valors màxims de les càrregues en els  $n$  conductors.

El vector de potencials per una línia trifàsica de tres conductors sense conductor de terra amb una càrrega lineal per conductor vindrà donat per (Eq. 3.9).

$$[\bar{V}] = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -0.5 - j\sqrt{3}/2 \\ -0.5 + j\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Sent  $U$ , la tensió de línia o tensió entre fases en valor eficaç.

En el cas d'existir un o diversos cables de terra es té que incrementar la matriu  $[p']$  amb tantes files de coeficients de potencial com conductors de terra hi hagi, alhora que s'ha d'incloure el valor zero en els elements del vector de tensions  $[\bar{V}]$  corresponents als cables de terra existents. Per exemple, en el cas d'una línia amb un conductor per fase i amb un cable de terra, la matriu  $[p']$  tindrà una dimensió de  $4 \times 4$  i el vector  $[\bar{q}]$  tindrà 4 elements, tot això s'explica amb mes detall al apartat (3.1.2).

### 3.1.2 Determinació de la matriu de coeficient de potencial per una línia simple amb conductor de terra, i per una línia doble.

A l'apartat anterior (3.1.1), s'explica com s'obté la matriu de coeficients de potencial per una línia simple, però si tenim una línia simple amb conductor de terra, ja que el conductor de terra influeix a l'efecte corona, o una línia amb circuit doble, l'únic procediment durant el càlcul de les pèrdues per efecte corona que varia, es l'obtenció de la matriu de potencials i la forma del vector de tensions, seguidament es veu el càlcul per una línia simple amb conductor de terra, on varia la dimensió de la matriu de potencials, que en comptes com en l'apartat anterior que era de 3x3 elements, ara serà de 4x4 elements, ja que son 4 conductors, i el vector de tensions tindrà 4 components en comptes de 3.

Per tant el vector de tensions queda de la forma (Eq. 3.10)

$$[\bar{V}] = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -0.5 - j\sqrt{3}/2 \\ -0.5 + j\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

On  $U$ , és la tensió de línia o tensió entre fases en valor eficaç, i veiem que respecte a (Eq. 3.9), s'afegeix el terme 0 referent al cable de terra, el qual ja es sap que no té tensió.

Ara amb referencia a una línia doble, la matriu de coeficients de potencial tindrà una dimensió de 6x6 elements, ja que son 6 conductors o fases, i el vector de tensions en aquest cas està format per 6 elements, i tindrà la forma següent (Eq. 3.11).

$$[\bar{V}] = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -0.5 - j\sqrt{3}/2 \\ -0.5 + j\sqrt{3}/2 \\ 1 \\ -0.5 - j\sqrt{3}/2 \\ -0.5 + j\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

On  $U$ , és la tensió de línia o tensió entre fases en valor eficaç, veiem que respecte al vector de tensions descrit a (Eq. 3.9), hi ha 6 termes els quals 3 estan repetits dues vegades, això fa

referència a que al tindre 2 circuits, 2 fases aniran desfasades  $0^\circ$ , 2 fases estan desfasades  $-120^\circ$  i les altres dues que queden tindran un desfasament de  $120^\circ$ .

Per tant els 3 primers termes fan referència a un circuit, i els altres 3 a l'altre circuit.

### 3.1.3 Càlcul del camp elèctric a la superfície del conductor

Si existeix un sol conductor per fase, pot considerar-se el camp constant a la seva superfície, ja que la distància entre conductors és suficientment gran. El camp elèctric mig,  $E_{im}$ , a la superfície del conductor i de radi  $r_i$  es pot calcular pel teorema de Gauss en (Eq. 3.12).

$$E_{im} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r_i} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

On,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  (Permitivitat del buit)

On  $q_i$ , és el mòdul de la càrrega equivalent del conductor per unitat de longitud obtinguda anteriorment, què substituïnt resulta (Eq. 3.13).

$$[|\bar{E}|] = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{q_0}{r_0} \\ \frac{q_1}{r_1} \\ \frac{q_2}{r_2} \\ \frac{q_3}{r_3} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Pel cas de les línies amb conductors amb feix, la hipòtesis de camp constant a la superfície del conductor manca de rigor, ja que influeixen la resta de càrregues, especialment les més pròximes què pertanyen als altres conductors del mateix feix.

Es considera que el camp elèctric en un conductor de feix, depèn únicament de les càrregues contingudes en els conductors del mateix feix i es suposa que les càrregues de tots els conductors del feix son iguals a  $q_m$ , que és el valor mig de les càrregues resultants de la solució de l'equació (Eq. 3.8) per els  $m$  conductors del mateix feix.

Degut a la simetria en la disposició dels conductors del feix, el camp elèctric en un dels conductors del feix creat per la resta dels (m-1) conductors té una direcció radial. El seu valor en mòdul s'aproxima al obtingut per una única càrrega situada en l'eix del feix de valor igual a la càrrega suma dels (m-1) conductors en (Eq. 3.14).

$$\bar{E}_r = \frac{q_m \cdot (m - 1)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_h} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

On  $r_h$ , és el radi del feix, expressat en (Eq. 3.15).

$$r_h = \frac{\Delta}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

On  $\Delta$ , és la separació entre 2 conductors contigus del feix.

Superposant a  $\bar{E}_r$  el camp creat per la càrrega  $q_m$  del propi conductor en la mateixa direcció de  $\bar{E}_r$ , s'obté el valor del camp màxim en la direcció radial del feix, obtenim (Eq. 3.16)

$$\bar{E}_{max} = \frac{q_m}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r} \left[ 1 + \frac{(m - 1) \cdot r}{r_h} \right] \quad (\text{Eq. 3.16})$$

El sistema d'equacions definit per l'expressió 1.56, pot plantejar-se considerant una càrrega per cada conductor del feix o alternativament una càrrega equivalent de valor  $q_m$ , per els m conductors del feix. A efectes del càlcul dels coeficients de potencial es pot demostrar que el radi de la càrrega equivalent dels m conductors del feix ve donat per (Eq. 3.17).

$$r_{equiv} = \sqrt[m]{m \cdot r \cdot r_h^{m-1}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

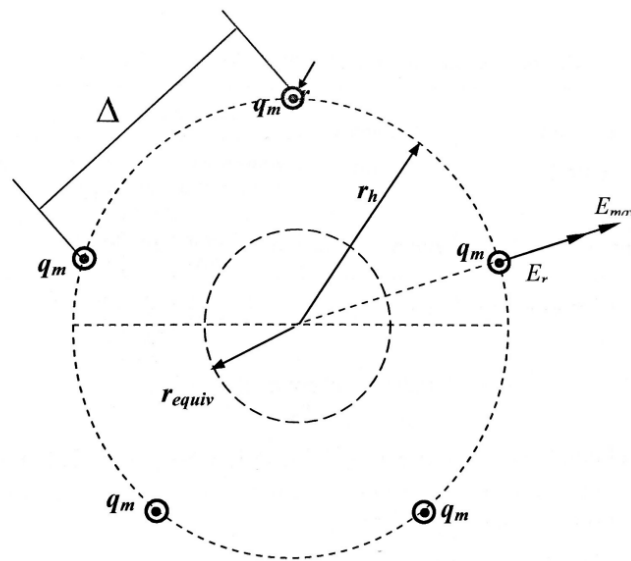


Figura 3-2 Camp elèctric en els conductors que formen el feix.

Si el valor de cresta del camp elèctric màxim resultant de (Eq. 3.16), fos superior al valor del camp d'inici de descàrregues visuals corona definit per l'equació (Eq. 2.18) de l'apartat 2.3 s'hauria de dissenyar un altre configuració de línia, augmentant el radi  $r$  dels conductors, o número de conductors en feix amb el fi de reduir el camp elèctric màxim dels conductors. S'ha de ressaltar també, que encara que l'increment de la distància entre fases i l'augment de la distància al pla del terra, també redueix el valor del camp elèctric màxim en els conductors, aquesta influència es menor i sol estar condicionada per factors econòmics.

Un cop es té la tensió crítica en valor eficaç d'inici de descàrrega calculada es procedeix a calcular les pèrdues amb l'equació (Eq. 3.1) esmentada al principi d'aquest apartat 3.1, el mètode curt del càlcul de les 3 fases, suposa que la tensió crítica d'inici de descàrrega corona és la mateixa per les 3 fases, i iguala les pèrdues en les 3 fases, és a dir, els mateixos kW/km per fase.

Però podem calcular pel mètode llarg, què seria el no suposar la mateixa tensió d'inici de descàrrega corona per les 3 fases i calcular un valor més exacte d'aquesta mitjançant el vector de camp elèctric, fixant el valor de camp elèctric en tots el conductors de fase igual al camp crític  $E_c$  i aïllant el valor de  $U$  que satisfà l'equació.

En un altre bibliografia disposem de la fórmula de Peek, que és l'equació **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** expressada en 2.8, fa referència a (Siegert, 1989).

### 3.2 Altres formes de càlcul de les pèrdues per efecte corona

A continuació anomenarem les fórmules o mètodes per calcular les pèrdues per efecte corona, a banda de l'equació de Peek.

- Fórmula de Ryan i Henline, (Ryan, et al., 1924).
- Fórmula de Peterson, (Peterson, 1933).
- Mètode d'Electricité de France (EDF). (Gary, y otros, 1977)
  - Mètode per bon temps.
  - Mètode per mal temps.

#### 3.2.1 Fórmula de Ryan i Henline

La fórmula de Peek no és vàlida en la proximitat de la tensió d'inici de l'efecte ( $U_0$ ), anomenada també tensió disruptiva, degut al seu comportament quadràtic. En l'any 1924 Ryan i Henline (Ryan, et al., 1924) van proposar la següent equació (Eq. 3.18) pel bon temps:

$$P_{cor} = 4fCU(U - U_0) \quad (\text{Eq. 3.18})$$

On  $P_{cor}$  són les pèrdues per efecte corona segons Ryan y Henline expressades en kW/km i fase,  $U$  és la tensió de fase a terra en kV, rms<sup>1</sup>,  $f$  és la freqüència en Hz de la tensió aplicada,  $U_0$  és la tensió disruptiva en kV,  $C$  és la capacitància dels conductors què es pot calcular a partir de (Eq. 3.19), s'ha de introduir a l'equació (Eq. 3.18) en kF/km<sup>2</sup>.

$$C = \frac{1000}{18 \cdot \ln \frac{DMG}{RMG}} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

<sup>1</sup> Rms fa referència al valor eficaç.

<sup>2</sup> Unitat de la capacitància en quilo farads per km, quilo farads son 10<sup>3</sup> farads

On  $C$  és la capacitància en nF/km<sup>3</sup>.

Pel que veiem la potencia i en conseqüència les pèrdues, son proporcionals a  $U \cdot I$ , el terme què resta de l'expressió (Eq. 3.18), pot representar una intensitat de corrent característica del fenomen, aquesta visió també s'utilitza per l'atenuació per efecte corona.

Aquesta equació (Eq. 3.18) és de molt interès teòric, a donat llocs a nombrosos estudis sobre la intensitat de corrent capacitiva, que a la vegada caracteritza a les pèrdues ocasionades per l'efecte en qüestió. Aquesta corrent circula un cop que la tensió del conductor excedeix a la tensió d'inici o disruptiva  $U_0$ .

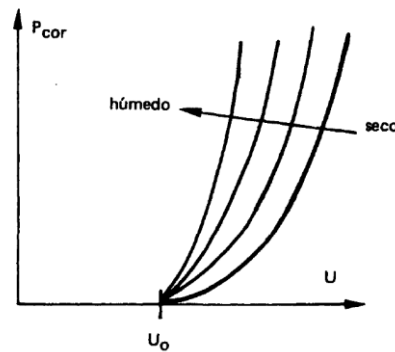


Figura 3-3 Increment de les pèrdues en funció de la humitat

### 3.2.2 Fórmula de Peterson

Aquesta expressió i els seus estudis daten de l'any 1933 (Peterson, 1933), quan va ser mostrada per primer cop en una reunió de la AIEE (American Institute of Electrical Engineers), i al igual que les altres formules, contempla només les pèrdues amb bon temps, la fórmula de Peterson s'expressa a (Eq. 3.20).

$$P_{cor} = \frac{20.96 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot U^2 \cdot F}{\left\{ \log \left( \frac{D}{R} \right) \right\}^2} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

---

<sup>3</sup> Nano farads son 10<sup>-9</sup> farads



On  $f$  és la freqüència en Hz de la tensió aplicada,  $U$  és la tensió de fase a terra del conductor en kV, rms,  $D$  és la separació entre els conductors en cm,  $R$  és el radi del conductor en cm i  $F$  és un factor que depèn de la tensió disruptiva amb la tensió aplicada (Siegert, 1989).

El factor  $F$  en la bibliografia original (Peterson, 1933) s'expressa amb  $\varphi$  que relaciona la tensió característica de línia per fase amb la tensió per fase de servei  $V/e_d$ .

La tensió característica de línia per fase ( $e_d$ ), es pot trobar segons el tipus de configuració. Per conductors rodons de superfície llisa i neta s'utilitza (Eq. 3.21), per conductors de diversos fils, que tenen 12 o més brins a la capa exterior s'utilitza (Eq. 3.22) i per un cable que té 6 brins a la capa exterior s'utilitza (Eq. 3.23).

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \cdot R \cdot \log\left(\frac{D}{R}\right) \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \cdot \frac{\left[\log\left(\frac{D}{c \cdot R_h}\right) + (n_h - 1) \cdot \log\left(\frac{D}{R - c \cdot R_h}\right)\right]}{\frac{1}{c \cdot R_h} + \frac{n_h - 1}{2 \cdot (R - c \cdot R_h)}} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$e_d = 35,47 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \cdot R \cdot \left[\log\left(\frac{D}{R}\right) + 0,0677\right] \quad (\text{Eq. 3.23})$$

On  $R$  és el radi del conductor en cm,  $D$  és la distància entre fases en cm,  $\delta$  és la densitat relativa del aire en  $\text{Kg/m}^3$ ,  $e_d$  és la tensió característica de línia per fase, en kV eficaços entre fase i neutre,  $n_h$  és el nombre de fils de la capa exterior del conductor,  $R_h$  és el radi del fil de la capa exterior,  $c$  és un factor que es calcula mitjançant (Eq. 3.24) i el valor de  $m$  s'obté de la Taula 3-1 Valors de  $m$  per diferents casos.

$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

<b>m</b>	<b>Condicions</b>
0.87 – 0.90	Per condicions normals
0.67 – 0.74	Per conductors bruts
0.912 – 0.93	Per conductors rentats amb dissolvents
0.885	Per conductors raspats amb filferro
1	Polit
0.72 – 0.75	Conductors bruts en pols.
0.945	Després de 5 mesos exposats a l'acció atmosfèrica.
0.92	Sotmès a l'acció atmosfèrica, humitat baixa de dia.
0.78	Sotmès a l'acció atmosfèrica, humitat baixa de nit.

**Taula 3-1** Valors de m per diferents casos.

Un cop es calcula la relació  $V/e_d$ , es troba el valor de  $\varphi$  en la Figura 3-4 i Figura 3-5

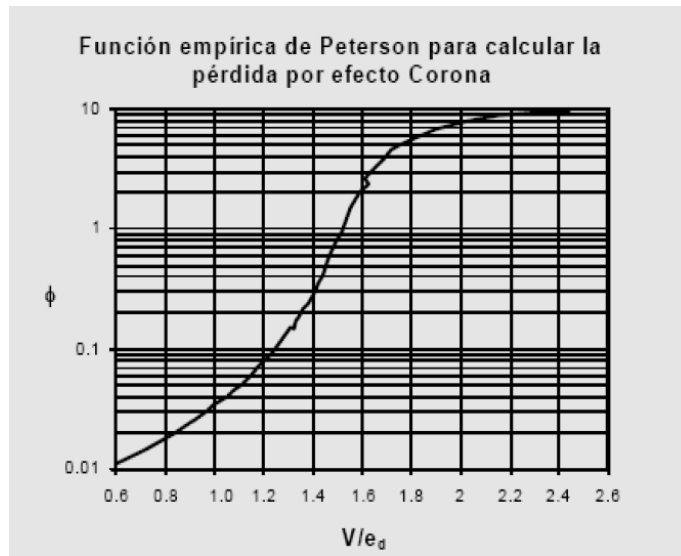


Figura 3-4 Funció de Peterson per relacions V/ed entre 0,6 i 2,4.

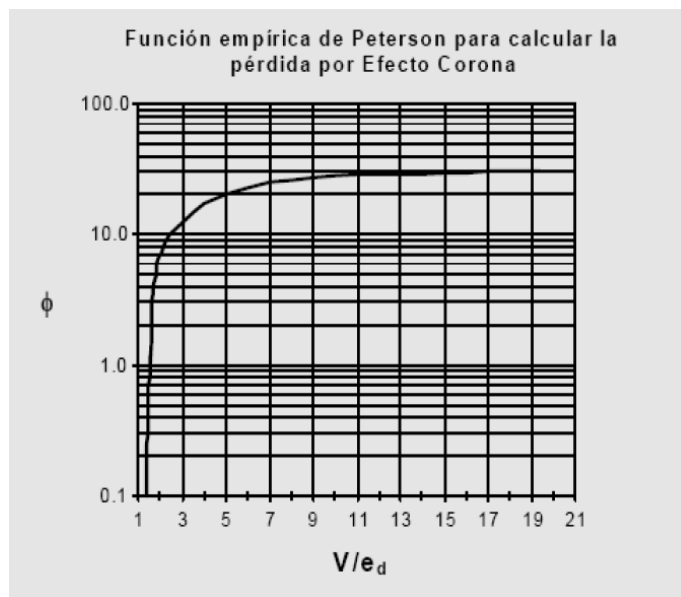


Figura 3-5 Funció de Peterson per relacions V/ed entre 1 i 19.

Després de mirar en els gràfics, es troba el valor de  $\varphi$  a la Taula 3-2.

V/e <sub>d</sub>	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5
$\varphi$	0.011	0.014	0.018	0.025	0.036	0.053	0.085	0.150	0.950

Taula 3-2 Relació entre  $\varphi$  i V/ea

Un cop trobat el valor de  $\varphi$  es pot calcular les pèrdues per efecte corona segons el mètode de Peterson, (Eq. 3.20).

### 3.2.3 Mètode d'Electricité de France (EDF)

Els investigadors C. Gary i M. Moreau (Gary, y otros, 1977) (Gary, 1998), article al **Annex II**, van desenvolupar dos mètodes pel càlcul de pèrdues per efecte corona per conductors en feix. Un d'aquests mètodes és aplicable a condicions de bon temps i l'altre a condicions de mal temps.

#### 3.2.3.1 Mètode de bon temps

Per un conductor format per  $n$  subconductors per fase es dona la següent equació (Eq. 3.25) empírica per les pèrdues corona per fase.

$$P_{cor} = P_0 \cdot r_0^{1.8} \cdot (n + 6)^2 \cdot \frac{f}{50} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

On  $f$  és la freqüència de la tensió en Hz,  $r_0$  és el radi del subconductor en cm,  $n$  és el número de subconductors i  $P_0$  és un factor de pèrdua de potencia que s'obté de la Figura 3-6, considerant el gradient relatiu com relació entre el gradient màxim del feix i el gradient elèctric crític del subconductor descrits en (2.2).

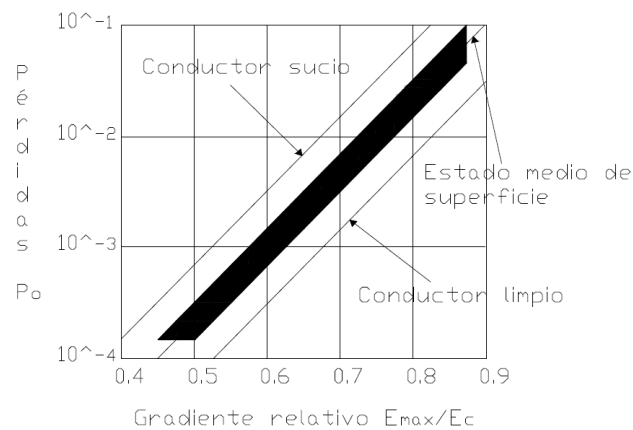


Figura 3-6 Gràfic que relaciona el gradient relatiu amb les pèrdues  $P_0$  per conductors secs.

### 3.2.3.2 Mètode per mal temps

Sota condicions de mal temps, el fenomen s'agreuja, adquirint la seva màxima intensitat amb taxes de pluja de 1 mm per hora o superior. En aquestes condicions el camp elèctric màxim supera al crític.

Aquest mètode és un procés analític desenvolupat rigorosament i verificat experimentalment amb mesures a les línies i en gàbies de prova. Utilitzades configuracions en feix de 1 a 8 subconductors, amb diàmetres entre 2.0 i 5.8 cm per conductor.

Les pèrdues corona per mal temps queden determinades per (Eq. 3.26).

$$P_{cor} = k \cdot P_e \quad \text{en kW/km} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

On  $k$  és el factor que depèn de les característiques geomètriques de la línia i ve donat per (Eq. 3.27).

$$k = \frac{f}{50} \cdot (n \cdot r \cdot \beta)^2 \cdot \frac{\log_{10} \left( \frac{R_0}{R_c} \right) \cdot \log_{10} \left( \frac{\rho}{R_c} \right)}{\log_{10} \left( \frac{R_0}{\rho} \right)} \quad (\text{Eq. 3.27})$$

I  $f$  és la freqüència de la tensió en Hz,  $r$  és el radi del subconductor en cm,  $R_c$  és el radi equivalent del conductor múltiple en cm,  $R_0$  és el radi del conductor a potencial zero de la línia coaxial equivalent en cm i es calcula amb (Eq. 3.28).

$$R_0 = R_c \cdot \text{antilog} \left( \frac{0.02412}{C_s \cdot 10^6} \right) \quad (\text{Eq. 3.28})$$

On  $C_s$  és la capacitància de servei del conductor en  $F^4$ ,  $\rho$  és el radi mig d'emigració de la càrrega espacial en cm, i expressat en (Eq. 3.29).

$$\rho = 25 \cdot \sqrt{n \cdot r} \quad (\text{Eq. 3.29})$$

---

<sup>4</sup> Farad, unitat de la capacitància.

I el factor  $\beta$ , es calcula amb (Eq. 3.30).

$$\beta = 1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}} \quad (\text{Eq. 3.30})$$

Respecte (Eq. 3.26), on  $P_e$ : és la pèrdua específica corona en kW/km/fase, que depèn del camp elèctric relatiu  $E$  i de l'estat de la superfície dels conductors  $m$ , que això s'obté de les taules i gràfics que es mostren a continuació, considerant el gradient relatiu com la raó entre el gradient mig i el camp elèctric de Peek  $E/E_c$ ,  $E$  gradient superficial mig dels conductors, en el cas de conductors múltiples del conductor fictici de radi  $R_c$ , en kV/cm,  $E_c$  el gradient crític del conductor determinat amb la fórmula de Peek corregida per considerar l'efecte de variació de densitat del aire.

El factor  $m$ , per un mateix valor d'intensitat de pluja pot variar entre el 20% i el 30%, depenent del grau d'envelliment del conductor. Aquesta variació pot traduir-se perfectament en una variació de fins al 100% en les pèrdues específiques  $P_e$ , amb baixes intensitats de pluja i baix camp elèctric, per trobar el valor de  $P_e$  es fa servir els següents elements Figura 3-7, Figura 3-8, Taula 3-3, Taula 3-4.

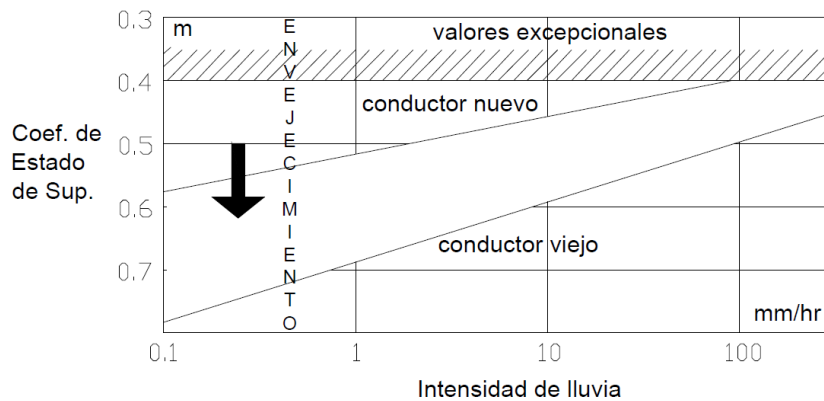


Figura 3-7 Determinació del factor m.

<b>Intensitat de pluja</b>	0.1	1.0	10	100	mm/h
<b>Pitjors valors observats</b>	0.40	..	..	0.40	
<b>Conductors nous</b>	0.58	0.54	0.46	0.40	
<b>Conductors envellits</b>	0.76	0.67	0.58	0.49	

Taula 3-3 Determinació del factor m.

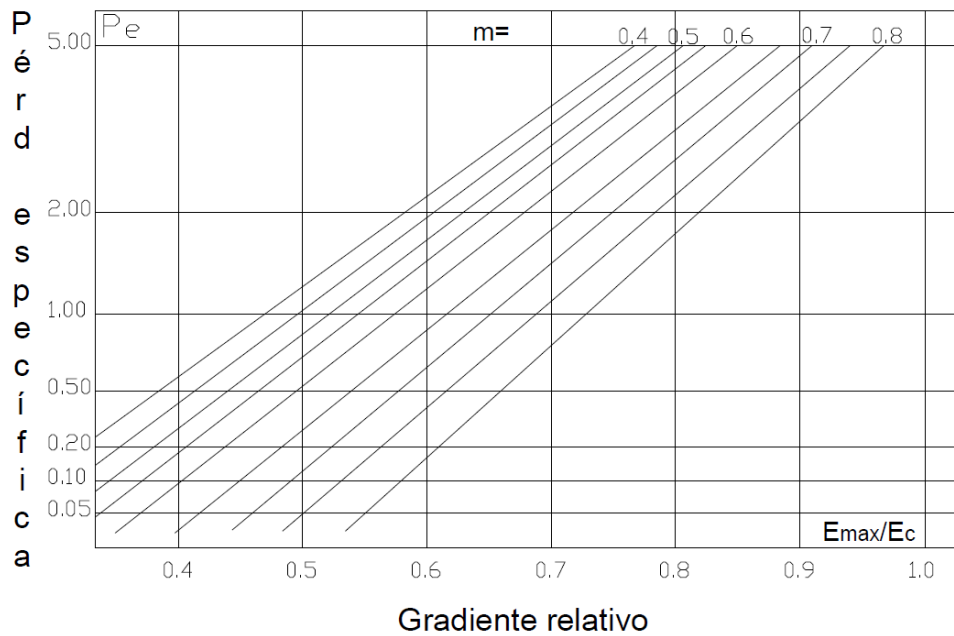


Figura 3-8 Pèrdues específiques per corona en kW/km/fase.

<b>Factor m</b>	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
<b>Gradient relatiu</b>						
0.4	0.6	0.3	0.1			
0.6	2.2	1.7	1.2	0.7	0.18	
0.8	6.0	4.9	4.0	3	1.8	0.5

Taula 3-4 Pèrdues específiques per corona en kW/km/fase.

### 3.3 Discussió sobre els mètodes de càlcul

Després de veure tots els mètodes de càlcul disponibles per les pèrdues per efecte corona, es veu que tots ells tenen en compte d'una manera o d'un altre els mateixos paràmetres, tots són per càlcul en bon temps, menys el mètode de EDF què existeix per bon temps i mal temps (pluja), així que la comparació més exhaustiva què es farà serà amb els mètodes de bon temps què són tots els demes i la majoria.

La fórmula de Peek (3.1) té en compte la densitat de l'aire, la freqüència de la línia, la tensió de la línia, la tensió crítica d'aparició de l'efecte, la distància entre els conductors i el radi, l'única diferència entre el mètode curt i el mètode llarg de Peek, es que, el mètode curt considera que la tensió crítica d'aparició de l'efecte és igual per totes les fases, és a dir, què considera que les pèrdues són iguals per fase, això per tema de simplicitat de càlcul esta bé, però és poc precís per saber les pèrdues que es produeixen a tota la línia, i es sap que la fase central es la que té més influència de pèrdues, respecte a les fases laterals, si tenim una disposició plana de 3 fases. Així que el mètode curt és poc precís, i sobretot si la nostra línia es molt llarga, així que el mètode llarg és molt més precís ja què considera per cada fase la tensió d'aparició de l'efecte corona per cada una d'elles, si comparéssim els resultats entre el mètode curt i llargs podríem tindre diferències de pèrdues totals fins la meitat, és a dir, el mètode curt podria tindre un valor de pèrdues totals de la meitat del resultat del mètode llarg, es faran comparacions de resultats a la següent part d'aquest projecte amb dades de línies reals, i verificarem el raonament que s'ha explicat, així que el mètode més exacte podem dir què és el mètode de Peek llarg.

En els següents mètodes, és a dir, el de Ryan i Henline (3.2.1), el de Peterson (3.2.2) i el de Electricité de France (3.2.3), els podem comparar amb el mètode de Peek curt i llarg, però els mètodes curts i llargs sempre estarà la diferència en buscar les tensions crítiques d'aparició del fenomen de corona, cal destacar que el mètode d'Electricité de France, només serveix per línies amb conductors en feix, mentre que els altres mètodes es poden utilitzar per línies simples o per línies en feix.

Es pot veure que el mètode de Peek és el que té les magnituds de la línia més explícites, això fa pensar que serà el mètode què donarà amb més exactitud el valor de pèrdues, els altres mètodes no seran tant explícits, ja que, per exemple, el mètode de Peterson s'ha de buscar una relació de tensions per trobar un factor què es fa servir a la fórmula de pèrdues, el mètode de Ryan i



---

Henline té en compte la capacitància, que aquesta té relació amb el radi i la distància de les fases.

Així que es pot arribar a aquesta conclusió, com s'ha discutit anteriorment, el mètode de Peek sembla que tindrà un valor més exacte de pèrdues, per tindre totes les magnituds més explícites, i el mètode més exacte serà el llarg, tenint en compte les tensions crítiques de cada fase, el valor del mètode de Peek simplificat, s'aproximarà més o menys a aquest valor, llavors respecte a cada mètode, si tenim en compte que la tensió crítica és la mateixa per les tres fases, els valors obtinguts per els mètodes de Ryan i Henline, Peterson, i en el cas de feix, el mètode de EDF, seran molt semblants al mètode de Peek simplificat, sent el valor del mètode de Peek el més aproximat al real, i respecte al mètode llarg, ja hem dit que el mètode de Peek serà el més exacte, però els altres mètodes també seran amb el mètode llarg valors pròxims al de Peek llarg, també cal destacar que el mètode de EDF serà el més elevat a causa de les variables què té en compte, es un dels més complets després del de Peek, després vindria el mètode de Peterson, i el últim el de Ryan i Henline.

També no es sap per quin tipus de distribució estan pensades les expressions de les pèrdues de cada mètode, si serà millor en disposicions en triangle o en paral·lel, o en un altre tipus de configuració.

Cal destacar que s'avaluarà aquesta discussió en la part següent de aquest projecte ja que es valoraran les pèrdues de forma analítica amb les dades obtingudes de la línia proposada per calcular les seves pèrdues.

## 4. Mètodes anticorona

Per detectar l'aparició de l'efecte corona, s'instal·len càmeres tèrmiques especials que permeten veure l'aparició del efecte a nivells inferior que els sentits humans no poden percebre.

Alguns dels recursos que s'utilitzen per evitar o per extingir l'efecte corona són:

- Anells anticorona

És un toroide, normalment de material conductor ubicat a les immediacions dels terminals dels dispositius d'alta tensió, estan aïllats elèctricament i es solen utilitzar juntament amb una cadena d'aïlladors. La funció del anell anticorona és distribuir i homogeneïtzar la intensitat de camp elèctric al voltant del aïllador en una zona inferior, on la distribució de voltatge aplicat és major i eliminar possibles causes de malmena de material i acumulació de contaminants a la superfície del aïllador.



Figura 4-1 Anell Anticorona juntament amb la cadena d'aïlladors, en amarre.



Figura 4-2 Anells Anticorona juntament amb la cadena d'aïlladors, en suspensió.

---

- Taps anticorona

Els taps anticorona, tal i com diu el seu nom, són uns taps amb les vores arrodonides, que es posen al final dels aïlladors, desenvolupant les mateixes funcions que els anells anticorona.

- Separació entre fases

Es pot separar la distància entre fases, al augmentar la distància, provoquem que es requereixi major tensió de línia per provocar l'efecte corona, però l'excés d'aquesta distància provocaria un augment de la inductància, i a més la estructura seria més complexa i de major cost.

- Conductors en feix

Al utilitzar diversos conductors per fase, el que es fa és augmentar el radi equivalent, de la fórmula del radi equivalent es pot veure que al augmentar el radi, augmentem el número de conductors per fase, aquest mètode és més econòmic que augmentar el radi d'un sol conductor, ja que en aquest cas es pot disminuir la secció dels subconductors a mesura que es van agregant.

- Conductors d'alumini

S'aprofita que l'alumini té més secció per una mateixa resistència. Si s'utilitza conductors alumini-acer es pot produir l'efecte pel·licular, tindrem una densitat de corrent major al exterior del conductor.

- Conductors d'aliatge d'alumini (Aldrey)

Es un conductor cablejat concèntric que es compona d'una o varies capes de filferro d'aliatge d'alumini. En aquets conductors el radi és més gran que els anteriors per que són mals conductors, tenen una resistència més elevada que els cables d'alumini tradicionals.

- Conductors buits expandits

S'utilitzen en molt alta tensió, si es necessités encara més secció es podria escollir cables totalment buits.



## 5. Aplicació dels diferents mètodes de càlcul a una línia real

En aquest capítol es farà la comparació dels diferents mètodes de càlcul de les pèrdues per efecte corona, descrits en l'apartat (3), és a dir, que s'aplicarà la teoria desenvolupada en capítols anteriors i finalment es discutirà els resultats i es farà una interpretació. Primer de tot s'ha de fer el dimensionat elèctric de la línia aèria d'alta tensió, això implica el càlcul de constants físiques i elèctriques, equacions de transmissió, tot això a l'apartat 5.1 i finalment el càlcul de l'efecte corona als conductors.

### 5.1 Dimensionat elèctric de la línia aèria d'alta tensió

En aquest apartat es calcula les constants físiques, elèctriques i les equacions de transmissió per veure si la línia és apte i compleix el reglament (RLAT, 2008).

#### 5.1.1 Dades de la instal·lació

La configuració de la línia ve donada per la Figura 5-1.

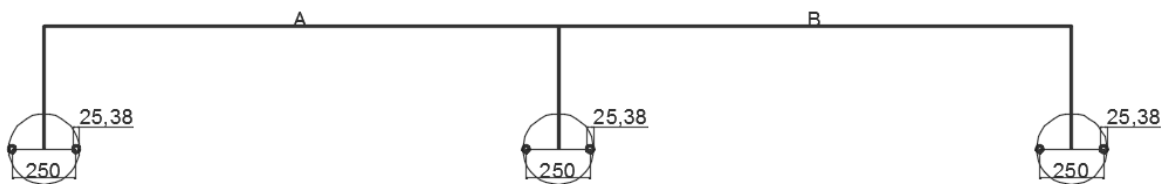


Figura 5-1 Secció de la línia a estudiar, distàncies en mm.

Les característiques principals de la línia venen donades per les següents magnituds:

- Potència (S): 175 MVA.
- Tensió de línia (U): 400 kV.
- $\cos \varphi = 1$ .
- Longitud: 255 km.
- Distància A: 10000 mm.
- Distància B: 10000 mm.
- Número de conductors per feix: 2.
- Distància entre conductors del feix:  $d = 250$  mm.
- Alçada sobre el nivell del mar: 250 m.
- Temperatura Ambient: 20 °C.
- Tensió més elevada de la línia: 420 kV, segons Taula 5-1.

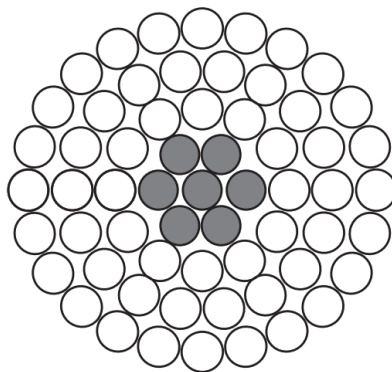
TENSIÓ NOMINAL DE LA XARXA ( $U_n$ ) kV	TENSIÓ MÉS ELEVADA DE LA XARXA ( $U_s$ ) kV
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20*	24
25	30
30	36
45	52
66*	72,5
110	123
132*	145
150	170
220*	245
400*	420

Taula 5-1 Tensions nominals i tensions més elevades de la xarxa. (RLAT, 2008)

Les característiques principals del conductor que s'utilitza, i els paràmetres necessaris, venen donats per les següents magnituds:

- Denominació, segons UNE: 337-AL1/44-ST1A, (denominació antiga, LA 380 GULL).
- Tipus de material: Alumini i acer galvanitzat.
- Nombre de fils: 54+7.
- Diàmetre dels fils: Al (2,82 mm); Ac (2,82 mm).
- Secció: Al (337,1 mm<sup>2</sup>); Ac (43,7 mm<sup>2</sup>); Total (381,0 mm<sup>2</sup>).
- Resistència elèctrica a 20°C: 0,0857 Ω/km.
- Secció equivalent a Cu<sup>1</sup>:212 mm<sup>2</sup>.
- Diàmetre total: 25,38 mm.
- Coeficient d'alumini: 0,00403.
- Coeficient  $\alpha$  per cables Al-Ac: 0,809.
- Temperatura de treball del conductor: 75 °C.
- Coeficient mediambiental  $K_c$ : 0,9.
- Coeficient de rugositat del conductor  $K_s$ : 0,9.

A la Figura 5-2 Conductor de 54+7 fils, d'alumini i acer galvanitzat., es pot veure una secció del conductor que s'utilitzarà



**Figura 5-2 Conductor de 54+7 fils, d'alumini i acer galvanitzat.**

---

<sup>1</sup> Fa referència al Coure.



### 5.1.2 Càlcul de les magnituds físiques i elèctriques de la línia

Es planteja una tensió per línia de 400 kV. La intensitat nominal que circularà per cada fase es dona per (Eq. 5.1).

$$I_{Nom} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{175 \cdot 10^6 [VA]}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 [V]} = 252,60 A \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Es sap que la resistència a 20 °C es.

$$R_{cc}(a 20^\circ C) = 0,085 \Omega^2/km$$

El càlcul de la resistència a la temperatura de treball del conductor ve donada per (Eq. 5.2).

$$R_{cc}(a 75^\circ C) = \frac{R_{cc}(a 20^\circ C) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)}{n} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$R_{cc}(a 75^\circ C) = \frac{0,0857 \cdot (1 + 0,00403 \cdot (75 - 20))}{2} = 0,0534 \frac{\Omega}{km}$$

$$R_{TOTAL} = 0,05237 \frac{\Omega}{km} \cdot 255 km = 13,34 \Omega$$

Ara es calcula la Reactància per fase o Reactància d'auto inducció segons (Eq. 5.3).

$$X_k = L_k \cdot \omega \quad (\text{Eq. 5.3})$$

On  $\omega$  s'obté:

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50 = 314,16 \text{ rad/s}$$

I  $L_k$  que és la inductància per fase calcula amb (Eq. 5.4).

$$L_k = 0,2 \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

On la  $DMG$  i el  $RMG$  s'obtenen de (Eq. 5.5) i (Eq. 5.6) respectivament.

$$DMG_{total} = \sqrt[3]{DMG_{ab} \cdot DMG_{bc} \cdot DMG_{ca}} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

On  $DMG_{ab} = 10000 \text{ mm}$ ,  $DMG_{bc} = 10000 \text{ mm}$  i  $DMG_{ca} = 20000 \text{ mm}$ .

$$DMG_{total} = \sqrt[3]{10000 \cdot 10000 \cdot 20000} = 12599,21 \text{ mm}$$

I

$$RMG_{feix} = \sqrt[n]{n \cdot \alpha \cdot r \cdot R_{feix}^{(n-1)}} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

On  $n$  és el numero de subconductors per feix,  $\alpha$  és el coeficient amb valor de 0,809 per cables Al-Ac,  $r$  és el radi del subconductor en mm i  $R_{feix}$  és el radi equivalent del feix en mm, i es calcula amb (Eq. 5.7).

$$R_{feix} = \frac{d}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

On  $d$  és la distància entre els subconductors del feix.

Per tant  $R_{feix}$  es calcula segons (Eq. 5.7).

$$R_{feix} = \frac{250}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 125 \text{ mm}$$

I el  $RMG_{feix}$  serà segons (Eq. 5.6).

$$RMG_{feix} = \sqrt[2]{2 \cdot 0,809 \cdot 12,69 \cdot 125^{(2-1)}} = 50,661 \text{ mm}$$

Ara ja es pot calcular la inductància  $L_k$  amb (Eq. 5.4).

$$L_k = 0,2 \cdot \ln \frac{12599,21[\text{mm}]}{50,661[\text{mm}]} = 1,1003 \text{ mH/km}$$

I la reactància per fase  $X_k$  mitjançant (Eq. 5.3).

$$X_k = 1,1003 \cdot 10^{-3}[\text{H/km}] \cdot 314,16 [\text{rad/s}] = 0,346595 \text{ } \Omega/\text{km}$$

On la reactància total de la línia és:

$$X_{k \text{ total}} = 0,346595 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 255 \text{ km} = 88,3819 \text{ } \Omega$$

Seguidament es calcula la susceptància de la línia en  $S^3$ , s'utilitza (Eq. 5.8).

$$B_k = C_k \cdot \omega \tag{Eq. 5.8}$$

On  $C_k$  és la capacitància de la línia i es calcula amb l'expressió (Eq. 5.9).

$$C_k = \frac{1000}{18 \cdot \ln \frac{DMG}{RMG}} = \frac{1000}{18 \cdot \ln \frac{12599,21}{50,661}} = 10,07 \text{ nF/km} \tag{Eq. 5.9}$$

Ara que ja es tenen els paràmetres necessaris per calcular la susceptància es calcula amb (Eq. 5.8).

$$B_k = 10,07 \cdot 10^{-9}[\text{F/km}] \cdot 314,16[\text{rad/s}] = 3,164 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}$$

<sup>3</sup> Unitat de la susceptància en Siemens

On la susceptància total de la línia serà:

$$B_{k\ total} = 3,164 \cdot 10^{-6} S/km \cdot 255 km = 8,068 \cdot 10^{-6} S$$

Ens falta calcular la conductància de la línia  $G_k$  però ens fa falta calcular les pèrdues per efecte de corona de la línia, ja que la conductància de la línia es calcula (Eq. 5.10).

$$G_k = \frac{P_{Corona}[kW/km]}{\frac{U_s}{\sqrt{3}}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Així que s'avança el càlcul de les pèrdues corona pel mètode curt de Peek, calculades a (5.2.5) i s'obté la conductància que segons (Eq. 5.10) és la següent.

$$G_k = \frac{0,50121972[kW/km]}{\frac{420}{\sqrt{3}}[V]} \cdot 10^{-3} = 8,52414 \cdot 10^{-9} \Omega/km$$

On la conductància total de la línia serà:

$$G_{k\ total} = 8,52414 \cdot 10^{-9} \Omega/km \cdot 255 km = 2,17366 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Seguidament es calculen els paràmetres característics de la línia, que aquests són, la impedància característica, l'angle característic i la potència característica.

On la impedància característica es calcula mitjançant (Eq. 5.11).

$$Z_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} \quad (\text{Eq. 5.11})$$

On  $\bar{Z}$  és la impedància de la línia en  $\Omega$ , formada per la resistència  $R$  i la reactància  $X$ , i  $\bar{Y}$  és l'admitància, formada per la conductància  $G$  i la susceptància  $B$ , tots aquests paràmetres calculats fan referència a tota la línia, és a dir cap es deixa en funció dels kilòmetres.

Així que la impedància característica  $Z_c$  serà, segons (Eq. 5.11)

$$Z_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{13,3486 + j88,3819 [\Omega]}{2,1736 \cdot 10^{-6}[\Omega] + j8,068 \cdot 10^{-6}[S]}} = 331,9435 - j24,4763 \Omega$$

En números polars s'obté que la impedància característica  $Z_c$  és:

$$Z_c = 332,8447 \angle -4,2171^\circ \Omega$$

L'Angle característic es calcula mitjançant (Eq. 5.12).

$$\bar{\theta} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

On  $\bar{\theta}$  és l'angle característic en graus ( $^\circ$ ), i es calcula per les dades d'aquesta línia segons (Eq. 5.12).

$$\bar{\theta} = \sqrt{(13,3486 + j88,3819 [\Omega]) \cdot (2,1736 \cdot 10^{-6}[\Omega] + j8,068 \cdot 10^{-6}[S])}$$

$$\bar{\theta} = \sqrt{(-0,0712 + j0,01096)} = 0,020469 + j0,267765$$

Expressat en forma polar:

$$\bar{\theta} = 0,268546 \angle 85,6284^\circ$$

I finalment es calcula la potencia característica segons (Eq. 5.13).

$$P_c = \frac{U_L^2}{|Z_c|} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

On  $P_c$  és la potència característica en W<sup>4</sup>,  $U_L$  és la tensió de línia en V i  $Z_c$  és la impedància característica en  $\Omega$ .

Per tant la potència característica de la línia serà segons (Eq. 5.13).

$$P_c = \frac{(400 \cdot 10^3 [V])^2}{|332,8447[\Omega]|} = 480704664,96 \text{ W} \rightarrow 480,7 \text{ MW}$$

### 5.1.3 Càlcul de les equacions i dels coeficients de transmissió

Sabem que la línia té una longitud total de 255 km, per tant, les equacions què es fan servir seran les de línia llarga ja que una línia de més de 200 km ja es considera una línia llarga per trobar les constants de transmissió. Aquestes constants de transmissió es trobaran a partir de funcions hiperbòliques, a partir de les expressions (Eq. 5.14), (Eq. 5.15), (Eq. 5.16).

$$\bar{A} = \bar{D} = \cosh(\theta) \quad (\text{Eq. 5.14})$$

$$\bar{B} = Z_c \cdot \sinh(\theta) \quad (\text{Eq. 5.15})$$

$$\bar{C} = \frac{\sinh(\theta)}{Z_c} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

On

$$\bar{A} = \bar{D} = \cosh(0,020469 + j0,267765) = 0,9645 + j0,0055$$

$$\begin{aligned} \bar{B} &= (331,9435 - j24,4763) \cdot \sinh(0,020469 + j0,267765) \\ &= 12,9469 + j87,3217 \end{aligned}$$

$$\bar{C} = \frac{\sinh(0,020469 + j0,267765)}{(331,9435 - j24,4763)} = -9,9908 \cdot 10^{-9} + j0,0007968$$

---

<sup>4</sup> Watts

Les equacions de transmissió vindran donades per (Eq. 5.17).

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{A} \cdot \bar{V}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{V}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

On  $\bar{V}_1$  és la tensió d'origen de línia,  $\bar{V}_2$  és la tensió de final de línia,  $\bar{I}_1$  és la intensitat d'origen de línia i  $\bar{I}_2$  és la intensitat de final de línia.

Es pren com a valor final de línia el valor nominal de la tensió, per tant:

$$\bar{U}_{2L} = 400 \text{ kV} \angle 0^\circ \quad ; \quad \bar{U}_{2F} = 230,94 \text{ kV} \angle 0^\circ$$

Segons la variació del  $\cos \varphi_2$ , és a dir, a final de línia, s'obindrà una tensió  $\bar{V}_1$  i una intensitat  $\bar{I}_1$ , valors de principi de línia, juntament amb una caiguda de tensió en tant per cent (%), i una potencia aparent de principi de línia  $S_1$ , totes aquestes magnituds es calculen amb les expressions que es mostren a continuació.

La intensitat a final de línia  $\bar{I}_2$  s'obté en A<sup>5</sup>, a partir de l'expressió (Eq. 5.18).

$$\bar{I}_2 = I_{nom} \cdot \cos \varphi_2 \quad (\text{Eq. 5.18})$$

On  $I_{nom}$  es calcula a (Eq. 5.1).

La tensió a principi de línia  $\bar{V}_1$  s'obté en V, a partir de l'expressió (Eq. 5.19).

$$\bar{V}_1 = \bar{A} \cdot \bar{V}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \quad (\text{Eq. 5.19})$$

On  $\bar{A}$  i  $\bar{B}$  són calculats en (Eq. 5.14) i (Eq. 5.15),  $\bar{I}_2$  en (Eq. 5.18) i  $\bar{V}_2$  és la tensió nominal de fase.

<sup>5</sup> Ampere, unitat de la intensitat.

La intensitat de principi de línia  $\bar{I}_1$  s'obté en A, a partir de l'expressió (Eq. 5.20).

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{V}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \quad (\text{Eq. 5.20})$$

On  $\bar{C}$  i  $\bar{D}$  són calculats en (Eq. 5.16) i (Eq. 5.14),  $\bar{I}_2$  en (Eq. 5.18) i  $\bar{V}_2$  és la tensió nominal de fase.

La caiguda de tensió de la línia, es calcula en tant per cent, a partir de (Eq. 5.21).

$$\Delta U (\%) = \frac{|U_1| - |U_2|}{|U_1|} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.21})$$

I la potència aparent a l'origen de línia ( $S_1$ ), es calcula en VA<sup>6</sup>, a partir de (Eq. 5.22).

$$S_1 = 3 \cdot |U_1| \cdot |I_1| \quad (\text{Eq. 5.22})$$

Per trobar tots aquests valors en cada cas, es mostraran els valors a la Taula 5-2.

---

<sup>6</sup> Volt-Ampere Reactiu, unitat de la potència aparent.



$\cos \varphi_2$	$\bar{I}_2[\text{A}]$	$\bar{V}_1[\text{V}]$	$\bar{I}_1[\text{A}]$	$\Delta U (\%)$	$S_1[\text{MVA}]$
1	252,5907	227212,603 $\angle$ 5,8926°	306,149 $\angle$ 37,2728°	-1,6405	208,68
0,95	239,9612	226939,302 $\angle$ 5,6199°	296,504 $\angle$ 38,6878°	-1,7629	201,86
0,9	227,33	226671,155 $\angle$ 5,3465°	287,052 $\angle$ 40,1969°	-1,8833	195,19
0,85	214,7021	226408,18 $\angle$ 5,0725°	277,812 $\angle$ 41,8076°	-2,0016	188,69
0,8	202,0725	226150,396 $\angle$ 4,7978°	268,807 $\angle$ 43,5277°	-2,1179	182,37
0,75	189,44	225897,82 $\angle$ 4,5226°	260,061 $\angle$ 45,3652°	-2,2321	176,24
0,7	176,8135	225650,47 $\angle$ 4,2467°	251,601 $\angle$ 47,3284°	-2,3441	170,32
0,65	164,1839	225408,363 $\angle$ 3,9702°	243,457 $\angle$ 49,4256°	-2,4540	164,63
0,6	151,5544	225171,516 $\angle$ 3,6932°	235,661 $\angle$ 51,6647°	-2,5618	159,19
0,55	138,9249	224939,945 $\angle$ 3,4155°	228,249 $\angle$ 54,0530°	-2,6674	154,02
0,5	126,2953	224713,667 $\angle$ 3,1373°	221,260 $\angle$ 56,5969°	-2,7708	149,16
0,45	113,6658	224492,698 $\angle$ 2,8585°	214,735 $\angle$ 59,3010°	-2,8719	144,61
0,4	101,0362	224277,054 $\angle$ 2,5792°	208,718 $\angle$ 62,1678°	-2,9709	140,43
0,35	88,4067	224066,749 $\angle$ 2,2994°	203,253 $\angle$ 65,1966°	-3,0675	136,62
0,3	75,7772	223861,799 $\angle$ 2,0190°	198,387 $\angle$ 68,3833°	-3,1619	133,23
0,25	63,1476	223468,023 $\angle$ 1,7382°	194,164 $\angle$ 71,7194°	-3,2539	130,28
0,2	50,5181	223468,023 $\angle$ 1,4568°	190,627 $\angle$ 75,1914°	-3,3436	127,79
0,15	37,8886	223274,225 $\angle$ 1,1750°	187,815 $\angle$ 78,7810°	-3,4310	125,80
0,1	25,2590	223095,839 $\angle$ 0,8927°	185,761 $\angle$ 82,4647°	-3,5160	124,32
0,05	12,6295	222917,878 $\angle$ 0,6099°	184,489 $\angle$ 86,2149°	-3,5987	123,37
0	0	222745,355 $\angle$ 0,3267°	184,018 $\angle$ 90,0007°	-3,6789	122,96

Taula 5-2 Valors dels paràmetres elèctrics per diferents estats de carrega.

Es pot veure que la caiguda de tensió de la línia compleix el reglament de les línies d'alta tensió, (RLAT, 2008), es veu que la caiguda de tensió màxima és de 3,67 % enfront a la del reglament, que diu que una línia no pot superar el 7% de caiguda de tensió.

Així que després d'obtenir tots els resultats, es veu que la línia és apte per la posta en marxa.

## 5.2 Càlcul de l'efecte corona pel mètode de Peek.

Una vegada calculats els paràmetres elèctrics de la línia d'estudi en 5.1, es procedirà al càlcul de les pèrdues, seguint el procés anomenat al capítol anterior.

### 5.2.1 Dades necessàries i càlcul de les distàncies entre els conductors

Primer de tot es farà un repàs de les dades necessàries pel càlcul de les pèrdues per l'efecte corona, moltes dades estaran referenciades a la Figura 5-3.

- Alçada de la línia respecte el pla de terra (H): 14 m.
- Diàmetre del conductor: 25,38 mm.
- Conductors per feix : 2.
- Distància entre conductors del feix ( $d_{cf}$ ): 0,25 m.
- Distància entre fases: 10 m.
- Tensió de la línia ( $U_n$ ): 400 kV.
- Coeficient de rugositat del conductor ( $K_s$ ): 0,9.
- Coeficient mediambiental ( $K_c$ ): 0,9.
- Distància mitjana geomètrica (DMG): 12599,2 mm.
- Radi mig geomètric (RMG): 50,66 mm.
- Alçada sobre el nivell del mar: 250 m.
- Temperatura: 20 °C.
- Tensió més elevada de la línia ( $U_s$ ) : 420 kV, segons Taula 5-1 Tensions nominals i tensions més elevades de la xarxa. .

Es necessitarà saber quina dimensió té el radi del feix, que es calcularà a partir de (Eq. 5.23)

$$R_{feix} = \frac{d_{total}[m]}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d[m]}{d_{total}[m]}} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

On  $R_{feix}$  és el radi equivalent que formen els conductors del feix, en m,  $d_{total}$  és el diàmetre total que formen els conductors del feix més la distància que hi ha entre els conductors, es calcula amb (Eq. 5.24) en m, i  $d$  és el diàmetre dels subconductor del feix, en m.

$$d_{total} = d[m] + d_{cf}[m] \quad (\text{Eq. 5.24})$$

On  $d_{cf}$  és la distància entre els conductor del feix en m.

Per tant el  $d_{total}$  segons (Eq. 5.24).

$$d_{total} = 0,02538 + 0,25 = 0,275 \text{ m}$$

I el  $R_{feix}$  és segons (Eq. 5.23).

$$R_{feix} = \frac{0,275[m]}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,025[m]}{0,275[m]}} = 0,059 \text{ m}$$

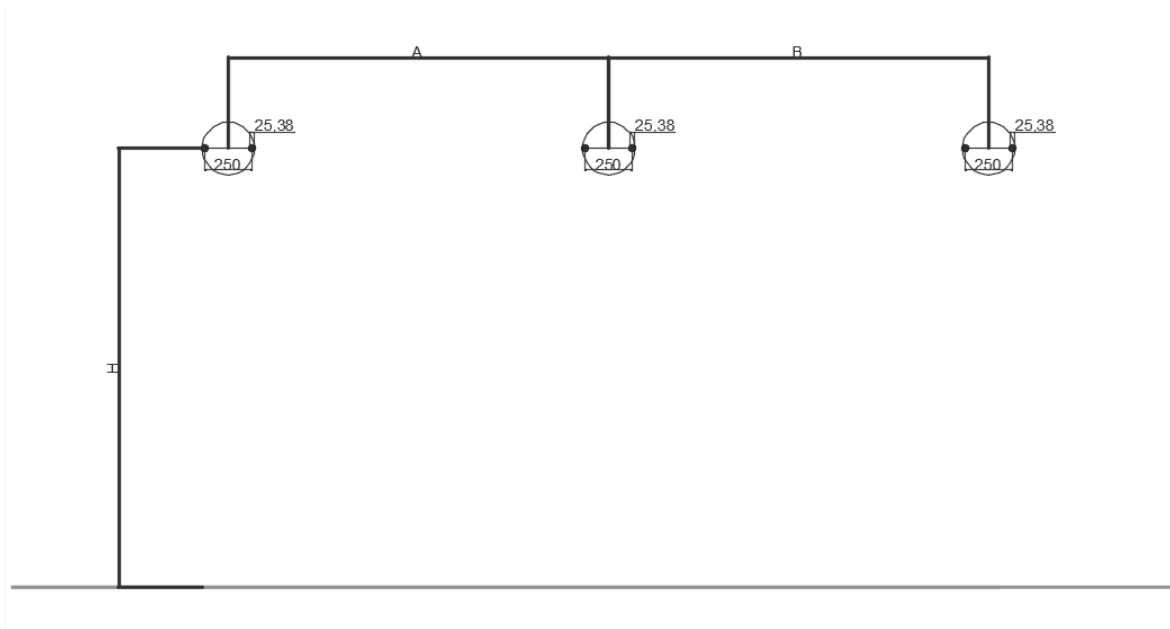


Figura 5-3 Secció de la línia amb l'alçada respecte al pla de terra, distàncies en mm.

Les tensions què es tenen a la nostra línia seràn:

- Tensió de línia  $U_L$ : 400 kV.
- Tensió simple o de fase  $U_F$ : 230,94 kV.
- Tensió de línia màxima  $U_{Lmax}$ : 565,68 kV.
- Tensió simple màxima  $U_{Fmax}$ : 326,59 kV.



<b>Distàncies entre conductors (m)</b> <b>(D)</b>	$D_{11}$	0 m
	$D_{12}$	10 m
	$D_{13}$	20 m
	$D_{21}$	10 m
	$D_{22}$	0 m
	$D_{23}$	10 m
	$D_{31}$	20 m
	$D_{32}$	10 m
	$D_{33}$	0 m
<b>Distàncies entre conductors i les seves imatges (m)</b> <b>(H)</b>	$H_{11}$	28 m
	$H_{12}$	29,73 m
	$H_{13}$	34,40 m
	$H_{21}$	29,73 m
	$H_{22}$	28 m
	$H_{23}$	29,73 m
	$H_{31}$	34,40 m
	$H_{32}$	29,73 m
	$H_{33}$	28 m

Taula 5-3 Distàncies entre conductors, i aquests amb les seves imatges.

Ara que ja es saben totes les distàncies entre els conductors, i entre ells i les seves imatges es procedirà al càlcul de la matriu de coeficients de potencial, en l'apartat següent (5.2.2)

### 5.2.2 Càlcul de la matriu de coeficients de potencial i de les càrregues equivalents de cada conductor.

En aquest apartat s'obté la matriu de coeficients de potencial, per què en posteriors apartats es pugui calcular els gradients i els camps crítics, per tal de seguir amb l'estudi de les pèrdues per efecte corona de la línia en qüestió.

Primer es construiran les matrius necessàries per obtenir la matriu de coeficients de potencial, que és el nostre objectiu, i per tal de obtenir aquesta, es necessiten dues matrius, la primera la de distàncies entre conductors, amb components de la forma  $D_{ij}$ , corresponent a la distància entre el punt  $P_i$  i la carrega  $q_j$ , que fa referència a (Eq. 5.25), i la segona de distàncies dels conductors amb les seves imatges, amb components de la forma  $H_{ij}$ , corresponent a la distància entre el punt  $P_i$  i la carrega  $-q_j$  segons (Eq. 5.26), tot això està desenvolupat teòricament a (3.1.1).

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5.25})$$

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5.26})$$

On la matriu de distàncies entre els conductors serà de la següent forma, segons (Eq. 5.25).

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 20 \\ 10 & 0 & 10 \\ 20 & 10 & 0 \end{bmatrix}$$

I la matriu de distàncies entre els conductors i les seves imatges serà, segons (Eq. 5.26)

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28 & 29,73 & 34,40 \\ 29,73 & 28 & 29,73 \\ 34,40 & 29,73 & 28 \end{bmatrix}$$

Seguidament s'obté la matriu de coeficient de potencials, amb els termes de la següent forma (Eq. 5.27).

$$p_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}} \quad (\text{Eq. 5.27})$$

En el cas de que  $i = j$  l'expressió (Eq. 5.27), queda de la forma com (Eq. 5.28).

$$p_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{H_i}{r_i} \quad (\text{Eq. 5.28})$$

On  $p_{ij}$  és el potencial entre conductors diferents,  $p_{ii}$  és el potencial propi del conductor,  $\varepsilon_0$  és la permitivitat del buit,  $i$  té un valor de  $8,84 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}^7$ ,  $r_i$  és el radi del conductor  $i$ , que per les 3 fases té el mateix valor,  $0,01269 \text{ m}$ ,  $H_i$  és la distància entre el conductor  $i$ , i la seva imatge.

Per tal de calcular tots aquest coeficients de potencial, es fa primer una matriu amb els termes amb la següent forma,  $\ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}}$ , i  $\ln \frac{H_i}{r_i}$ , i es multiplica per  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}$ , així que la matriu de coeficients de potencial, queda de la següent forma (Eq. 5.29) en  $m/F$ .

$$[p] = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \begin{bmatrix} \ln \frac{H_{11}}{r_1} & \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} & \ln \frac{H_{13}}{D_{13}} \\ \ln \frac{H_{21}}{D_{21}} & \ln \frac{H_{22}}{r_2} & \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} \\ \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} & \ln \frac{H_{32}}{D_{32}} & \ln \frac{H_{33}}{r_3} \end{bmatrix} [m/F] \quad (\text{Eq. 5.29})$$

Si substituïm valors en (Eq. 5.29), i obtenim que la matriu de potencials és, pas per pas:

$$[p] = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}} \cdot \begin{bmatrix} \ln \frac{28}{0,059} & \ln \frac{29,73}{10} & \ln \frac{34,40}{20} \\ \ln \frac{29,73}{10} & \ln \frac{28}{0,059} & \ln \frac{29,73}{10} \\ \ln \frac{34,40}{20} & \ln \frac{29,73}{10} & \ln \frac{28}{0,059} \end{bmatrix} [m/F]$$

<sup>7</sup> Farads partit per metre, unitat de la permitivitat del buit, o constant elèctrica  $\varepsilon_0$ .

$$[p] = 1,8 \cdot 10^{10} \cdot \begin{bmatrix} 6,1604 & 1,0896 & 0,5425 \\ 1,0896 & 6,1604 & 1,0896 \\ 0,5425 & 1,0896 & 6,1604 \end{bmatrix} [m/F]$$

Finalment la matriu de coeficients de potencials  $[p]$ , queda de la forma següent.

$$[p] = \begin{bmatrix} 1,11 \cdot 10^{11} & 1,96 \cdot 10^{10} & 9,77 \cdot 10^{-9} \\ 1,96 \cdot 10^{10} & 1,11 \cdot 10^{11} & 1,96 \cdot 10^{10} \\ 9,77 \cdot 10^{-9} & 1,96 \cdot 10^{10} & 1,11 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} [m/F]$$

On el determinant de la matriu  $[p]$  té un valor de  $|p| = 1,27 \cdot 10^{33}$ .

Si es troba la inversa de la matriu de potencials, és a dir  $[p]^{-1}$  s'obté la matriu de les capacitats.

Després de trobar la matriu de potencials, es pot trobar el valor de la càrrega de cada conductor segons l'expressió (Eq. 5.30).

$$[p] \cdot [q] = [U] \quad (\text{Eq. 5.30})$$

On  $[p]$  és la matriu de potencials calculada a partir de (Eq. 5.29),  $[q]$  és la matriu de càrregues i  $[U]$  és la matriu de tensions, que tindrà la forma (Eq. 5.31).

$$[U] = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5.31})$$

El vector de tensions tindrà aquests valors.

$$[U] = 326,59 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 326,59 \\ -163,3 - j282,83 \\ -163,3 + j282,83 \end{bmatrix}$$



Seguidament per trobar el valor de cada càrrega per conductor  $q_1, q_2, q_3$  es trobaran 3 matrius que seran combinació de la matriu de coeficients de potencials (Eq. 5.29) amb el vector de tensions (Eq. 5.31), és a dir, què es multiplica la matriu  $[p]$  pel vector  $[U]$ .

- Primera matriu

$$\begin{bmatrix} 326,59 & 1,96 \cdot 10^{10} & 9,77 \cdot 10^{-9} \\ -163,3 - j282,8356 & 1,11 \cdot 10^{11} & 1,96 \cdot 10^{10} \\ -163,3 + j282,8356 & 1,96 \cdot 10^{10} & 1,11 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

On el seu determinant és  $4,3301 \cdot 10^{24} - 3,6361 \cdot 10^{23}j$ .

I el seu mòdul  $|M_1| = 4,34 \cdot 10^{24}$ .

- Segona matriu

$$\begin{bmatrix} 1,109 \cdot 10^{11} & 326,59 & 9,769 \cdot 10^{-9} \\ 1,962 \cdot 10^{10} & -163,3 - j282,8356 & 1,962 \cdot 10^{10} \\ 9,769 \cdot 10^{-9} & -163,3 + j282,8356 & 1,109 \cdot 10^{11} \end{bmatrix}$$

On el seu determinant és  $-2,3173 \cdot 10^{24} + 4,0135 \cdot 10^{24}j$ .

I el seu mòdul  $|M_2| = 4,63 \cdot 10^{24}$ .

- Tercera matriu

$$\begin{bmatrix} 1,109 \cdot 10^{11} & 1,962 \cdot 10^{10} & 326,59 \\ 1,962 \cdot 10^{10} & 1,109 \cdot 10^{11} & -163,3 - j282,8356 \\ 9,769 \cdot 10^{-9} & 1,962 \cdot 10^{10} & -163,3 + j282,8356 \end{bmatrix}$$

On el seu determinant és  $-1,8501 \cdot 10^{24} - 3,9317 \cdot 10^{24}j$ .

I el seu mòdul  $|M_3| = 4,34 \cdot 10^{24}$ .

Ara que ja s'ha fet el càlcul de la multiplicació de la matriu de potencial amb el vector de tensió, es pot procedir al càlcul de les càrregues equivalents per cada fase, que de forma general vindrà donada per aquesta expressió (Eq. 5.32).

$$q_n = \frac{|M_n|}{|p|} \quad (\text{Eq. 5.32})$$

On  $q_n$  és el valor de la càrrega de la fase n, en Coulombs,  $|M_n|$  és el mòdul del determinant de la matriu de potencials, amb el vector de tensions, on n correspon al numero de fase i  $|p|$  és el mòdul del determinant de la matriu de coeficients de potencial.

Per tant es calcula la càrrega equivalent per cada conductor de la nostra línia mitjançant (Eq. 5.32).

$$q_1 = \frac{|M_1|}{|p|} = \frac{4,3453 \cdot 10^{24}}{1,276 \cdot 10^{33}} = 3,40 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$q_2 = \frac{|M_2|}{|p|} = \frac{4,6345 \cdot 10^{24}}{1,276 \cdot 10^{33}} = 3,63 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$q_3 = \frac{|M_3|}{|p|} = \frac{4,3452 \cdot 10^{24}}{1,276 \cdot 10^{33}} = 3,40 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

Amb els valors de les càrregues calculats, es pot procedir a calcular els camps elèctrics, màxim i mitjos, a la superfície dels conductors de la nostra línia (5.2.3).

### 5.2.3 Càlcul del camp elèctric o gradient elèctric, a la superfície del conductor

Un cop trobades les càrregues per cada conductor de la nostra línia, es pot trobar el camp elèctric mig de cada conductor o de cada fase a partir de (Eq. 5.33).

$$E_{mig} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot n} \quad (\text{Eq. 5.33})$$

On  $q$  és el valor de la càrrega de la fase corresponent, en Coulombs,  $\epsilon_0$  és la permitivitat del buit o constant elèctrica, que té un valor de  $8,84 \cdot 10^{-12} F/m$ , el radi de conductor és  $r$ , en metres,  $n$  és el número de subconductors del feix i  $E_{mig}$  és el camp elèctric mig a la superfície del conductor en kV/cm.

Així que els camps mitjos de cada fase, a partir de (Eq. 5.33), seran.

$$E_{mig1} = \frac{3,406 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \pi \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01269 \cdot 2} = 24,16 \text{ kV/cm}$$

$$E_{mig2} = \frac{4,6345 \cdot 10^{24}}{2 \cdot \pi \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01269 \cdot 2} = 25,77 \text{ kV/cm}$$

$$E_{mig3} = \frac{4,3452 \cdot 10^{24}}{2 \cdot \pi \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01269 \cdot 2} = 24,16 \text{ kV/cm}$$

Ara es pot trobar els camps elèctrics màxim per cada fase a la superfície dels conductors, a partir dels camps mitjos trobats anteriorment, amb l'expressió (Eq. 5.34).

$$E_{max} = E_{mig} \cdot \left[ 1 + \frac{(n-1) \cdot d}{d + d_{cf}} \right] \quad (\text{Eq. 5.34})$$

On  $d$  és el diàmetre del conductor en metres,  $d_{cf}$  és la distància entre els subconductors del feix en metres i  $E_{max}$  és el camp elèctric màxim a la superfície del conductor en  $kV/cm$ .

Per tant els camps màxims a partir de (Eq. 5.34) són els següents.

$$E_{max1} = 24,16 \cdot \left[ 1 + \frac{(2 - 1) \cdot 0,025}{0,025 + 0,25} \right] = 26,38 \text{ kV/cm}$$

$$E_{max2} = 25,77 \cdot \left[ 1 + \frac{(2 - 1) \cdot 0,025}{0,025 + 0,25} \right] = 28,14 \text{ kV/cm}$$

$$E_{max3} = 24,16 \cdot \left[ 1 + \frac{(2 - 1) \cdot 0,025}{0,025 + 0,25} \right] = 26,38 \text{ kV/cm}$$

Es pot veure que el camp elèctric té una major magnitud en la fase central de la línia que estem estudiant, per tant és la que més gradient té, i més pèrdues per efecte corona té.

#### 5.2.4 Càlcul del camp crític i de la tensió crítica disruptiva.

Per calcular el camp crític de la nostra línia, es farà a partir de la següent expressió (Eq. 5.35).

$$E_c = 30 \cdot k_s \cdot k_c \cdot \delta \tag{Eq. 5.35}$$

On  $k_s$  és el coeficient d'estat del conductor,  $k_c$  és el coeficient mediambiental,  $\delta$  és la densitat relativa de l'aire, que es calcula amb (Eq. 5.36) descrita al capítol anterior (3) i  $E_c$  és el camp crític en  $kV/cm$ .

$$\delta = \frac{273 + 25}{273 + 20} \cdot e^{-h/8150} \tag{Eq. 5.36}$$

Així que segons (Eq. 5.36)

$$\delta = \frac{273 + 25}{273 + 20} \cdot e^{-250/8150} = 0,9863$$

I el camp crític de la línia és, segons (Eq. 5.35).

$$E_c = 30 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9863 = 24 \text{ kV/cm}$$

Aquest camp crític fa referència al gradient el qual, a la línia es començarà a tindre descàrregues per l'efecte corona com a fenomen.

Després de calcular el camp crític, s'han de trobar les tensions crítiques de cada fase de la nostra línia, es farà trobant la càrrega característica  $q_i$  i es trobarà la càrrega de cada fase amb el seu desfasament de  $120^\circ$  i es multiplica per la matriu de coeficients de potencial, és a dir, es procedirà a fer el càlcul de (Eq. 5.30), per tant el vector de càrregues tindrà la forma següent (Eq. 5.37).

$$[q] = E_c \cdot \varepsilon_0 \cdot n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot 100 \begin{bmatrix} 1 \\ -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5.37})$$

I tindrà aquest valor, segons (Eq. 5.37)

$$\begin{aligned} [q] &= 24 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,012 \cdot 100 \begin{bmatrix} 1 \\ -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 3,38 \cdot 10^{-9} \\ -1,6893 \cdot 10^{-9} - j2,9259 \cdot 10^{-9} \\ -1,6893 \cdot 10^{-9} + j2,9259 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ara s'ha de multiplicar la matriu de coeficients de potencials calculada a través de (Eq. 5.29) amb el vector de càrregues trobat a partir de (Eq. 5.37). A continuació es mostra la matriu de coeficients de potencial, on els seus elements són de la forma  $P_{ij}$  i aquests elements es multipliquen pel vector de càrregues, que són de la forma  $q_j$ .

$$[p] = \begin{bmatrix} 1,11 \cdot 10^{11} & 1,96 \cdot 10^{10} & 9,77 \cdot 10^{-9} \\ 1,96 \cdot 10^{10} & 1,11 \cdot 10^{11} & 1,96 \cdot 10^{10} \\ 9,77 \cdot 10^{-9} & 1,96 \cdot 10^{10} & 1,11 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} [m/F]$$

Per trobar les tensions crítiques, es trobaran segons l'expressió (Eq. 5.38)

$$U_{cij} = P_{ij} \cdot q_j \quad (\text{Eq. 5.38})$$

Els resultats de les tensions crítiques es mostren a la Taula 5-4.

$U_{c11}$	374,74 kV			
$U_{c12}$	$-33,14 - j57,40$ kV			
$U_{c13}$	$-16,50 + j28,58$ kV			
$U_{c1}$	$U_{c11} + U_{c12} + U_{c13}$	$325,10 - j28,81$ kV	$ U_{c1} $	326,37 kV
$U_{c21}$	66,28 kV			
$U_{c22}$	$-187,37 - j324,53$ kV			
$U_{c23}$	$-33,14 + j57,40$ kV			
$U_{c2}$	$U_{c21} + U_{c22} + U_{c23}$	$-154,23 - j267,12$ kV	$ U_{c2} $	308,45 kV
$U_{c31}$	33,00 kV			
$U_{c32}$	$-33,14 - j57,40$ kV			
$U_{c33}$	$-187,37 + j324,53$ kV			
$U_{c3}$	$U_{c31} + U_{c32} + U_{c33}$	$-187,50 + j267,12$ kV	$ U_{c3} $	326,37 kV

Taula 5-4 Tensions crítiques.

Un cop es calculen les tensions crítiques de la línia, ja es pot procedir a fer els càlculs per l'obtenció de les pèrdues per efecte corona, es farà al apartat 5.2.5.

### 5.2.5 Obtenció de les pèrdues per l'efecte corona.

Un cop es calculen totes les dades necessàries per obtenir les pèrdues, es calcula el camp crític (Eq. 5.35), que aquest ja s'ha calculat en l'apartat anterior (5.2.4), i el camp crític visual, però abans posem les dades necessàries per tindre-les a mà.

- Coeficient d'estat del conductor ( $K_s$ ): 0,9.
- Coeficient mediambiental ( $K_c$ ): 0,9.
- Radi del conductor ( $r$ ): 12,69 mm.
- Distància Mitjana Geomètrica ( $DMG$ ): 12599,20 mm.
- Radi Mig Geomètric ( $RMG$ ): 50,66 mm.
- Alçada sobre el nivell del mar: 250 m.
- Temperatura: 20°C.
- Factor de densitat de l'aire ( $\delta$ ), càlcul en (Eq. 5.36): 0,9863.
- Camp elèctric crític ( $E_c$ ), càlcul en (Eq. 5.35): 24 kV/cm.

Ara es calcula el camp elèctric crític visual ( $E_v$ ), mitjançant l'expressió (Eq. 5.39).

$$E_v = 30 \cdot k_s \cdot k_c \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad (\text{Eq. 5.39})$$

On  $E_v$  és el camp elèctric visual expressat en kV/cm,  $k_s$  és el coeficient de l'estat del conductor,  $k_c$  és el coeficient mediambiental,  $\delta$  és el factor corrector de la densitat relativa de l'aire,  $r$  és el radi del conductor en cm i el factor 0,301 fa referència a conductors en disposició paral·lela.

El camp elèctric visual té aquest valor, segons (Eq. 5.39).

$$E_v = 30 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9863 \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{0,9863 \cdot 1,269}}\right) = 30,4 \text{ kV/cm}$$

Aquest camp és el que produirà, que sí es supera aquest valor, començaran a produir-se les descàrregues visuals al voltant del conductor de la línia per efecte corona. El camp elèctric visual sempre tindrà un valor més gran, que el valor del camp crític normal.

Per tal, que es produeixin pèrdues per efecte corona en el conductor, s'ha de complir que el gradient màxim de la superfície dels conductors ( $E_{max}$ ) sigui major que el camp crític ( $E_c$ ), és a dir (Eq. 5.40).

$$E_{max} > E_c \quad (\text{Eq. 5.40})$$

A continuació posem el valor dels camps màxims a la superfície del conductor, calculats a l'apartat (5.2.3) juntament amb el camp crític de cada conductor, calculat a l'apartat (5.2.4) per veure si es compleix la relació (Eq. 5.40).

$$E_{max1} = 26,38 \text{ kV/cm}$$

$$E_{max2} = 28,14 \text{ kV/cm}$$

$$E_{max3} = 26,38 \text{ kV/cm}$$

$$E_c = 24 \text{ kV/cm}$$

Es pot veure que la relació (Eq. 5.40) es compleix, per tant es pot procedir a calcular les pèrdues per l'efecte corona en cada fase, ja que en cada fase es compleix que el gradient màxim és més gran que el crític.



L'expressió que farem servir per calcular les pèrdues per efecte corona serà la següent (Eq. 5.41), per cada una de les fases de la línia, ja descrita en l'apartat corresponent.

$$P_{Corona} = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \left( \frac{U_s}{\sqrt{3}} - |U_{c(rms)}| \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{r}{DMG}} \cdot 10^{-5} \quad (\text{Eq. 5.41})$$

On  $\delta$  és el factor corrector de l'aire, calculat a (Eq. 5.36),  $f$  és la freqüència que té la línia en Hz,  $U_s$  és la tensió més elevada que té la línia en kV, a partir de la Taula 5-1,  $|U_c|$  és el mòdul de la tensió crítica de cada fase en valor eficaç,  $r$  és el radi del conductor en mm,  $DMG$  és la distància mitjana geomètrica en mm i  $P_{Corona}$  són les pèrdues per l'efecte corona, expressades en kW/km i fase.

A continuació es mostren els valors dels mòduls de la tensió crítica disruptiva en valor eficaç, per dur a terme el càlcul de les pèrdues per l'efecte corona.

$$|U_{c1(rms)}| = 326,37 / \sqrt{2} = 230,78 \text{ kV}$$

$$|U_{c2(rms)}| = 308,45 / \sqrt{2} = 218,11 \text{ kV}$$

$$|U_{c3(rms)}| = 326,37 / \sqrt{2} = 230,77 \text{ kV}$$

Ara es calculen les pèrdues per l'efecte corona per cada fase segons l'expressió (Eq. 5.41).

$$\begin{aligned} P_{Corona1} &= \frac{241}{0,9863} \cdot (50 + 25) \cdot \left( \frac{420}{\sqrt{3}} - 230,78 \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{12,69}{12599,20}} \cdot 10^{-5} \\ &= 0,79 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{Corona2} &= \frac{241}{0,9863} \cdot (50 + 25) \cdot \left( \frac{420}{\sqrt{3}} - 218,11 \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{12,69}{12599,20}} \cdot 10^{-5} \\ &= 3,45 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

$$P_{Corona3} = \frac{241}{0,9863} \cdot (50 + 25) \cdot \left( \frac{420}{\sqrt{3}} - 230,77 \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{12,69}{12599,20}} \cdot 10^{-5}$$
$$= 0,79 \text{ kW/km}$$

Les pèrdues totals serà la suma de les pèrdues per cada fase, calculades anteriorment.

$$P_{Corona \text{ total}} = 0,79 + 3,45 + 0,79 = 5,04 \text{ kW/km}$$

I les pèrdues totals de la línia són:

$$P_{Corona \text{ total línia}} = 5,04 \frac{\text{kW}}{\text{km}} \cdot 255 \text{ km} = 1287,57 \text{ kW}$$

Aquest mètode que s'ha utilitzat és el mètode de Peek llarg, on s'ha considerat que les tensions crítiques per cada fase son diferents, i es pot veure que la fase central és la que té mes influencia tant de camp elèctric o gradient, i de pèrdues per l'efecte corona.

A continuació, es farà el càlcul del mètode de Peek, però considerant la tensió crítica igual per totes les fases, és a dir, es farà el mètode de Peek simplificat o curt.

La tensió crítica disruptiva es calcularà mitjançant (Eq. 5.42).

$$U_c = 21,2 \cdot n \cdot k_s \cdot k_c \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (\text{Eq. 5.42})$$

On  $RMG$  és el radi mig geomètric en mm,  $DMG$  és la distància mitjana geomètrica en mm,  $r$  és el radi del conductor en cm,  $\delta$  és el factor de densitat relativa de l'aire,  $k_c$  és el coeficient mediambiental,  $k_s$  és el coeficient d'estat del conductor,  $n$  és el numero de subconductors del feix i  $U_c$  és la tensió crítica disruptiva en  $kV$ .

Que aquesta tensió crítica tindrà un valor segons (Eq. 5.42).

$$U_c = 21,2 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9863 \cdot 1,269 \cdot \ln \frac{12599,20}{50,66} = 237,12 \text{ kV}$$

La relació que s'ha de complir en el cas del càlcul del mètode simplificat de Peek es la següent (Eq. 5.43).

$$\frac{U_s}{\sqrt{3}} > U_c \quad (\text{Eq. 5.43})$$

Sabem que:

$$\frac{420}{\sqrt{3}} \text{ kV} > 237,12 \text{ kV}$$

$$242,48 \text{ kV} > 237,12 \text{ kV}$$

Les pèrdues per fase es calculen també amb (Eq. 5.41).

$$\begin{aligned} P_{Corona} &= \frac{241}{0,9863} \cdot (50 + 25) \cdot \left( \frac{420}{\sqrt{3}} - 237,12 \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{12,69}{12599,20}} \cdot 10^{-5} \\ &= 0,16 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

Per tant les pèrdues totals són:

$$P_{Corona \text{ totals}} = 0,16 \cdot 3 = 0,50 \text{ kW/km}$$

I les pèrdues totals al llarg de la línia són:

$$P_{Corona \text{ totals línia}} = 0,50 \frac{\text{kW}}{\text{km}} \cdot 255 \text{ km} = 127,75 \text{ kW}$$

Es pot veure que les pèrdues calculades pel mètode llarg, són 8 vegades més gran que les calculades pel mètode curt, això és degut a com s'ha dit anteriorment, a que la tensió crítica pel mètode curt, és la mateixa per les 3 fases, la qual es calcula mitjançant (Eq. 5.42), a diferència que les tensions crítiques calculades pel mètode llarg es calculen mitjançant la relació (Eq. 5.38), descrita a l'apartat (5.2.4), es veu que el mètode llarg és molt més precís ja que les tensions crítiques tenen en compte la càrrega equivalent que circula pel conductor, i els coeficients de potencial, de la matriu calculada en (Eq. 5.29) de l'apartat (5.2.2), per tant el valor del camp crític i la tensió crítica, a més a més que es diferent per cada conductor, té un valor molt més exacte. En canvi el mètode curt que és molt més simplificat, ja que es salta tot el càlcul de la matriu de coeficients de potencial i de les càrregues equivalents, juntament amb els camps elèctrics mitjos i màxims, és molt menys precís, i es veu reflectit en el resultat obtingut, ja que té un valor molt més baix que el mètode llarg.

### 5.3 Altres mètodes de càlcul de pèrdues per l'efecte corona

Un cop s'ha trobat els valors de les pèrdues pels 2 mètodes de Peek, es compararan amb els altres mètodes de càlcul de pèrdues, anomenats al apartat (3.2), primer es farà el càlcul pel mètode de Ryan i Henline, després es calcularà el de Peterson i finalment el d'Electricité de France, estudiat per Gary i Moreau.

#### 5.3.1 Fórmula de Ryan i Henline.

La fórmula de Ryan i Henline, es comparará amb els mètodes de Peek, tant el llarg com el curt, la fórmula de Ryan i Henline és la següent (Eq. 5.44)

$$P_{corRH} = 4 \cdot f \cdot C \cdot U \cdot (U - U_0) \quad (\text{Eq. 5.44})$$

On  $f$  és la freqüència en Hz de la línia,  $U$  és la tensió de fase a terra en  $kV$  eficaços,  $U_0$  és la tensió crítica disruptiva en  $kV$ ,  $C$  és la capacitància de la línia expressada en  $kF/km$  que es calcula mitjançant (Eq. 5.9), i  $P_{corRH}$  són les pèrdues per efecte corona descrites per Ryan i Henline, expressades en  $kW/km$ .

Per tant les pèrdues corona segons Ryan i Henline, pel mètode llarg, és a dir, amb les tensions crítiques per fase diferents, les quals són trobades a l'apartat (5.2.5), seran:

$$\begin{aligned} P_{corRH1} &= 4 \cdot 50 \cdot 10,07 \cdot 10^{-6} \cdot 230,94 \cdot (230,94 - 233,668) \\ &= -1,26 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{corRH2} &= 4 \cdot 50 \cdot 10,07 \cdot 10^{-6} \cdot 230,94 \cdot (230,94 - 219,389) \\ &= 5,37 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{corRH3} &= 4 \cdot 50 \cdot 10,07 \cdot 10^{-6} \cdot 230,94 \cdot (230,94 - 233,664) \\ &= -1,26 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

On les pèrdues totals pel mètode de Ryan i Henline seran, en *kW/km*:

$$P_{corRHtotal} = -1,26 + 5,37 - 1,26 = 2,83 \text{ kW/km}$$

I les pèrdues totals per aquest mètode en tota la línia són:

$$P_{corRHtotal} = 2,83 \text{ kW/km} \cdot 255 \text{ km} = 723,18 \text{ kW}$$

Es pot veure que segons aquest mètode, obtenim que les fases laterals de la línia no produeixen pèrdues per efecte corona, només la fase central, a causa de què donen pèrdues negatives, en general s'obté un valor de pèrdues global entre els 2 mètodes de Peek, podem dir que no es tant precís com el valor del mètode llarg de Peek, i tampoc té un valor tant petit com el del mètode simplificat de Peek, aquesta variació respecte del mètode llarg de Peek pot ser degut a la constant amb valor 4, que deu fer referència a temes d'unitats, que porta l'expressió (Eq. 5.44), ja que no deu ser del tot exacte com les constants que porta l'equació de Peek (Eq. 5.41), ja que aquesta té en compte la combinació de les càrregues en l'espai amb el factor 25, té en compte el factor corrector de la densitat de l'aire, i de forma explícita té més en compte la geometria i el radi del conductor, ja què el mètode de Ryan i Henline té això en compte a partir de la capacitància, i és una forma més secundària o implícita que la de Peek.

Seguidament es calcula el mètode de Ryan i Henline tenint en compte que la tensió crítica disruptiva és la mateixa per les 3 fases, calculada a partir de (Eq. 5.42) i per calcular les pèrdues per fase es farà servir igualment (Eq. 5.44).

$$\begin{aligned} P_{corRHfase} &= 4 \cdot 50 \cdot 10,07 \cdot 10^{-6} \cdot 230,94 \cdot (230,94 - 237,12) \\ &= -2,87 \text{ kW/km} \end{aligned}$$

Es veu que si es calcula les pèrdues per fase segons Ryan i Henline pel mètode simplificat, es pot veure que per fase tenim unes pèrdues negatives, és a dir, que no es tindran pèrdues pel mètode simplificat amb Ryan i Henline, això es degut com s'ha dit en el càlcul del mètode llarg, per la falta de precisió, de la constant 4, de la falta del factor corrector de l'aire, de la manca de constants o valors explícits referents a la geometria de la línia, a més a més, en aquest mètode curt, igual que en el mètode simplificat de Peek, és la poca precisió del càlcul de la tensió crítica, que apart de considerar-la igual per les 3 fases, no considera les carregues equivalents dels conductors, ni els coeficients de potencial, calculat en el mètode dels gradients a l'apartat (5.2.2) i (5.2.3).

Així que el mètode de Ryan i Henline es poc precís, i amb els resultats obtinguts, el mètode simplificat, es pot donar com erroni, a causa de que pel mètode de Peek i per les relacions (Eq. 5.40) i (Eq. 5.43), es sap que sí existeixen pèrdues per l'efecte corona en aquesta línia.

### 5.3.2 Fórmula de Peterson.

A continuació es posarà en pràctica la fórmula de Peterson expressada a (Eq. 5.45), en el cas del mètode de Peterson, no calcularem mètode simplificat i llarg, ja que la relació amb la tensió crítica disruptiva, ve donada per el factor  $\varphi$ , on es veu que aquest depèn de la tensió característica per fase i la tensió de servei de la línia.

$$P_{corPet} = \frac{20,96 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot U^2}{\left(\log\left(\frac{D}{R}\right)\right)^2} \cdot \varphi \quad (\text{Eq. 5.45})$$

On  $f$  és la freqüència en Hz de la tensió aplicada,  $U$  és la tensió de fase a terra del conductor en kV, eficaces,  $D$  és la separació entre els conductors en cm,  $R$  és el radi del conductor en cm,  $\varphi$  és un factor que depèn de la tensió característica per fase ( $e_d$ ) amb la tensió aplicada i  $P_{corPet}$  són les pèrdues per efecte corona, segons Peterson, en  $kW/km$  i fase.

Primer de tot es busca la tensió característica de la línia ( $e_d$ ), que aquesta depèn de la geometria del conductor, s'utilitzarà l'equació descrita a , què fa referència a conductors de diversos fils, què tenen 12 o mes brins a la capa exterior, ja què el conductor utilitzat es un conductor de 47+7 fils, es pot veure les característiques del conductor a l'apartat (5.1.1) i a la Figura 5-2.

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \cdot \frac{\left[ \log\left(\frac{D}{c \cdot R_h}\right) + (n_h - 1) \cdot \log\left(\frac{D}{R - c \cdot R_h}\right) \right]}{\frac{1}{c \cdot R_h} + \frac{n_h - 1}{2 \cdot (R - c \cdot R_h)}} \quad (\text{Eq. 5.46})$$

On  $R$  és el radi del conductor en cm,  $D$  és la distància entre fases en cm,  $\delta$  és la densitat relativa del aire en  $Kg/m^3$ ,  $e_d$  és la tensió característica de línia per fase, en kV eficaces entre fase i neutre,  $n_h$  és el nombre de fils de la capa exterior del conductor,  $R_h$  és el radi del fil de la capa exterior,  $c$  és un factor què es calcula mitjançant (Eq. 5.47) i el valor de  $m$  s'obté de la Taula 5-5.

$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}} \quad (\text{Eq. 5.47})$$

On el factor  $c$  tindrà un valor segons (Eq. 5.47).

$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{24}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{24}} = 0,98$$

$n_h$  té un valor de 24 segons la Figura 5-2 Conductor de 54+7 fils, d'alumini i acer galvanitzat.

Ara ja es pot procedir al càlcul de la tensió característica de la línia segons (Eq. 5.46).

$$e_d = 48,6 \cdot 0,75 \cdot 0,9863^{2/3} \cdot \frac{\left[ \log\left(\frac{1000}{0,9825 \cdot 0,282}\right) + (24 - 1) \cdot \log\left(\frac{1000}{1,269 - 0,9825 \cdot 0,282}\right) \right]}{\frac{1}{0,9825 \cdot 0,282} + \frac{24 - 1}{2 \cdot (1,269 - 0,9825 \cdot 0,282)}}$$

$$= 172,56 \text{ kV}$$

$m$  té un valor de 0,75 segons Taula 5-5, per conductors bruts,  $\delta$  es calcula mitjançant (Eq. 5.36),  $R_h$  ve donat per les característiques del conductor a l'apartat (5.1.1), al igual que  $D$  que és la distància entre les fases en cm.

<b>m</b>	<b>Condicions</b>
0.87 – 0.90	Per condicions normals
0.67 – 0.74	Per conductors bruts
0.912 – 0.93	Per conductors rentats amb dissolvents
0.885	Per conductors raspats amb filferro
1	Polit
0.72 – 0.75	Conductors bruts en pols.
0.945	Després de 5 mesos exposats a l'acció atmosfèrica.
0.92	Sotmès a l'acció atmosfèrica, humitat baixa de dia.
0.78	Sotmès a l'acció atmosfèrica, humitat baixa de nit.

Taula 5-5 Valors de  $m$  per diferents casos



Ara sabem que la relació entre la tensió característica de la línia i la tensió de servei es la següent (Eq. 5.48).

$$\frac{V}{e_d} = \frac{230,94}{172,56} = 1,33 \quad (\text{Eq. 5.48})$$

Tal i com es va descriure en el capítol anterior, un cop es sap aquesta relació de tensions, es busca el valor del factor  $\varphi$  a la Figura 5-5 i a la Taula 5-6 Relació entre  $\varphi$  i  $V/e_d$

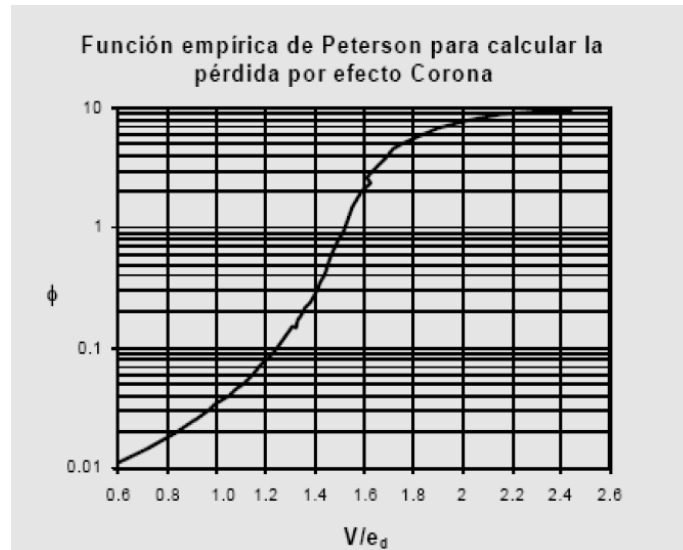


Figura 5-5 Funció de Peterson per relacions  $V/e_d$  entre 0,6 i 2,4.

$V/e_d$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5
$\varphi$	0.011	0.014	0.018	0.025	0.036	0.053	0.085	0.150	0.950

Taula 5-6 Relació entre  $\varphi$  i  $V/e_d$

S'obté un valor de  $\varphi$  al voltant de 0,15. Així que ara ja es pot calcular les pèrdues per efecte corona segons Peterson i s'obté segons (Eq. 5.45).

$$P_{corPet} = \frac{20,96 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 230,94^2}{\left(\log\left(\frac{1000}{1,269}\right)\right)^2} \cdot 0,15 = 0,99 \text{ kW/km}$$

Per tant les pèrdues per les 3 fases són

$$P_{corPet \text{ totals}} = 0,99 \text{ kW/km} \cdot 3 = 2,997 \text{ kW/km}$$

I les pèrdues per tota la línia segons Peterson.

$$P_{corPet \text{ línia}} = 2,997 \text{ kW/km} \cdot 255 \text{ km} = 764,45 \text{ kW}$$

Es veu que les pèrdues pel mètode de Peterson són semblants als resultats obtinguts pel mètode llarg de Ryan i Henline, i què està entre els resultats dels mètodes simplificat i llarg de Peek.

La particularitat d'aquest mètode és que té en compte una relació molt característica entre la tensió característica de la línia, que aquesta fa referència al tipus de conductor que fem servir, cosa que els altres mètodes no fan servir, ni tenen en compte si el conductor es llis, o està format per fils o de un altre tipus, també cal dir que al trobar la relació de tensions, per trobar el factor  $\varphi$ , pot portar a un cert error, mínim comès, que ens pot explicar la diferencia amb el mètode de Peek llarg, i que tampoc té en compte la tensió crítica disruptiva, què és de molta importància en l'aparició tant de l'efecte com en el càlcul de les pèrdues, així què el mètode de Peterson és important tenir-lo en compte ja que encara que no arribi a ser tant precís com el mètode de Peek, té algunes característiques que són importants, com el tipus de conductor que fem servir.

### 5.3.3 Mètode d'Electricité de France (EDF).

Aquest mètode com es diu al capítol anterior (3), es va estudiar específicament per conductors en feix, primer es calcularà el mètode per bon temps i després per mal temps.

El mètode pel bon temps està expressat mitjançant (Eq. 5.49).

$$P_{CorEDFbt} = P_0 \cdot r_0^{1.8} \cdot (n + 6)^2 \cdot \frac{f}{50} \quad (\text{Eq. 5.49})$$

On  $f$  és la freqüència de la tensió en Hz,  $r_0$  és el radi del subconductor en cm,  $n$  és el numero de subconductors,  $P_0$  és un factor de pèrdua de potència que s'obté de la Figura 5-6, considerant el gradient relatiu com relació entre el gradient màxim del feix (Eq. 5.34) però entre  $\sqrt{2}$  ja que la relació es calcula en valors eficaços, i el gradient elèctric crític del subconductor (Eq. 5.35) on aquest factor es trobarà a la Figura 5-6 i  $P_{CorEDFbt}$  són les pèrdues per efecte corona pel mètode d'Electricité de France per bon temps, en  $kW/km$  i fase.

El gradient relatiu serà, segons (Eq. 5.50).

$$E_{relatiu} = \frac{E_{max}}{E_c} = \frac{19,79}{24} = 0,82 \quad (\text{Eq. 5.50})$$

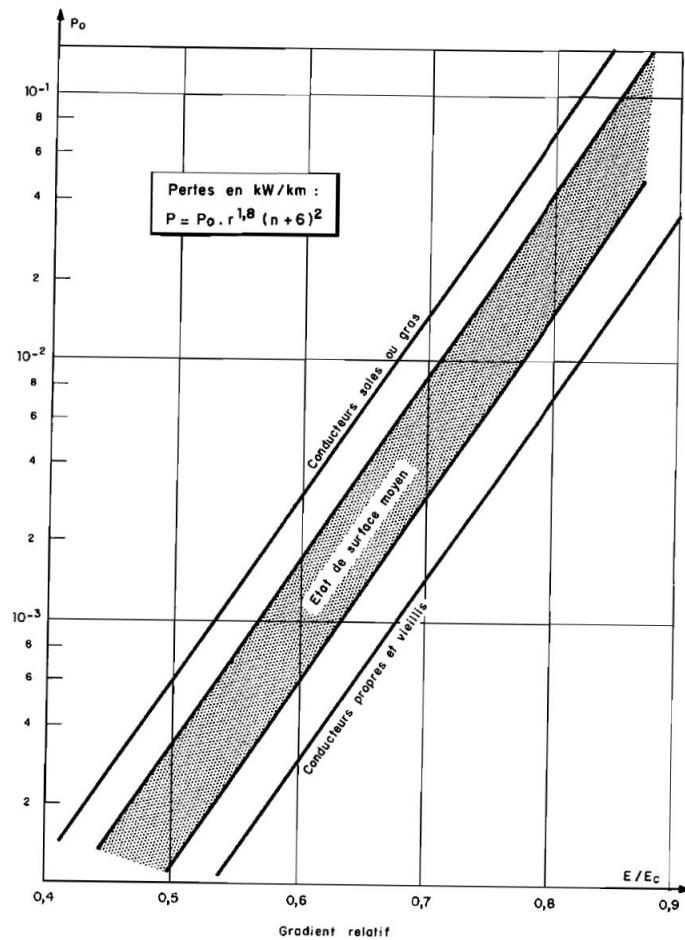


Figura 5-6 Gràfic que relaciona el gradient relatiu amb es pèrdues  $P_0$  per conductors secs.

Si es mira la Figura 5-6 i el gradient relatiu obtingut a (Eq. 5.50), s'obté aproximadament, un factor  $P_0$  de:

$$P_0 = 0,025$$

Per tant les pèrdues per efecte corona, per fase, pel mètode d'Electricité de France segons (Eq. 5.49), són:

$$P_{corEDFbt} = 0,025 \cdot 1,269^{1,8} \cdot (2 + 6)^2 \cdot \frac{50}{50} = 2,45 \text{ kW/km}$$

Les pèrdues totals pel mètode d'Electricité de France, de bon temps són:

$$P_{corEDFbttotal} = 2,45 \text{ kW/km} \cdot 3 = 7,37 \text{ kW/km}$$

I les pèrdues de la línia per aquest mètode són:

$$P_{corEDFbtlínia} = 7,37 \text{ kW/km} \cdot 255 \text{ km} = 1879,37 \text{ kW}$$

El mètode d'EDF per bon temps, es veu que dona un resultat de pèrdues més elevat, ja que dona un valor de més de  $2 \text{ kW/km}$ , que les pèrdues calculades per el mètode de Peek llarg, l'únic factor que es pot canviar aquesta variació en el resultat es el factor  $P_0$ , ja que els demes factors o variables de l'equació (Eq. 5.49), són, el radi, la freqüència i el número de conductors del feix, que són variables que son fixes, i que són donades per la pròpia línia, i el factor  $P_0$ , es més experimental, ja que relaciona els 2 gradients donats a la relació (Eq. 5.50), i pot ser un valor poc exacte i que varia molt, depèn de la precisió en la que s'agafi, en el nostre càlcul s'ha considerat un valor de 0,025, si s'hagués agafat 0,03, el valor de les pèrdues totals hagués sigut de  $8,84 \text{ kW/km}$ , per tant la precisió del resultat depèn de el factor  $P_0$ .

Ara farem el càlcul del mètode d'EDF, però per mal temps, en el que aquest, per norma general ha de ser d'un valor més elevat que el del mètode de bon temps.

El càlcul de les pèrdues per efecte corona pel mètode d'EDF per mal temps es calcula mitjançant (Eq. 5.51).

$$P_{corEDFmt} = k \cdot P_e \quad (\text{Eq. 5.51})$$

On  $P_{corEDFmt}$  són les pèrdues per efecte corona per mal temps en  $\text{kW/km}$  i fase, segons el mètode d'EDF,  $k$  és el factor que depèn de les característiques geomètriques de la línia i ve donat per (Eq. 5.52).

$$k = \frac{f}{50} \cdot (n \cdot r \cdot \beta)^2 \cdot \frac{\log_{10} \left( \frac{R_0}{R_c} \right) \cdot \log_{10} \left( \frac{\rho}{R_c} \right)}{\log_{10} \left( \frac{R_0}{\rho} \right)} \quad (\text{Eq. 5.52})$$

La  $f$  és la freqüència de la tensió en Hz,  $r$  és el radi del subconductor en cm,  $R_c$  és el radi equivalent del conductor múltiple en cm,  $R_0$  és el radi del conductor a potencial zero de la línia coaxial equivalent en cm i es calcula amb (Eq. 5.54) i el radi  $R_c$  s'ha calculat a través de la Figura 5-7, on s'expressa a (Eq. 5.53)

$$R_c = \frac{25 + 2,53}{2} = 13,76 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 5.53})$$

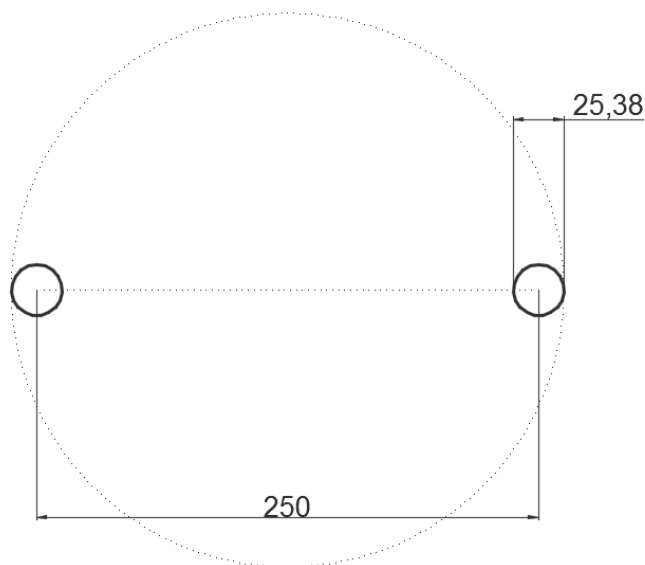


Figura 5-7 Detall del feix de la línia, distàncies en mm.

$$R_0 = R_c \cdot \text{antilog} \left( \frac{0,02412}{C_s \cdot 10^6} \right) = 13,76 \cdot \text{antilog} \left( \frac{0,02412}{10,07 \cdot 10^{-3}} \right) = 3418,62 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 5.54})$$

On  $C_s$  és la capacítància de servei del conductor (Eq. 5.9),  $\rho$  és el radi mig d'emigració de la càrrega espacial en cm, i expressat en (Eq. 5.55).

$$\rho = 25 \cdot \sqrt{n \cdot r} = 25 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,269} = 39,82 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 5.55})$$

I el factor  $\beta$  es calcula amb (Eq. 5.56)

$$\beta = 1 + \frac{0.301}{\sqrt{r}} = 1 + \frac{0.301}{\sqrt{1,269}} = 1,267 \quad (\text{Eq. 5.56})$$

Per tant el valor de k, segons (Eq. 5.52) i els valors de les variables de les què depèn i s'han calculat és:

$$k = \frac{50}{50} \cdot (2 \cdot 1,269 \cdot 1,267)^2 \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{3418,62}{13,76}\right) \cdot \log_{10}\left(\frac{39,82}{13,76}\right)}{\log_{10}\left(\frac{3418,62}{39,82}\right)} = 5,91$$

Ara nomes falta calcular el factor  $P_e$ , què és la pèrdua específica corona en kW/km/fase, què depèn del camp elèctric relatiu E i de l'estat de la superfície dels conductors m, que això s'obté de les taules i gràfics que es mostren a continuació, considerant el gradient relatiu com la raó entre el gradient mig i el camp elèctric de Peek  $E/E_c$ , E gradient superficial mig dels conductors, en el cas de conductors múltiples del conductor fictici de radi  $R_c$ , en kV/cm,  $E_c$  el gradient crític del conductor determinat amb la fórmula de Peek corregida per considerar l'efecte de variació de densitat del aire.

El factor m, per un mateix valor d'intensitat de pluja pot variar entre el 20% i el 30%, depenent del grau d'envelliment del conductor. Aquesta variació pot traduir-se perfectament en una variació de fins al 100% en les pèrdues específiques  $P_e$ , amb baixes intensitats de pluja i baix camp elèctric, per trobar el valor de  $P_e$  es fa servir els següents elements, Figura 5-8, Figura 5-9, Taula 5-7 i Taula 5-8.

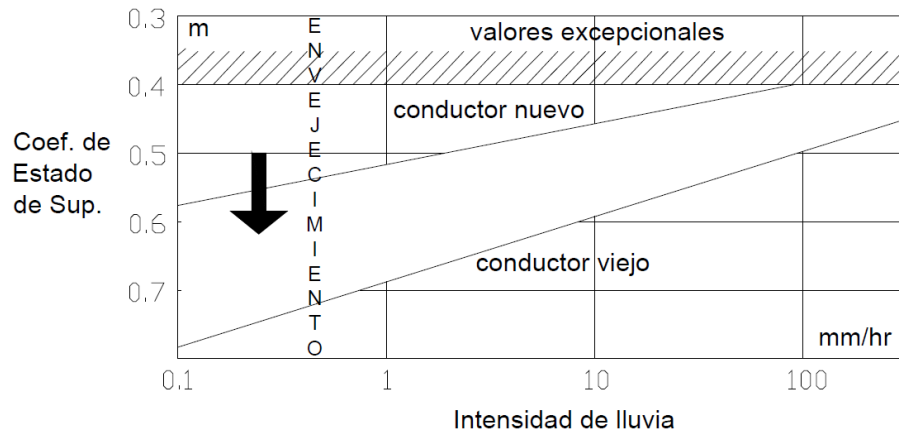


Figura 5-8 Determinació del factor m.

Intensitat de pluja	0.1	1.0	10	100	mm/h
Pitjors valors observats	0.40	..	..	0.40	
Conductors nous	0.58	0.54	0.46	0.40	
Conductors envellits	0.76	0.67	0.58	0.49	

Taula 5-7 Determinació del factor m.

Pel trobar el factor m, es prediu que tindrem una intensitat de pluja de 10 mm/h, i es tenen conductors envellits, s'utilitza la Taula 5-7, per tant tenim un factor m de 0,58.

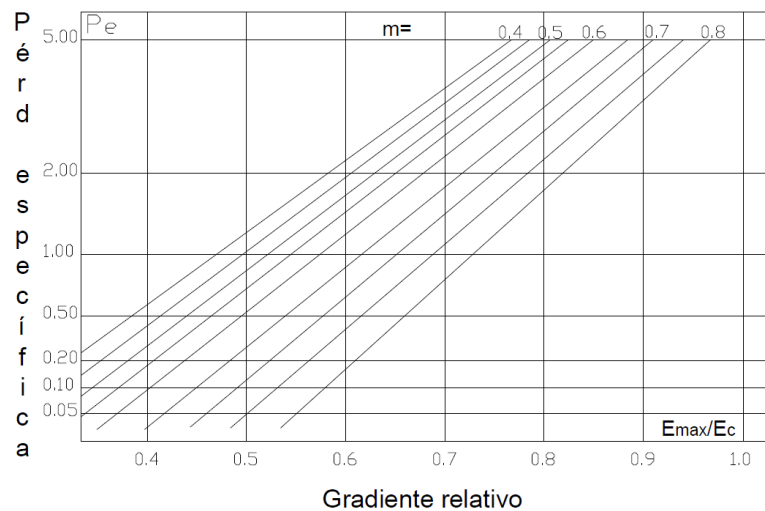


Figura 5-9 Pèrdues específiques per efecte corona en kW/km i fase.



<b>Factor m</b>	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
<b>Gradient relatiu</b>						
0.4	0.6	0.3	0.1			
0.6	2.2	1.7	1.2	0.7	0.18	
0.8	6.0	4.9	4.0	3	1.8	0.5

Taula 5-8 Pèrdues específiques per efecte corona en kW/km i fase.

I per trobar les pèrdues específiques, un cop sabem que  $m$  és 0,58 i el gradient relatiu és de 0,52, tal i com es troba a (Eq. 5.50), després interpolem per trobar el valor segons la Taula 5-8, i tenim que el factor  $P_e$  és aproximadament:

$$P_e = 4,20$$

Per tant les pèrdues per efecte corona pel mètode d'EDF per mal temps són, segons (Eq. 5.51).

$$P_{corEDFmt} = 5,91 \cdot 4,20 = 24,82 \text{ kW/km}$$

Les pèrdues totals, són:

$$P_{corEDFmttotal} = 24,82 \text{ kW/km} \cdot 3 = 74,47 \text{ kW/km}$$

I les pèrdues totals de la línia per efecte corona, segons el mètode d'EDF per mal temps són:

$$P_{corEDFmtlínia} = 74,47 \text{ kW/km} \cdot 255 \text{ km} = 18991,10 \text{ kW}$$

Es veu que el resultat de les pèrdues per efecte corona pel mètode d'EDF per mal temps, dona un resultat més elevat que les pèrdues per aquest mateix mètode per bon temps, això ja es normal, el que passa que és un valor de pèrdues massa elevat, ja que  $74,47 \text{ kW/km}$  són unes pèrdues massa exagerades, això es degut, a que si es mira l'estructura de l'expressió (Eq. 5.51), el que fa que pugui elevar el valor del resultat de pèrdues, per banda de la constant  $k$  de l'expressió (Eq. 5.52), si augmentem el  $R_c$ , és a dir, el radi del conductor múltiple, el valor de  $k$  disminueix, però si es toca  $R_c$ , indirectament canvia  $R_0$ , ja que a l'expressió (Eq. 5.54) veiem

que una va relacionada amb l'altre, així que per el factor de  $k$  aquest podrien ser els coeficients que varien molt el seu valor de  $k$ .

Per altra banda esta el factor  $P_e$ , el qual es troba de manera molt empírica i experimental, segons les taules i figures corresponents, per tant pot haver un cert error a l'hora de trobar-lo, ja que el factor  $m$ , s'ha considerat que tenim unes precipitacions de 10 mm/h, que fa referència a un pluja mitjanament forta, si considerem poca pluja, el factor  $m$  serà més gran i com el gradient relatiu es el que té, segons els gradients obtinguts, la variació del resultat per la part del factor  $P_e$ , està en la intensitat de pluja en mm/h, del factor  $m$  trobat, i a partir d'aquí obtenim el valor, així que com a conclusió del mètode d'EDF de mal temps, el que varia el resultat, tant imprecís obtingut, és els radis  $R_c$ , i  $R_0$ , els quals varien el factor  $k$  de l'expressió (Eq. 5.52) i la intensitat de pluja i el factor  $m$ , referent a  $P_e$ , de l'expressió (Eq. 5.51).

#### **5.4 Discussió dels resultats obtinguts.**

Després d'obtenir els resultats de les pèrdues, pels diferents mètodes exposats als apartats (5.2.5), (5.3.1), (5.3.2), (5.3.3) i de les conclusions obtingudes en els apartats, és pot dir, que el mètode més fiable és el de Peek llarg, considerant les tensions crítiques diferents per cada fase.

Agafant aquest mètode com el de referència, segons la Taula 5-9, veiem que els 2 mètodes que s'apropen més al de Peek llarg són el de Ryan i Henline llarg, encara que les fases exteriors de la línia no donin pèrdues, i el de Peterson. Els 2 mètodes d'EDF s'allunyen molt del de Peek, sobretot el de mal temps, on en l'apartat corresponen (5.3.3), ja s'han argumentat les raons del per què d'aquest resultat. El mètode de Peek simplificat, dona tant poc a causa de considerar les tensions crítiques iguals, i de desconsiderar els camps elèctrics, juntament amb la matriu de coeficients de potencials, i el mètode de Ryan i Henline simplificat, ni tan sols dona pèrdues, en cap fase.

Així que el mètode més exacte i que més exactitud, per la construcció de la seva expressió, es el mètode de Peek llarg.

---

<b>Mètode de Peek (llarg)</b>	<i>5,0493 kW/km</i>
<b>Mètode de Peek (simplificat)</b>	<i>0,5010 kW/km</i>
<b>Mètode de Ryan i Henline (llarg)</b>	<i>2,836 kW/km</i>
<b>Mètode de Ryan i Henline (simplificat)</b>	-
<b>Mètode de Peterson</b>	<i>2,997 kW/km</i>
<b>Mètode d'Electricité de France (bon temps)</b>	<i>7,37 kW/km</i>
<b>Mètode d'Electricité de France (mal temps)</b>	<i>74,47 kW/km</i>

**Taula 5-9 Resultats de pèrdues per efecte corona pels diferents mètodes.**

## **6. Estudi de l'efecte corona al laboratori.**

### **6.1 Introducció.**

En aquest capítol es veu, es compara i s'estudia, els resultats obtinguts amb els diferents assaigs realitzats al laboratori, amb dades de càlcul real, ja sigui mitjançant pel software realitzat en el capítol 8, o amb les diferents fórmules de càlcul.

En total es realitzen 7 assaigs, cada un d'ells està descrit en l'apartat (6.3). Un assaig és només per veure l'efecte visual i els altres són de presa de dades, per realitzar els càlculs pertinents.

### **6.2 Característiques de la instal·lació.**

En aquest apartat, es veurà l'esquema elèctric de la instal·lació en la què s'han realitzat els assaigs, així com el material utilitzat i les seves característiques, i els plànols per veure tots els detalls de la bancada utilitzada.

#### **6.2.1 Esquema elèctric.**

L'esquema elèctric que s'ha realitzat per posar en marxa l'assaig són els següents:

Esquema visual (Figura 6-1).

Esquema amb simbologia segons la normativa UNE<sup>1</sup> (Figura 6-2).

A l'esquema visual, es pot veure una petita representació del muntatge del laboratori amb els elements utilitzats, amb les seves fotografies, i a l'esquema amb simbologia, es té una representació més tècnica del muntatge realitzat, amb la nomenclatura adequada.

---

<sup>1</sup> UNE fa referència a una norma espanyola, creada per la associació AENOR, que es la asociación española de normalización y certificación.

**LABORATORI D'ALTA TENSIO**



Departament d'Enginyeria Elèctrica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

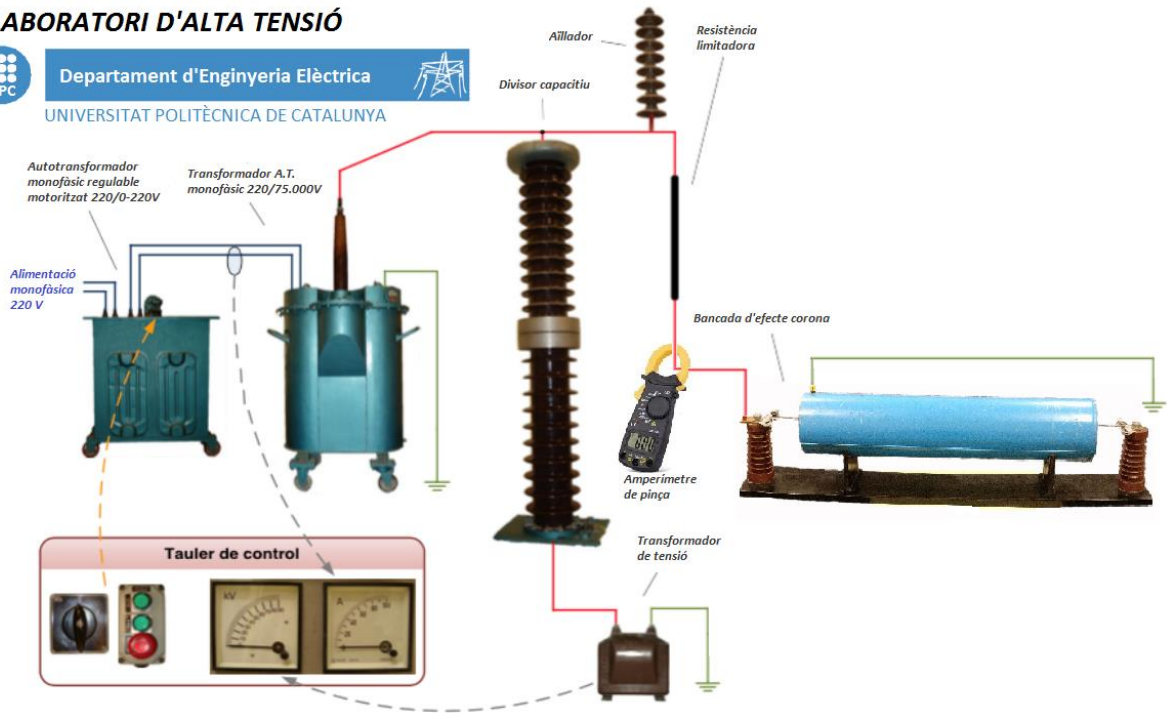


Figura 6-1 Esquema elèctric visual.

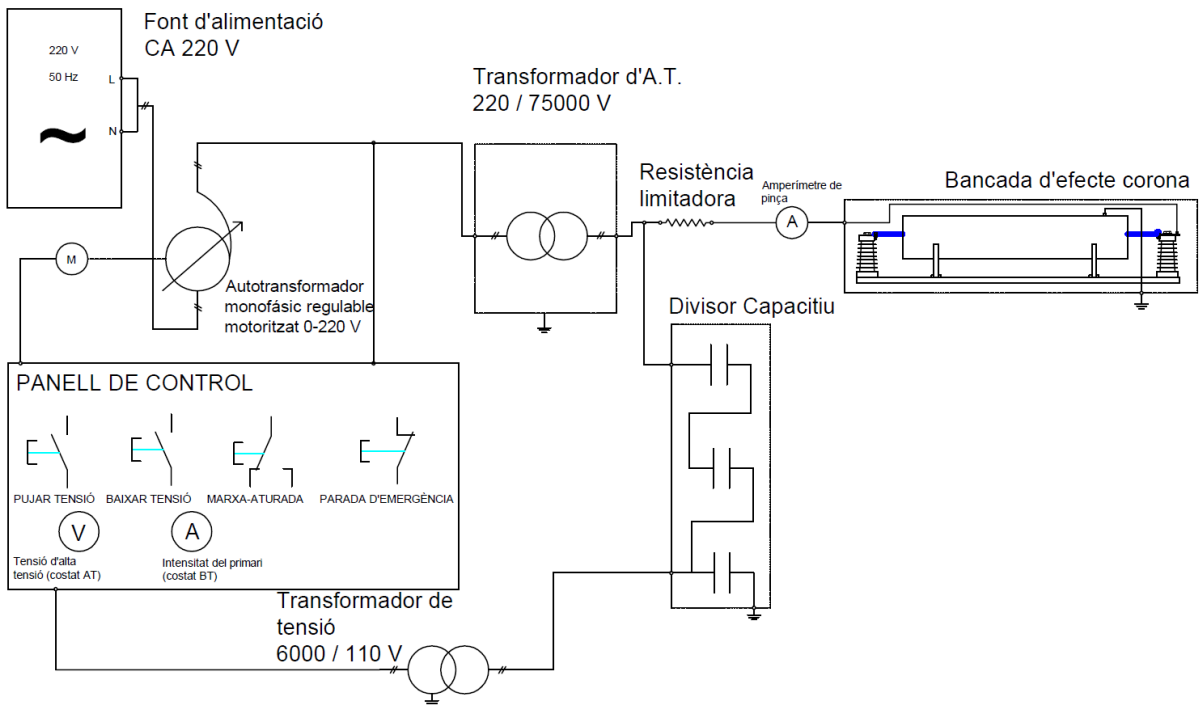


Figura 6-2 Esquema elèctric amb símbols, segons UNE.

### 6.2.2 Material utilitzat i característiques.

El material utilitzat per fer els assaigs són els següents, els quals es poden veure representats als esquemes elèctrics, (Figura 6-1) i (Figura 6-2).

#### - Autotransformador monofàsic regulable motoritzat de 0 – 220 V.

El autotransformador monofàsic regulable motoritzat, fa la funció de que es pugui regular la tensió que volem per l'assaig, d'una forma segura i més econòmica que amb un transformador d'alta tensió regulable, ja que un transformador d'alta tensió és molt més car, i en el panell de control que s'ha fet servir arribarien tensions molt altes i seria perillós treballar amb aquests rangs de tensió.

El autotransformador que s'ha utilitzat en el laboratori funciona mitjançant un debanat que ens permet regular la tensió des de 0 fins a 220 V.

El autotransformador utilitzat és el de la Figura 6-3.

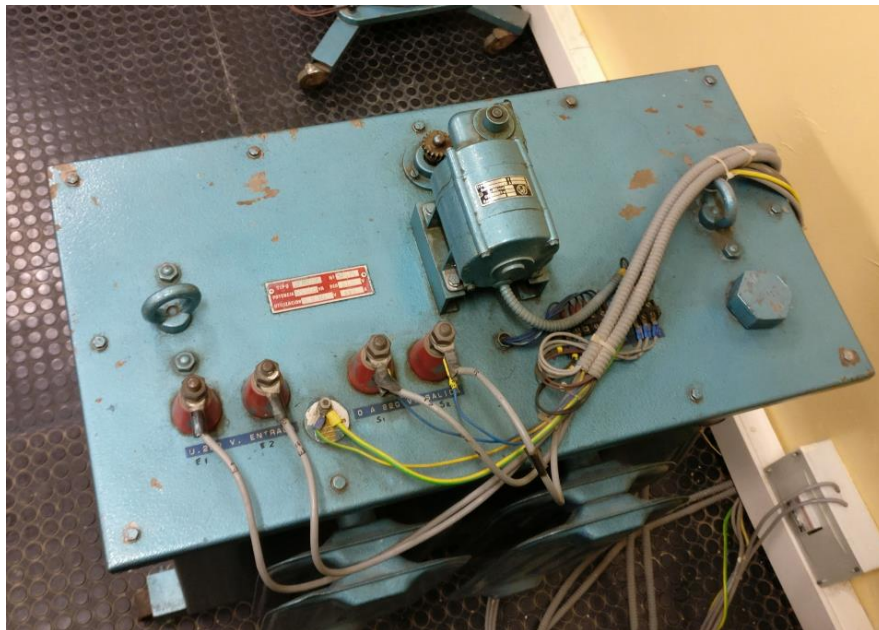


Figura 6-3 Autotransformador monofàsic regulable motoritzat.

I les seves característiques venen donades a la Figura 6-4 i Taula 6-1, on es té la placa de característiques del autotransformador, i a la Figura 6-5 i Taula 6-2, on es té la placa de característiques del motor que regula el autotransformador.



Figura 6-4 Placa de característiques del autotransformador monofàsic regulable motoritzat.



Figura 6-5 Placa de característiques del motor del autotransformador monofàsic regulable motoritzat.

<b>TIPO</b>	C2ARC25	<b>Nº</b>	11074
<b>POTENCIA</b>	25000 VA	<b>RED</b>	220 V
<b>UTILIZACION</b>	0 – 250 V	112 A	

Taula 6-1 Placa de característiques del autotransformador monofàsic regulable motoritzat.

<b>TIPO</b>	RTT-2721	<b>Tension (V)</b>	220 / 380
<b>Ref</b>	.PB45085	<b>Corriente (A)</b>	0.22 / 0.12
<b>Hz</b>	50	<b>Kw</b>	0038
<b>CV</b>	1,20	<b>Rpm</b>	20

Taula 6-2 Placa de característiques del motor del autotransformador monofàsic regulable motoritzat.

- **Transformador monofàsic d'alta tensió de 220 / 75000 V.**

Aquest transformador monofàsic, és un elevador de tensió, en el què entra pel debanat primari 220 V i en el debanat secundari surten 75.000 V, és a dir, es un transformador d'alta tensió, la qual és la tensió necessària per realitzar el nostre assaig.

La relació de transformació d'aquest transformador ve donat per (Eq. 6.1).

$$rt = \frac{75000}{220} = 340,90 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

El transformador d'alta tensió utilitzat és el de la Figura 6-6.



Figura 6-6 Transformador d'alta tensió de 220 / 75000 V.



On les seves característiques venen donades per Figura 6-7 i Taula 6-3.



Figura 6-7 Placa de característiques del Transformador d'alta tensió.

<b>TIPO</b>	SEOP 20 / 45	<b>N°</b>	70852	<b>Año</b>	1971
<b>Potencia nominal KVA</b>			*	<b>Frecuen Hz</b>	50
<b>Tension Nominal Voltios</b>	<b>I</b>	75000	220	<b>Servicio</b>	P
	<b>II</b>	37500	220	<b>Grup conex.</b>	E
	<b>III</b>	-	-	<b>Serie</b>	45
	<b>IV</b>	-	-	<b>Refrig</b>	N/A
	<b>V</b>	-	-	<b>Pes. Total kg</b>	585
<b>Inten. Nom A</b>		*	455	<b>Pes. Aceite kg</b>	220
<b>Tensión de c/c %</b>		-	-		
<b>Tipo de proteccion</b>		-	-		
* 20 KVA – 75000 V = 0,267 A * 10 KVA – 37500 V = 0,267 A					

Taula 6-3 Placa de característiques del transformador d'alta tensió.

- **Divisor capacitiu.**

Un divisor capacitiu consisteix en un conjunt de condensadors, connectats en sèrie, fets de material dielèctric compost, a l'interior del aïllador de porcellana aïllant, es troba una membrana metàl·lica elàstica, el què fa és dividir la tensió en els condensadors que hi hagi en el divisor capacitiu, i mesurar-la al transformador de tensió, col·locat a sota del divisor capacitiu, què és un transformador de mesura.

El divisor capacitiu que es fa servir és el de la Figura 6-8.

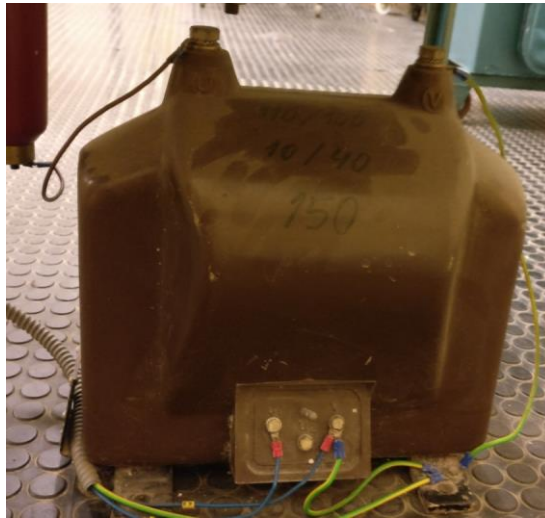


**Figura 6-8 Divisor capacitiu.**

- **Transformador de tensió.**

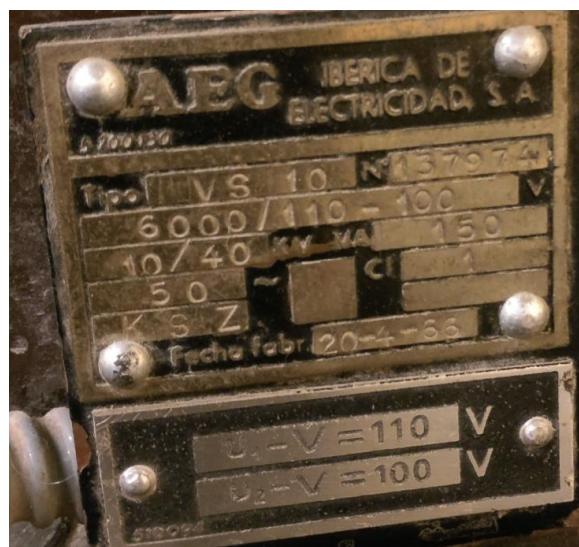
El transformador de tensió, serveix com un element de mesura, està format per un nucli magnètic i tenen un debanat secundari, en nostre cas, que és un monofàsic què està posat a terra, disposa d'un debanat de tensió residual addicional apart del debanat secundari, què és el de mesura.

El transformador de tensió que s'ha fet servir és el de la Figura 6-9.



**Figura 6-9 Transformador de Tensió.**

Les seves característiques son les donades en la Figura 6-10



**Figura 6-10 Placa de característiques del Transformador de Tensió.**

<b>TIPO</b>	VS 10	<b>Nº</b>	137974
6000/110 -100			
10 / 40 <b>kV</b>		<b>VA 150</b>	
50	~	<b>CI</b>	1
<b>KSZ</b>		<b>Fecha fabr.</b>	20-4-66

**Taula 6-4 Placa de característiques del transformador de Tensió.**

- **Resistència limitadora.**

La resistència limitadora té la funció d'evitar ones de corrent i tensió massa altes, fa la funció d'auto vàlvula, el seu valor és variable segons les condicions del ambient, així que s'ha de mesurar cada cop que es fa un assaig. En la mesura realitzada al laboratori, a donat un valor de  $4,9 \text{ M}\Omega^2$ , la resistència va penjada d'un aïllador, el qual fa la funció d'evitar que l'alta tensió vagi cap amunt, i així el corrent vagi pel camí més fàcil que es trobi.

La resistència que s'ha fet servir és la de la Figura 6-11.



**Figura 6-11 Resistència limitadora.**

---

<sup>2</sup> Mega ohms,  $10^6$  ohms.

- **Bancada d'efecte corona.**

La bancada d'efecte corona, està formada per 2 aïlladors de 20 kV i una fusta com a base, per un aïllador s'alimenta amb la sortida de la resistència limitadora, la tensió va des de l'aïllador amb un connector de tipus banana, fins el suport metàl·lic, on podem muntar diferents configuracions de conductors, fins a l'altre aïllador.

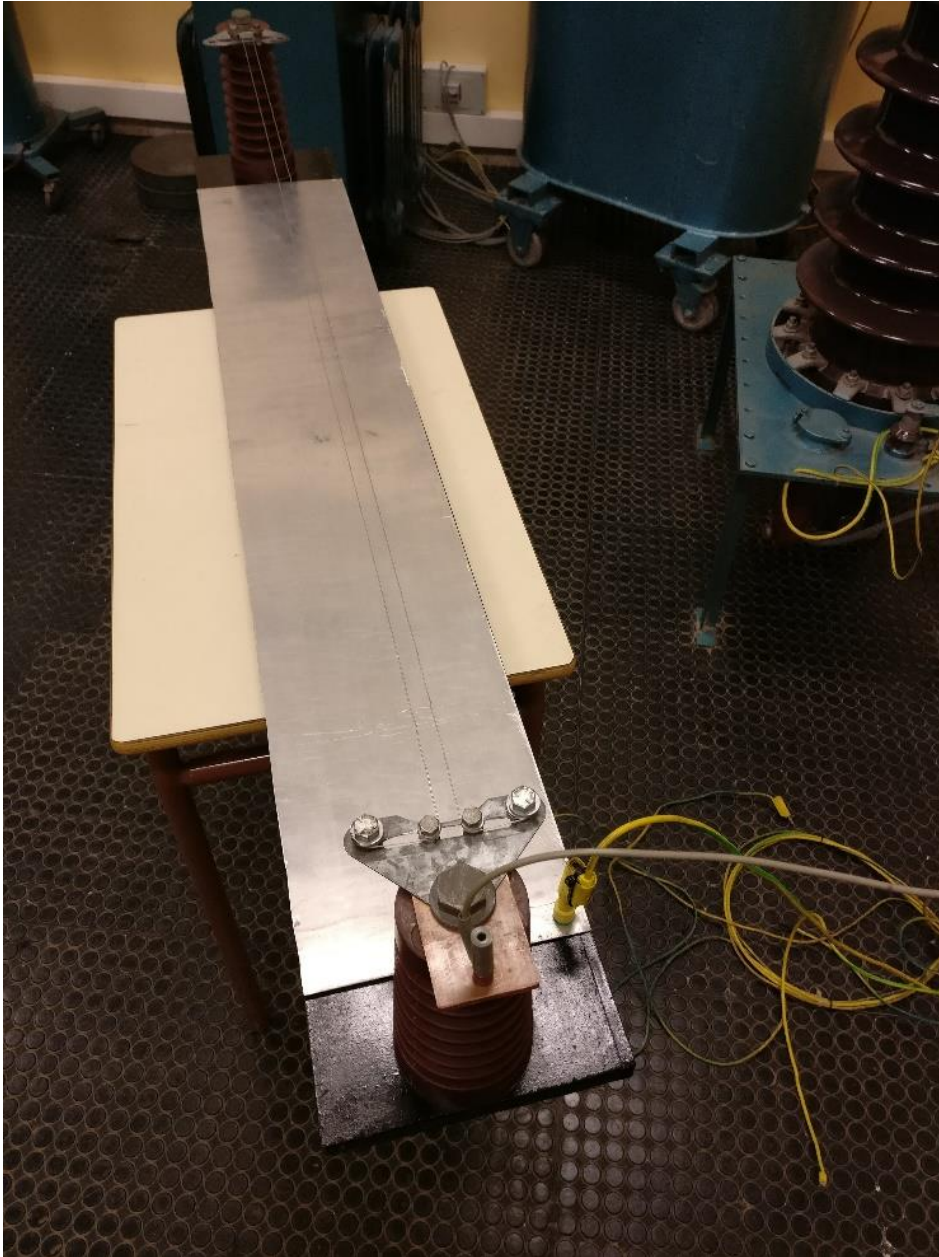
Originalment es té un tub metàl·lic per poder veure amb més detall l'efecte corona visual, amb el seu connector de terra. Per fer la bancada més adequada amb el projecte, es va aconseguir una planxa que simula el terra d'una línia aèria d'alta tensió, per que el tub que envolta el conductor, simula més una línia subterrània que no una aèria.

La bancada que es va utilitzar està representada a la Figura 6-12, amb tub.



**Figura 6-12 Bancada d'efecte corona amb tub.**

I sense tub, és a dir amb el pla de terra metàl·lic, està representada a la Figura 6-13.



**Figura 6-13 Bancada d'efecte corona amb el pla de terra.**

- **Amperímetre de pinça.**

L'amperímetre de pinça es col·loca a la sortida de la resistència limitadora, el qual pren la mesura en sèrie, tal i com s'ha de mesurar sempre la intensitat, i així no s'ha d'obrir el circuit per mesurar-la.

Aquest amperímetre està format per una pinça, la qual pel mig fem passar el conductor el qual es vol mesurar la intensitat circulant, i ho fa a partir del camp magnètic, què genera aquesta intensitat, la pinça consta d'un sensor el qual permet mesurar la intensitat.

S'ha fet servir un amperímetre de pinça com el de la Figura 6-14, per mesurar la corrent de pèrdues.



**Figura 6-14 Amperímetre de Pinça.**

- **Taula de control.**

La taula de control es des d'on es controlarà la tensió del autotransformador monofàsic regulable, el taulell consta d'un comandament amb 3 polsadors, pujar tensió, baixar tensió i aturada d'emergència, també consta d'un interruptor de marxa-aturada del panell, i de 2 voltímetres i 2 amperímetres, els quals només utilitzem el voltímetre del costat d'alta tensió, el mesurat al transformador de tensió, i el amperímetre del primari, és a dir de baixa tensió, de l'entrada del transformador.

Es veu el panell que s'ha utilitzat per controlar la tensió als assaigs, representat a la Figura 6-15.



**Figura 6-15 Panell de control.**



### 6.2.3 Plànols.

Els plànols es poden veure a l'**Annex I**. S'han realitzat els plànols de la bancada, per l'assaig per veure l'efecte corona visual, amb el tub (Figura 6-16), i per la bancada dels assaigs de prendre dades, és a dir, amb la placa de terra (Figura 6-17).

A continuació es veu una previsualització de les dues bancades.

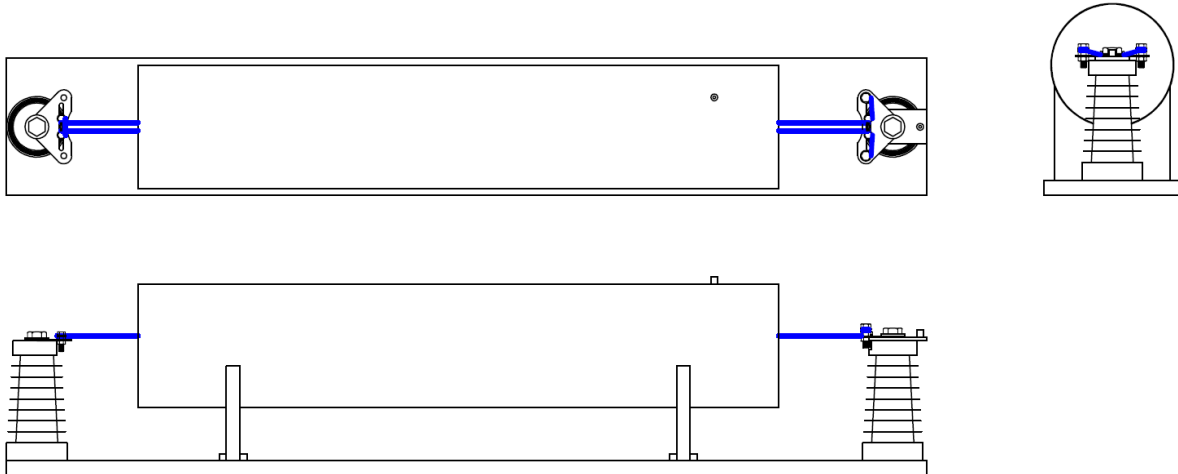


Figura 6-16 Alçat, planta i perfil de la bancada d'efecte corona amb el tub.

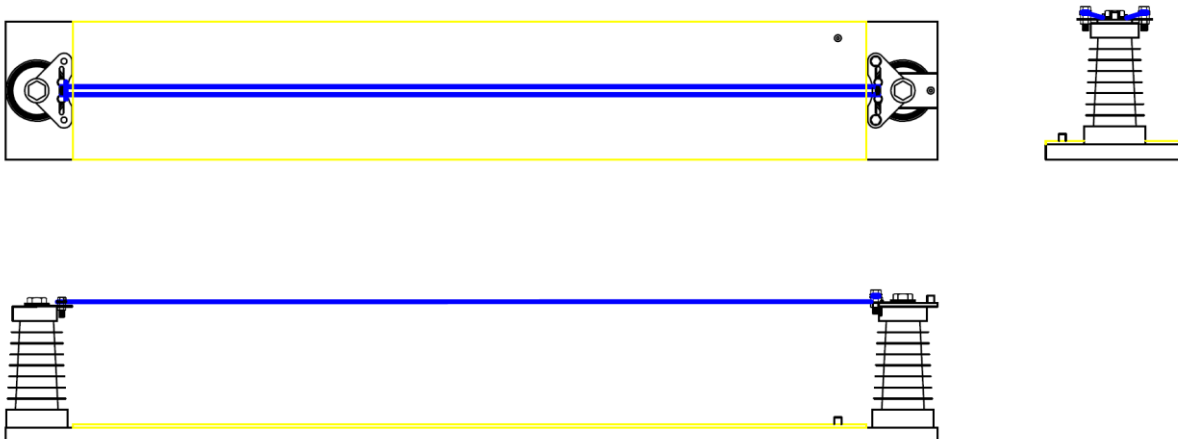


Figura 6-17 Alçat, planta i perfil de la bancada d'efecte corona amb el pla de terra.

### 6.3 Assaigs realitzats.

En aquest apartat es veu els assaigs realitzats per tal d'obtenir, tant l'efecte corona visual, com les dades necessàries per tal de comparares amb altres i obtenir diferents relacions.

El primer assaig es fa per visualitzar l'efecte corona (6.3.1), i és l'únic assaig que hem fet servir el tub com a terra per tancar el circuit, Figura 6-12.

En els assaigs següents es fa servir la bancada amb el pla de terra, Figura 6-13, i obtindrem les dades de tensió d'alta, intensitat en el costat de baixa tensió (primari), intensitat d'alta tensió (secundari), i la potència de pèrdues, què és la tensió d'alta per la intensitat d'alta tensió, és a dir tot del debanat secundari.

#### 6.3.1 Assaig per veure l'efecte visual.

Com s'ha dit anteriorment, en el present apartat, es fa l'assaig per veure l'efecte corona visual, on es va assajar la bancada, amb un sol conductor, amb un diàmetre de 1,5 mm, Figura 6-18 i Figura 6-21.

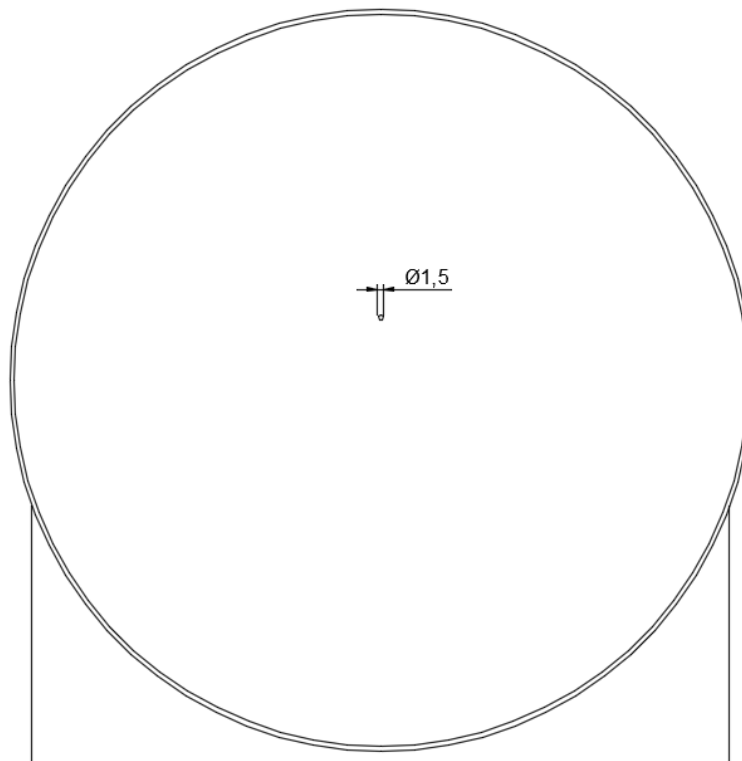
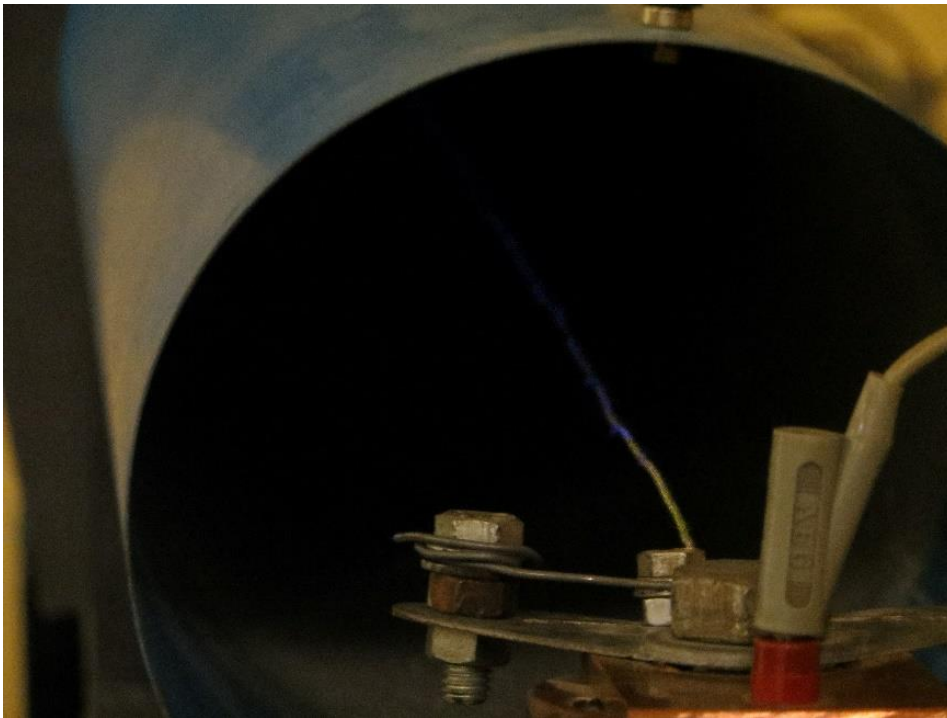


Figura 6-18 Configuració de conductors per l'assaig de l'efecte corona visual, distància en mm.

En aquest assaig es va procedir a la connexió del muntatge realitzat en l'apartat 6.2.1, després es va donar tensió fins que es va poder veure l'efecte corona visual, primer de tot sobre els 15 kV es va començar a percebre el soroll audible, i cada cop amb més intensitat de soroll a mesura que es pujava la tensió, fins que al voltant del 25 kV ja es va començar a percebre l'efecte visual, i es va realitzar la foto següent, encara que s'aprecia poc, a la Figura 6-19, al voltant dels 28 kV

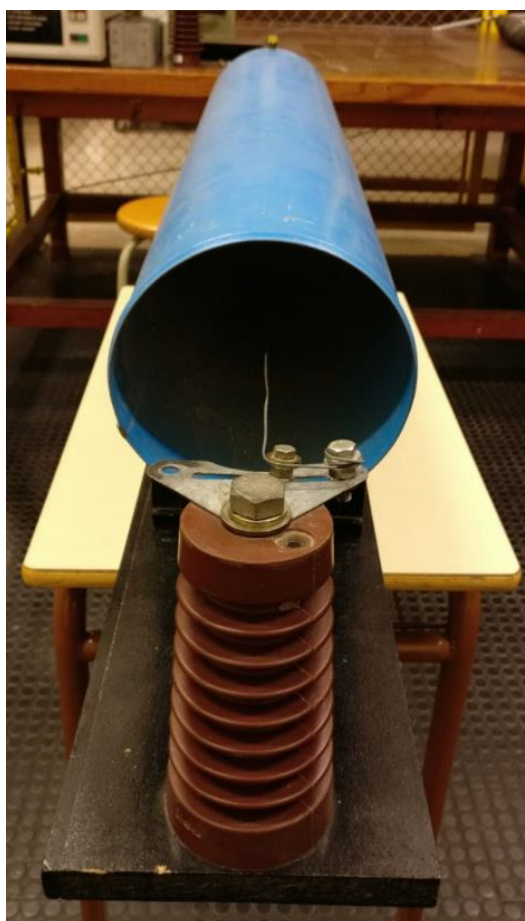


**Figura 6-19 Efecte corona visual .**

També es va pujar la tensió fins que va saltar l'arc elèctric als 38 kV, per poder saber els límits de la bancada, amb referència al tub, ja que es va tapar el tub per un extrem amb un tros de fusta per tal de poder veure l'efecte visual, i això sumant a la poca ventilació del medi, ja que és el tub, amb la ionització del aire, va afavorir l'aparició del arc elèctric a una tensió d'aquestes magnituds.



**Figura 6-20** Detall del conductor en l'assaig del efecte corona visual.



**Figura 6-21** Bancada per l'assaig de l'efecte corona visual.

### 6.3.2 Assaig d'un conductor de radi gran.

El segon assaig què es va realitzar, va ser el d'un conductor de radi gran, què es va utilitzar el mateix diàmetre de conductor que l'assaig anterior, és a dir, un diàmetre de 1,5 mm.

En aquest assaig es va procedir a fer el muntatge del esquema elèctric, i a diferència per veure l'efecte corona visual, aquest assaig es va prendre mesures cada 10 kV, fins al límit de 50 kV per seguretat del equipament del laboratori.

Primer de tot es va considerar com es faria les lectures, es té per una banda la tensió que surt del transformador d'alta tensió, i per un altre la intensitat a l'entrada de la bancada d'efecte corona, intensitat del secundari, la qual es va mesurar amb un amperímetre de pinces, per tant si es multiplica aquesta tensió per la intensitat tenim una potència de pèrdues, ja que és l'única mesura què es pot prendre ja que amb les condicions què es tenen és lo més idoni, per tant encara que la potència que s'obté de les lectures és potència aparent, en VA<sup>3</sup>, es considera que el  $\cos \phi = 1$ , és a dir que no es té part reactiva, encara que no sigui totalment cert.

També es va voler comprovar quin era l'efecte del pla de terra a diferents alçades ja que, a la vida real, la distància dels conductors al terreny afecta molt a les pèrdues per efecte corona.

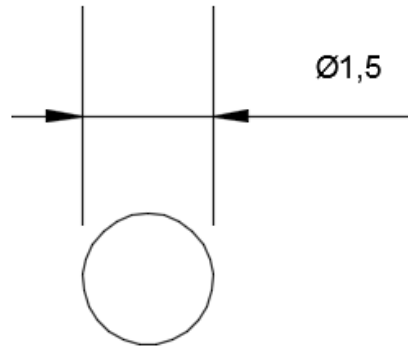
Abans de prendre les dades d'intensitat es va voler saber quan mesurava la pinça amperimetria a la sortida de la resistència limitadora, per saber quants ampers de pèrdues patia la instal·lació, per això s'ha elaborat la taula següent amb les mesures de pèrdues de la instal·lació a cada nivell de tensió que es fa els assaigs.

Tensió (kV)	Intensitat del secundari (A)
10	0,002
20	0,006
30	0,012
40	0,02
50	0,027

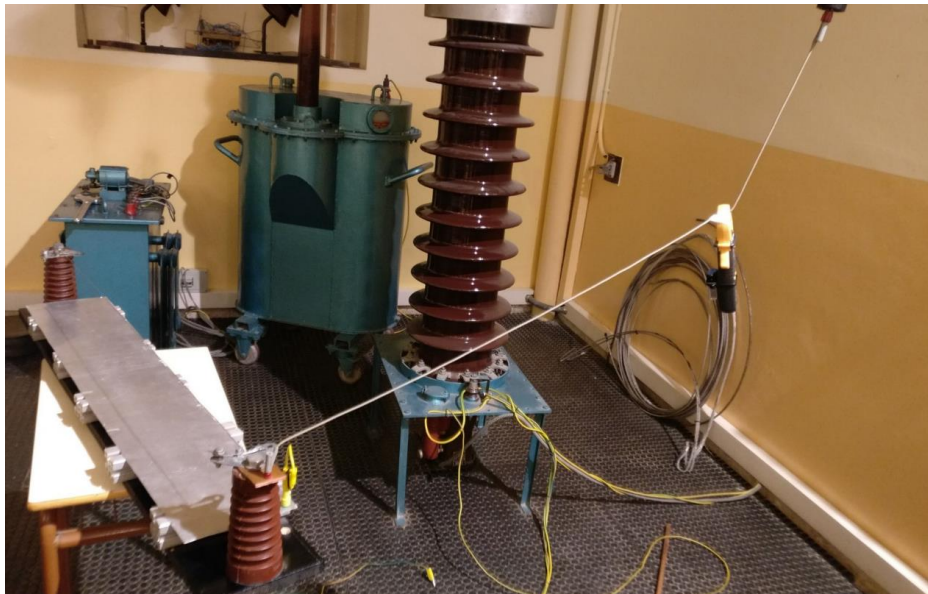
Taula 6-5 Intensitat de pèrdues de la instal·lació en funció dels diferents nivells de tensió.

<sup>3</sup> Volt-ampere, unitat de la potència aparent.

Es pot veure la configuració dels conductors i imatges de la bancada per la realització de l'assaig següent a Figura 6-22 i Figura 6-23.



**Figura 6-22 Configuració del conductor per l'assaig d'un conductor de radi gran, distància en mm.**



**Figura 6-23 Bancada per l'assaig d'un conductor de radi gran.**

A continuació es mostren les taules amb les dades preses a l'assaig, i amb el càlcul pertinent per trobar les pèrdues equivalents de l'efecte corona, a diferents rangs de tensió, de 10 fins a 50 kV i a diferents alçades de la placa de terra, què és a alçada 0 cm, respecte la base de la bancada, a 4,75 cm i a 9,25 cm, Taula 6-6, Taula 6-7 i Taula 6-8.

- Placa a terra, a 0 cm.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,012	0,006	120
30000	14	0,023	0,011	330
40000	20	0,035	0,015	600
50000	24	0,043	0,016	800

**Taula 6-6 Dades de l'assaig per un conductor de radi gran, amb la placa de terra a una alçada de 0 cm.**

- Placa a terra, a 4,75 cm.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,005	0,003	30
20000	8	0,013	0,007	140
30000	14	0,024	0,012	360
40000	19	0,034	0,014	560
50000	-	-	-	-

**Taula 6-7 Dades de l'assaig per un conductor de radi gran, amb la placa de terra a una alçada de 4,75 cm.**

A la fila de 50 kV no es tenen dades registrades a causa de que l'arc elèctric va saltar a uns 45 kV, ja que l'alçada de la placa afavoreix l'aparició de l'arc, ja que té menys recorregut per que es produeixi.

- Placa a terra, a 9,25 cm.

Tensió (V)	Intensitat del primari (A)	Intensitat del secundari (A)	Intensitat del secundari (A) només bancada	Potència de pèrdues de la bancada (W)
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,012	0,006	120
30000	-	-	-	-
40000	-	-	-	-
50000	-	-	-	-

Taula 6-8 Dades de l'assaig per un conductor de radi gran, amb la placa de terra a una alçada de 9,25 cm.

En aquest cas a partir dels 28 kV, va saltar l'arc elèctric i a partir del 30 kV no es tenen dades mesurades, es pot començar a apreciar que la distància del pla de terra, és poc significativa, ja es veurà si en diferents configuracions afecta i és una magnitud important a tindre en compte.

### 6.3.3 Assaig d'un conductor de radi petit.

En aquest assaig, es procedirà a muntar el mateix esquema elèctric que l'apartat anterior, i concretament, les dades d'aquest assaig es poden comparar-les amb aquest mateix apartat (6.3.2), és el mateix tipus d'assaig, amb la mateixa configuració, l'únic que varia és el diàmetre del conductor, el qual és mes petit, concretament té un diàmetre de 0,8 mm

La configuració del conductor i la bancada, amb tot el muntatge, es pot veure a la Figura 6-24 i la Figura 6-25.



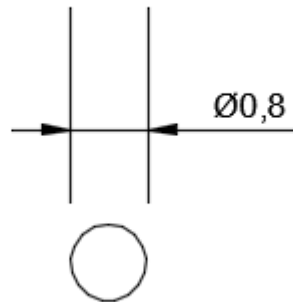


Figura 6-24 Configuració del conductor per l'assaig d'un conductor de radi petit, distància en mm.

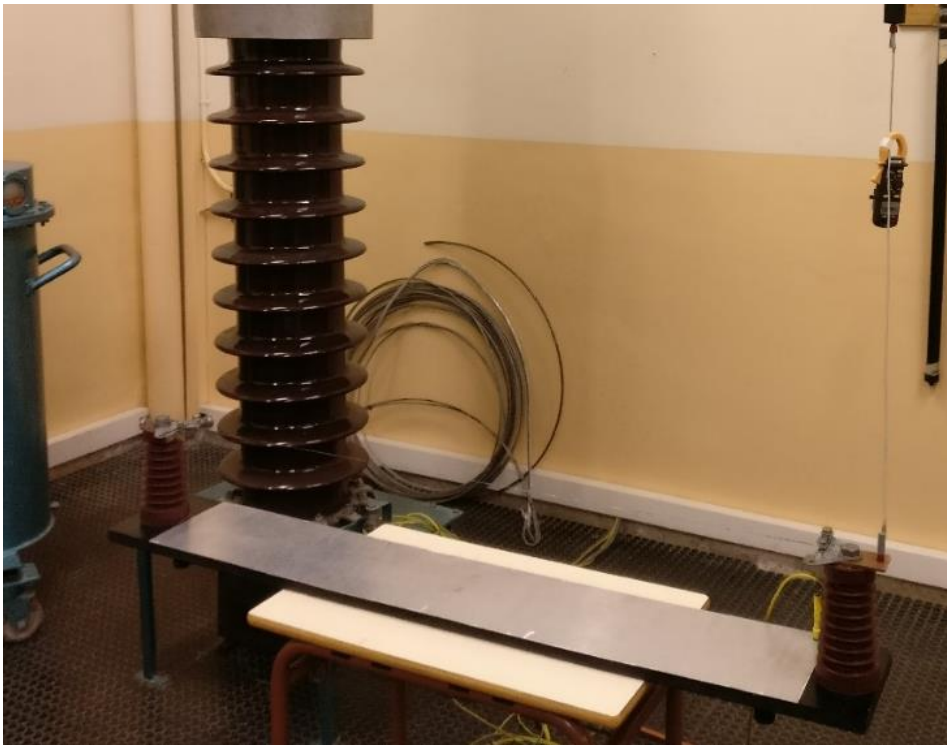


Figura 6-25 Bancada per l'assaig d'un conductor de radi petit.

Ara es mostra la taula amb les dades mesurades, i els càlculs pertinents, en aquest cas, com em vist a l'assaig anterior, que l'alçada del pla de terra no és rellevant, només es realitzarà la taula, amb el pla de terra, a l'alçada de la base de la bancada, és a dir a 0 cm, Taula 6-9.

- Dades per un conductor de radi petit, on el pla de terra està a la base de la bancada.

Tensió (V)	Intensitat del primari (A)	Intensitat del secundari (A)	Intensitat del secundari (A) només bancada	Potència de pèrdues de la bancada (W)
10000	4	0,005	0,003	30
20000	10	0,013	0,007	140
30000	14	0,023	0,011	330
40000	20	0,032	0,012	480
50000	24	0,042	0,015	750

**Taula 6-9 Dades de l'assaig per un conductor de radi petit.**

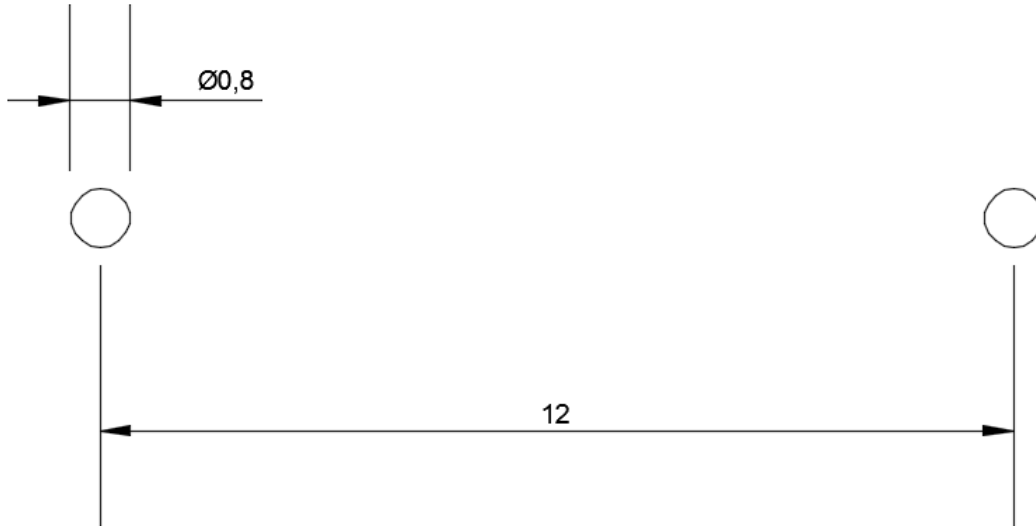
Si es compara la Taula 6-9 amb la Taula 6-6, es veu que els resultats són bastants semblants, l'única mesura que varia més és la de 40 kV i 50 kV, on les pèrdues són una mica diferents, però les pèrdues són més petites en aquest rang de tensió i hauria de ser al contrari.

#### **6.3.4 Assaig de 2 conductors.**

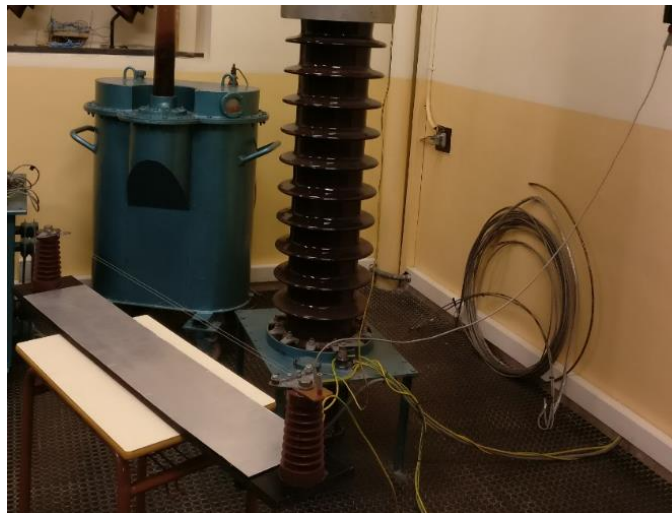
En el següent assaig es procedirà a dur a terme la configuració de 2 conductors, cadascú amb un diàmetre de 0,8 mm. Les dades obtingudes, comparades amb els apartats anteriors, haurien de ser inferiors, ja que el radi mig geomètric en 2 conductors és molt més gran que en un, sigui del diàmetre que sigui.

Tal i com es va fer a l'assaig del conductor de radi gran (6.3.2), repetirem l'assaig a diferents alçades del pla de terra, per veure si amb una configuració de 2 conductors, té algun tipus d'efecte.

Es pot veure la configuració dels conductors per aquest assaig i el muntatge realitzat a la Figura 6-26 i la Figura 6-27.



**Figura 6-26 Configuració dels conductors per l'assaig de dos conductors, distàncies en mm.**



**Figura 6-27 Bancada per l'assaig de dos conductors.**

Les dades mesurades a l'assaig es separaran per les diferents alçades del pla de terra com en l'apartat 6.3.2.

Aquestes dades es mostren a la Taula 6-10, Taula 6-11 i Taula 6-12.

- Assaig de 2 conductors amb la placa de terra a 0 cm.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,01	0,004	80
30000	15	0,019	0,007	210
40000	20	0,028	0,008	320
50000	24	0,036	0,009	450

**Taula 6-10 Dades de l'assaig per 2 conductors, amb la placa de terra a una alçada de 0 cm.**

- Assaig de 2 conductors amb la placa de terra a 4,75 cm.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,01	0,004	80
30000	14	0,018	0,006	180
40000	20	0,027	0,007	280
50000	-	-	-	-

**Taula 6-11 Dades de l'assaig per 2 conductors, amb la placa de terra a una alçada de 4,75 cm.**

A la fila de 50 kV no hi han dades registrades, ja què a prop dels 42 kV va saltar l'arc elèctric, a causa de la proximitat i la facilitat de l'obtenció del arc, tal i com passa a l'assaig de l'apartat 6.3.2.

- Assaig de 2 conductors amb la placa de terra a 9,25 cm.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,01	0,004	80
30000	-	-	-	-
40000	-	-	-	-
50000	-	-	-	-

**Taula 6-12 Dades de l'assaig per 2 conductors, amb la placa de terra a una alçada de 9,25 cm.**

Igual que en l'assaig anterior, a partir de 30 kV no es tenen dades a causa de que l'arc va saltar al voltant dels 28 kV.

Es pot veure, tal i com es va dir a l'apartat 6.3.2, que el pla de terra té poca repercussió als resultats, per tant es va procedir a fer un assaig per prendre mesures, sense pla de terra i veure les variacions produïdes, les dades estan reflectides a la Taula 6-13.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,009	0,003	60
30000	14	0,018	0,006	180
40000	20	0,026	0,006	240
50000	24	0,034	0,007	350

**Taula 6-13 Dades de l'assaig per 2 conductors, sense placa de terra.**

Després de fer tots els assaigs relacionats amb els 2 conductors, veiem que si es comparen la Taula 6-6 amb la Taula 6-10, si que les pèrdues es redueixen bastant a partir dels 20 kV gaire bé la meitat en la configuració de 2 conductors, què és totalment lògic, ja que el radi mig geomètric és proporcionalment més gran que en un conductor sol, i això fa que es produeixi aquesta reducció de potència de pèrdues.

I respecte la placa de terra, si es mira els resultats de la Taula 6-13 sense placa de terra, amb les següents Taula 6-10, Taula 6-11, Taula 6-12 amb placa de terra, es veu que la placa de terra, tal i com s'havia dit en apartats anteriors, sobre aquesta magnitud de bancada no té cap mena de relació sobre les pèrdues, així que en els següents assaigs no variarem l'alçada de la placa, ja que no té sentit repetir tants assaigs si els resultats son idèntics.

#### **6.3.5 Assaig de 4 conductors.**

En aquest assaig es procedirà a fer el muntatge de la bancada amb 4 conductors, és a dir com un feix de 4 conductors, on les pèrdues per efecte corona tenen que reduir-se considerablement.

Es farà servir conductors de 0,8 mm de diàmetre, igual que l'assaig anterior (6.3.4), però introduint 2 conductors més.

La configuració dels conductors amb les seves distàncies en mm, i la bancada utilitzada per aquest assaig es pot veure a Figura 6-28.

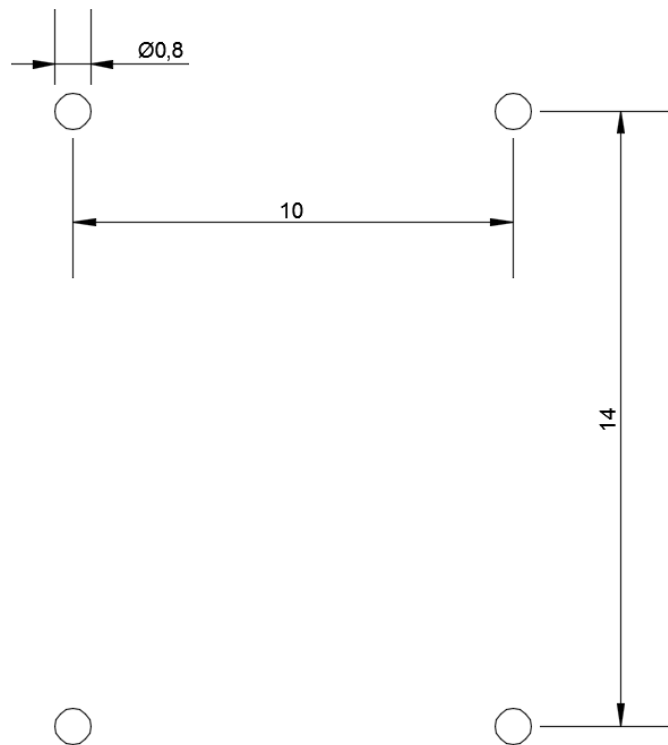


Figura 6-28 Configuració dels conductors per l'assaig de 4 conductors, distàncies en mm.

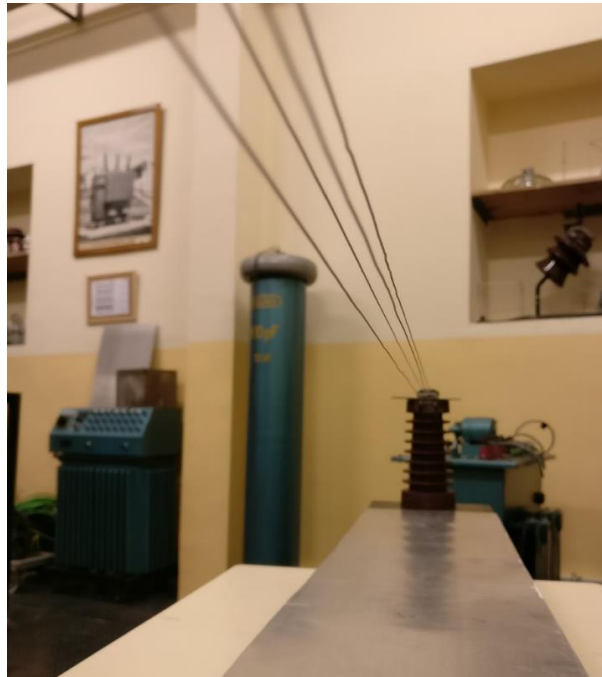


Figura 6-29 Bancada per l'assaig de 4 conductors.

Les dades mesurades es veuen a la Taula 6-14, com s'ha dit en l'apartat anterior, el pla de terra no és rellevant per aquesta magnitud de proveta, així que només es farà l'assaig amb el pla de terra sense cap alçada, i el posarem per tancar bé el circuit.

<b>Tensió (V)</b>	<b>Intensitat del primari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A)</b>	<b>Intensitat del secundari (A) només bancada</b>	<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,01	0,004	80
30000	15	0,02	0,008	240
40000	20	0,029	0,009	360
50000	24	0,039	0,012	600

**Taula 6-14 Dades de l'assaig per 4 conductors.**

Es pot veure que les dades de la Taula 6-14 respecte les de la Taula 6-10 han augmentat, quan tindrien que haver disminuït, i si els comparem amb les configuracions d'un sol conductor, Taula 6-6 i Taula 6-9, es veu que hi ha una disminució de pèrdues ja que 4 conductors en feix tenen més radi mig geomètric que un conductor sol, però la reducció de pèrdues no es suficient ja que amb 2 conductors hi ha menys potencia de pèrdues a tensions elevades, entre 30 i 50 kV, que en la configuració de 4 conductors i a de ser tot el contrari, ja que amb 4 conductors hi ha mes radi mig geomètric que no amb 2 conductors.

Així que en l'apartat següent (6.3.6) s'ha pensat en ajuntar tots els 4 conductors, el més a prop possible, ja que s'ha pensat que la distància que hi ha entre ells no els hi afecta, ja que si els conductors estan massa separats, la inductància es massa petita, igual que la capacítància, i actuen com conductors independents.



### 6.3.6 Assaig amb 4 conductors agrupats.

En aquest assaig, tal i com s'ha dit en l'apartat anterior (6.3.5), es veurà si la distància que hi havia entre els conductors, era el que afectava al resultat de les pèrdues, a causa de les dades obtingudes a la Taula 6-14, ja que no hi ha gaire diferència entre la configuració de 2 a 4 conductors, així que ajuntarem els 4 conductors el mínim possible, i es prendrà dades. La configuració es pot veure a la Figura 6-30.

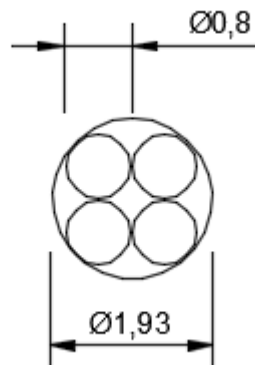


Figura 6-30 Configuració dels conductors per l'assaig de 4 conductors agrupats, distàncies en mm.

També es poden veure imatges de la configuració realitzada en aquest assaig a la Figura 6-31 i la Figura 6-32.



Figura 6-31 Configuració de 4 conductors agrupats.



Figura 6-32 Muntatge i bancada de l'assaig de 4 conductors agrupats.

Un cop realitzat el muntatge i ajuntant els conductors amb cinta per reduir la distància entre ells al mínim, s'han pres les dades a la Taula 6-15.

Tensió (V)	Intensitat del primari (A)	Intensitat del secundari (A)	Intensitat del secundari (A) només bancada	Potència de pèrdues de la bancada (W)
10000	4	0,004	0,002	20
20000	10	0,012	0,006	120
30000	14	0,02	0,008	240
40000	19	0,03	0,01	400
50000	22	0,039	0,012	600

Taula 6-15 Dades de l'assaig per 4 conductors agrupats.

Si es compara els resultats de la Taula 6-15 i la Taula 6-14, es veu que el resultat de pèrdues també és molt semblant, així que no té res a veure la distància entre els conductors en el cas de la configuració de 4. Com en cada assaig què no surten les dades correctes, es pot pensar que aquesta magnitud o dimensió de bancada no es la idònia per realitzar la mesura de dades i fer la comparació.

### 6.3.7 Assaig d'un conductor amb brutícia.

Aquest és l'últim assaig que s'ha realitzat, ja que és prou interessant portar-lo a terme. La brutícia i l'estat del conductor, en les formules anomenades al apartat 2 i 3, té una repercussió, ja que si el conductor te brutícia o esta en mal estat, les pèrdues per efecte corona són lleugerament més elevades.

La configuració d'aquest assaig a sigut d'un sol conductor de 0,8 mm de diàmetre, amb pols de ferro, enganxada per sobre per simular la brutícia del conductor. Es pot veure la configuració a la Figura 6-33.

I es pot veure el conductor amb la brutícia a la Figura 6-34.

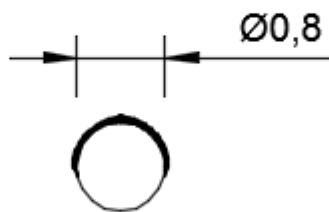


Figura 6-33 Configuració dels conductors per l'assaig d'un conductor amb brutícia, distàncies en mm.



Figura 6-34 Conductor amb brutícia per realitzar l'assaig.

Les dades estan reflectides a la taula següent, Taula 6-16.

Tensió (V)	Intensitat del primari (A)	Intensitat del secundari (A)	Intensitat del secundari (A) només bancada	Potència de pèrdues de la bancada (W)
10000	4	0,005	0,003	30
20000	10	0,013	0,007	140
30000	14	0,022	0,01	300
40000	20	0,033	0,013	520
50000	24	0,041	0,014	700

Taula 6-16 Dades de l'assaig per un conductor amb brutícia.

---

Després de obtindre les dades de la Taula 6-16, si es comparen amb les dades de la Taula 6-9, que és el mateix conductor, amb la diferència que un esta net i l'altre brut, les dades de l'últim assaig haurien de ser més grans i es veu que en algun rang de tensió es compleix, que és una mica més gran, però en altres no, encara que la variació és molt petita. Així que tampoc és gaire rellevant l'assaig d'embrutar el conductor amb aquestes dimensions i magnituds de bancada, la magnitud de les pèrdues és semblant per un conductor net i llis, que per un conductor brut.

#### 6.4 Discussió dels assaigs realitzats.

Per tal de comparar millor les dades obtingudes en els assaigs realitzats, es mostra la potència de pèrdues per cada un d'ells, amb la placa de terra posada a la base de la bancada, a la Taula 6-17.

<b>Potència de pèrdues de la bancada (W)</b>						
<b>Tensió (V)</b>	<b>1 conductor de radi gran</b>	<b>1 conductor de radi petit</b>	<b>1 conductor amb brutícia</b>	<b>2 conductors</b>	<b>4 conductors</b>	<b>4 conductors agrupats</b>
10000	20	30	30	20	20	20
20000	120	140	140	80	80	120
30000	330	330	300	210	240	240
40000	600	480	520	320	360	400
50000	800	750	700	450	600	600

Taula 6-17 Potència de pèrdues per cada tipus de configuració.

Respecte les dades de la Taula 6-17, si es mira respecte els nivells de tensions i el tipus de configuració que s'ha realitzat, a 10 kV es veu que no hi ha casi variació en les dades de pèrdues, ja que també el 10 kV en cada assaig no son exactament 10 kV, ja que en cada pulsació de pujada de tensió, aquesta podia variar al voltant dels 500 V, per tant no hi ha variació de pèrdues, en aquest nivell de tensió respecte les diferents configuracions.

Sobre els 20 kV, el conductor de radi gran amb els 4 conductors agrupats, tenen la mateixa potència de pèrdues, així que es pot predir que tenien el radi mig geomètric semblant, el conductor de radi petit té un augment mínim de pèrdues, igual que el conductor amb brutícia, però és poc significatiu, i respecte l'augment a 2 i 4 conductors si que disminueix bastant les pèrdues, però no es veu diferència entre la configuració de 2 a 4, és a dir, que actuen igual, el feix de 2 i 4 conductors en aquesta magnitud de bancada.

---

En els 30 kV, el conductor de radi gran i radi petit, tenen la mateixa potència de pèrdues, així que en aquest nivell de tensió, no afecta la secció del conductor, i es veu que el conductor amb brutícia té menys potència de pèrdues que el conductor net, cosa que no es lògic. Sobre els 2 conductors si que es veu la disminució significativa de pèrdues, respecte les configuracions d'un conductor, però els 4 conductors, tant agrupats, com separats, tenen un augment mínim respecte el de 2, i no es una mesura lògica, ja que en aquesta configuració, en aquest nivell de tensió, es veu que tampoc afecta la distància entre els conductors.

Sobre els 40 kV es veu que hi ha diversitat de resultats en les diferents configuracions, obtenint la major potencia de pèrdues el conductor gran, després el conductor amb brutícia, i després aquest mateix però net, aquests resultats si que són més possibles. Respecte les configuracions de diversos conductors, la menor potència de pèrdues és per la configuració de 2 conductors i la major és per els 4 conductors agrupats i després els mateixos, però separats, torna a no ser uns resultats gaire correctes.

Finalment sobre els 50 kV, la major potència de pèrdues torna a ser pel conductor amb radi gran, seguidament el conductor de radi petit net, i després amb brutícia, cosa que amb els 40 kV era al revés. I per les configuracions de diversos conductors, la potència mínima és per la configuració de 2 conductors, i les de 4 conductors tenen la mateixa magnitud de pèrdues.

Per tant es veu que les dades són bastant variades i no són del tot idònies de com haurien de ser, en general, la secció del conductor sol, no és gaire important en els assaigs, ja que no es compleix que el conductor petit ha de tindre més pèrdues que el gran. La brutícia tampoc fa gaire efecte, ja que les pèrdues entre un conductor net i un brut a vegades són iguals, altres són més gran i altres són més petites. I finalment respecte a les configuracions de diversos conductors, només té efecte amb 2, ja que redueix significativament les pèrdues respecte un sol conductor, i les configuracions de 4 conductors, per una banda la distància entre els conductors no és gaire significativa, i si que respecte un conductor hi ha una disminució de pèrdues, però respecte 2 conductors no hi ha.

Si es compara les dades obtingudes amb el programa que s'ha fet al capítol 8, es veu que els resultats per un conductor de radi petit, per una tensió de 30 kV, ens dona un resultat, que el representem a la Taula 6-18.

RESULTATS DE PÈRDUES TOTALS	
Mètode de Peek (llarg) (W)	0,8059297
Metode de Peek (simplificat) (W)	0,69251167

Taula 6-18 Resultats del programa per un conductor de radi petit i 30 kV.

Es veu que dona resultats extremadament petits, del ordre de 0,7 i 0,8 Watts, això és degut a que la resistència limitadora té una caiguda de tensió molt més grossa, i per tant una potència de pèrdues més gran que no pas la bancada d'efecte corona, ja que si calculem la potència que hi ha a la resistència limitadora a partir de (Eq. 6.2)

$$P = R \cdot I^2 \quad (\text{Eq. 6.2})$$

On  $R$  és el valor de la resistència limitadora en ohms, anomenat a l'apartat (6.2.2), i  $I$  és el valor de la intensitat, en ampers trobat a la Taula 6-9, per 30 kV, i  $P$  és la potencia que hi ha a la resistència limitadora en watts.

Per tant la potencia a la resistència segons (Eq. 6.2).

$$P = 4,9 \cdot 10^6 \cdot 0,011^2 = 593 \text{ W}$$

Per tant no podem comparar els resultats, ja que els ordres de magnitud son molt diferents, s'ha d'optimitzar la instal·lació i sobretot la resistència limitadora, a causa de la seva variabilitat, ja que els resultats poden variar molt a cada assaig.

Els resultats d'aquestes dades, es degut a diversos factors, per una banda, cada cop que es pujava la tensió al panell de control, cada pulsació variava entre 500 V i 700 V, i a la instrumentació no marca el valor exacte de tensió. Per un altre banda es va fer servir instruments de mesura amb molt poca resolució, ja que només tenia escala d'ampers i no de mili ampers. Les dimensions de la bancada tampoc eren les idònies per prendre mesures, amb un tram de línia més llarg, i amb millor preparació, els resultats podrien haver estat més exactes. Per últim la potència mesurada com es diu en un assaig, son volts per ampers, es a dir es potencia aparent, i s'ha considerat que el  $\cos \varphi = 1$ , s'hauria de haver mesurat la potència amb un wattímetre, però amb aquesta magnitud de dades es molt difícil.



Per tant amb més temps i una millor preparació es poden millorar els assaigs, i per tant els resultats.

## **7. Conseqüències de l'efecte corona sobre el medi ambient i les persones.**

En aquest capítol es veuran, les conseqüències o l'impacte que té l'efecte corona, sobre el medi ambient en el que passa la línia, i també sobre les persones, juntament amb els efectes sobre la salut, per què, no només l'efecte negatiu és que produeixi unes pèrdues de potència a la línia, sinó que el camp elèctric que es genera al voltant dels conductors, i sobretot el camp magnètic, en el que la combinació dels 2 anteriors, produeixen el camp electromagnètic, tenen efectes negatius sobre el medi en el que discorre la línia i sobre les persones que poden estar al voltant d'aquesta.

Els principals impactes que produeix l'efecte corona són:

- El camp electromagnètic.
- La generació o emissió d'ozó.
- La producció d'àcid nítric en ambient humit.
- La generació d'òxids de nitrogen.
- El soroll audible.
- Les radio interferències.
- Deteriorament dels elements de la línia.
- Dissipació d'energia.

En aquest capítol es veurà les més problemàtiques pel medi ambient i la salut, com són els camps electromagnètics, la emissió d'ozó, l'àcid nítric, entre d'altres.

### **7.1 Impacte del camp electromagnètic (CEM).**

Els camps electromagnètics<sup>1</sup>, tenen el seu origen a la natura, com per exemple, el sol, les estrelles, i a la nostra atmosfera existeixen càrregues elèctriques que generen camp magnètics, tal i com la biologia humana, que és de naturalesa elèctrica generen ones electromagnètiques, les quals són de molt baixa densitat.

---

<sup>1</sup> Combinació del camp elèctric i del camp magnètic.

Per altre banda hi ha camps electromagnètics els quals estan produïts artificialment, com poden ser els produïts per línies elèctriques, maquinària i qualsevol aparell que utilitzi energia elèctrica.

El camp electromagnètic creat per les línies elèctriques, és una radiació de baixa freqüència, ja que la freqüència de la línia, almenys aquí a Europa es de 50 Hz, excepte a països com Estats Units, entre d'altres, que les línies treballen a 60 Hz, aquests camps s'anomenen com a radiacions no ionitzants de freqüències extremadament baixes, (ELF<sup>2</sup>), a la Figura 7-1 es pot veure l'espectre electromagnètic, amb el tipus de radiacions que hi ha.

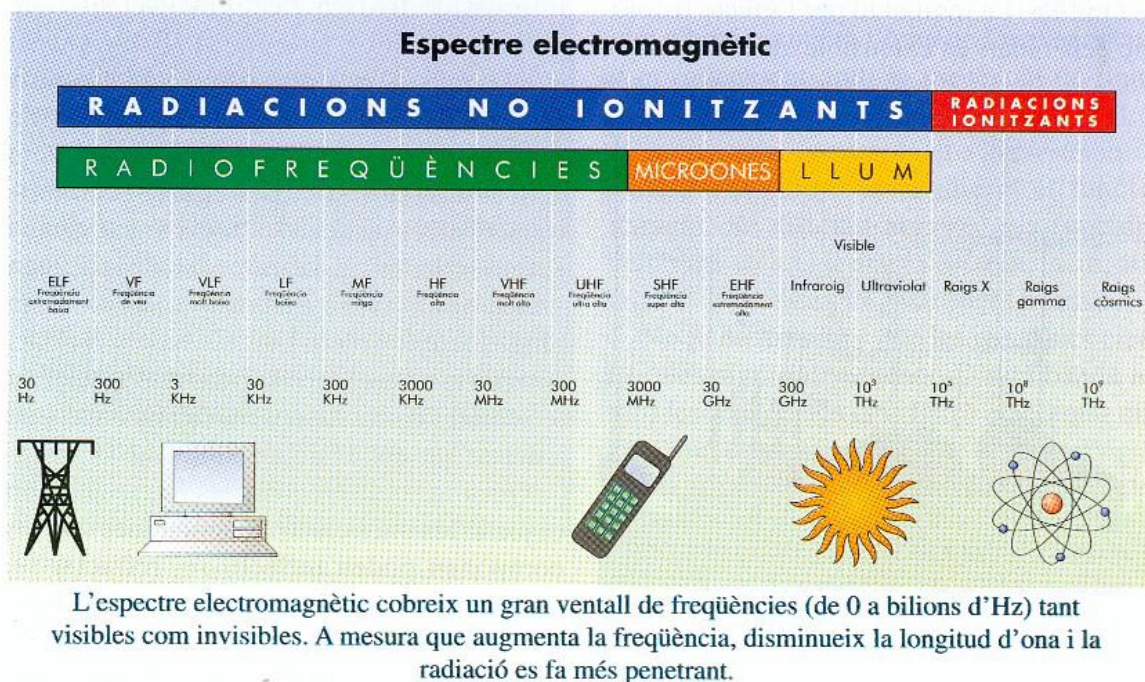


Figura 7-1 Espectre Electromagnètic.

Les radiacions no ionitzants, es caracteritzen per no poder ionitzar la matèria biològica, i tenen una freqüència entre els 30 Hz i els 300 Hz, i una energia entre els 1,24 i els 12,4 eV<sup>3</sup>

Per tant ens centrem en l'estudi de les radiacions de tipus ELF.

<sup>2</sup> Radiacions no ionitzants de freqüències extremadament baixes.

<sup>3</sup> Unitat d'energia, electronvolts, equivalents a  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Joules.

Està demostrat per certs estudis (N. Tchernitchin), que les radiacions no ionitzants provoquen certs efectes biològics, concretament s'ha determinat un risc relatiu elevat en leucèmies, tumors cerebrals i altres tipus de càncer en persones que viuen pròximes a línies elèctriques d'alta tensió. El risc més elevat s'ha determinat en leucèmies infantils.

En la combinació del camp electromagnètic, el camp elèctric associats a les fonts de freqüència de 50 Hz, existeixen sempre que hi hagi tensió, independentment de que hi hagi corrent. El camp elèctric té poca capacitat de penetració als edificis. Per altra banda, el camp magnètic associat a la font de freqüència de 50 Hz, existeix només quan té corrent circulant. El camp magnètic és difícil d'apantallar i penetra fàcilment als edificis i a les persones. Per tant els efectes biològics que causen els camps electromagnètics s'associen al nivell del camp magnètic, ja que és el que produeix més impacte.

La magnitud natural dels camps emesos per les línies d'alta tensió venen donades pels següents valors, on el camp elèctric natural varia entre  $1 \cdot 10^{-3} \text{ kV/cm}$  i  $0,2 \text{ kV/cm}$ , i el camp magnètic natural està al voltant de  $40 \mu\text{T}$ , també s'ha de dir, que aquests són camps no oscil·lants, és a dir, són estàtics, varien molt lentament en el temps.

El camp elèctric varia poc en les línies elèctriques ja que la tensió de la qual depèn, no canvia massa. En canvi, el camp magnètic generat per aquestes línies pot variar molt a causa del valor del corrent que circula per la línia, ja que aquest depèn de la càrrega que se li demana a la línia.

A la Taula 7-1, es mostraran els valors deduïts d'estudis de mesura sobre línies d'alta tensió, on l'aparell per mesurar el camp magnètic s'anomena Gaussímetre.

<b>Tipus de línia</b>	<b>Mesurat a l'eix</b>	<b>Mesurat a 20 m</b>
132 kV	1,2 kV/m; 3 $\mu\text{T}$	0,4 kV/m; 0,2 $\mu\text{T}$
220 kV	1,7 kV/m; 5 $\mu\text{T}$	1,1 kV/m; 0,4 $\mu\text{T}$
380 kV	3,2 kV/m; 7 $\mu\text{T}$	2,6 kV/m; 2,8 $\mu\text{T}$

**Taula 7-1 Valors mitjos de camps elèctrics i magnètics mesurats.**

Segons molts estudis, els nivells d'aquestes magnituds en els habitatges, varien entre els 150  $\mu\text{T}$  i els 0,2 kV/m al voltant d'aparells elèctrics, i de 0,02  $\mu\text{T}$  i 0,02 kV/m en el centre de les habitacions, per tant, una persona que viu a 20 metres d'una línia de 380 kV està exposada a 20 vegades al valor superior màxim que pot tenir una persona que visqui fora de l'abast de la línia.

El camp magnètic es calcula segons l'expressió (Eq. 7.1).

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot D} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

On  $I$  és la intensitat nominal que circula pel conductor en ampers,  $\mu_0$  és la permeabilitat magnètica del buit, amb un valor de  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ,  $D$  és la distància en metres del conductor al punt que es vol conèixer el camp magnètic i  $B$  és el camp magnètic expressat en Tesles.

A la Figura 7-2, es mostra la variació del camp magnètic en funció de la distància del conductor que en aquest cas transporta 100 A.

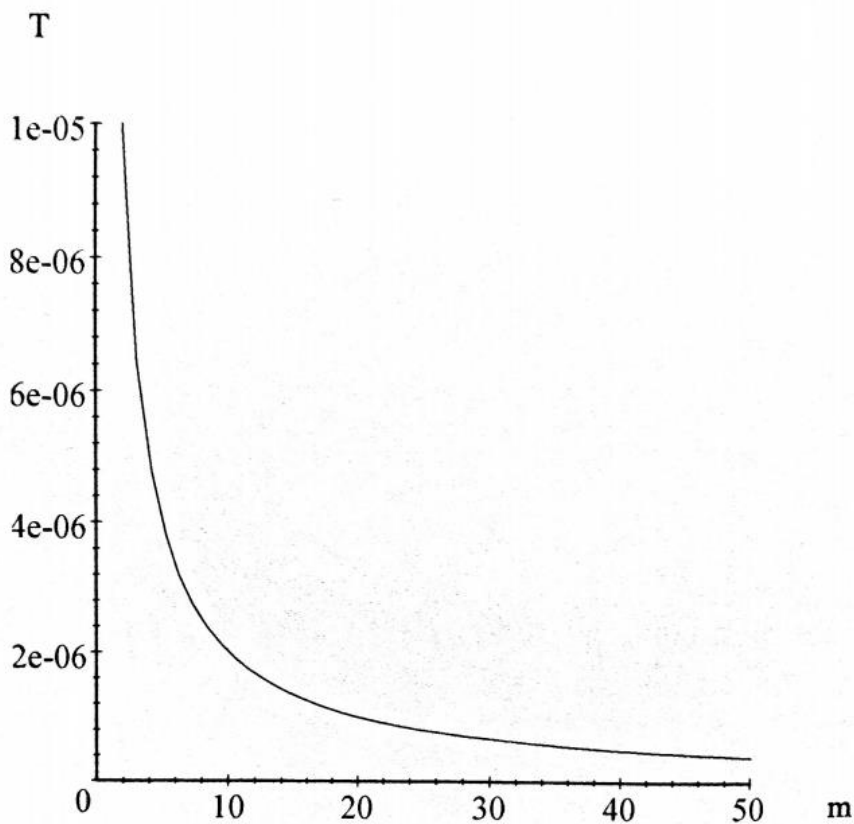


Figura 7-2 Variació CEM en funció de la distància per un conductor que transporta 100 A.

En la Figura 7-3, també es pot veure com varia el camp magnètic i elèctric, respecte els diferents nivells de tensió de les línies, es pot veure la gran diferència que hi ha de magnituds entre un camp i un altre, mentre el camp elèctric és molt més estable, el camp magnètic és molt variable.

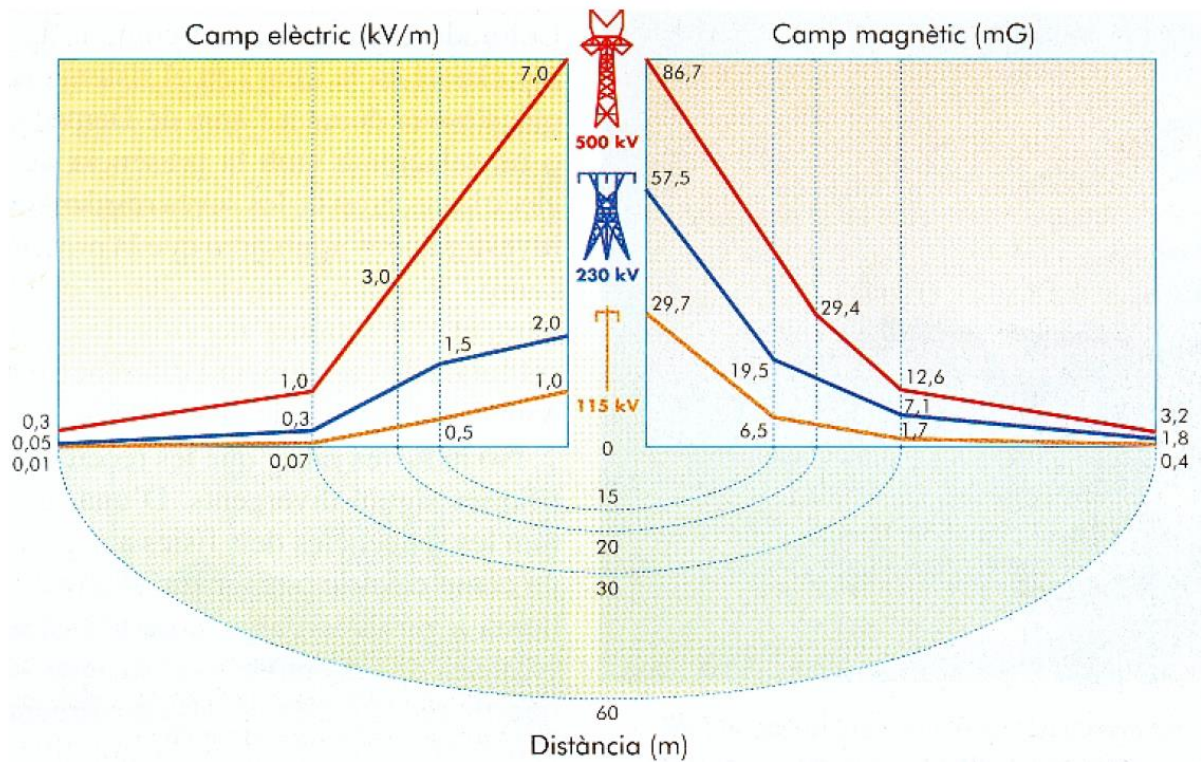


Figura 7-3 Variació del camp elèctric i el camp magnètic, respecte els diferents nivells de tensió.

### 7.1.1 Impacte sobre les persones del CEM.

En l'organisme es produeix corrents elèctriques minúscules, degudes a les reaccions químiques de la funcions corporals, inclús en absència de camps elèctrics externs.

En la majoria de les reaccions bioquímiques, des de la digestió fins a les activitats cerebrals, es produeix una organització de partícules carregades, inclús el cor presenta activitat elèctrica, la qual es detecta mitjançant electrocardiogrames.

El camp elèctric de freqüència baixa, influeix a l'organisme, com en qualsevol altre material format per partícules carregades, aquest afecta provocant forces entre les molècules del cos humà i en les estructures cel·lulars dels teixits, les quals poden provocar una deformació d'estructures cel·lulars, induir voltatges en les membranes cel·lulars i alterar la distribució i el

moviment de les càrregues elèctriques a la superfície, provocant un corrent que travessa el organisme fins el terra.

Aquest corrent depèn de diferents factors, com el moviment de fluids en l'interior del organisme, la distància entre el cos i la font del camp, la presència d'estructures que es puguin considerar pantalles o que poden concentrar el camp, la posició de la persona respecte el camp i factors de les persones, com pot ser l'edat, el pes corporal.

El camp magnètic de baixa freqüència, també indueix corrents circulants en l'organisme, aquestes corrents depenen de la intensitat del camp magnètic exterior, si aquest es suficientment intens, les corrents poden estimular els nervis i músculs o fins i tot afectar els processos biològics.

Hi ha diversos estudis que diuen que hi ha una possible relació entre les interaccions cel·lulars i els corrents en l'interior del organisme, aquestes interaccions varien segons la freqüència dels camps, encara que la OMS<sup>4</sup> diu que en els camps a freqüència industrial i a baixa intensitat no afecten a la salut, els estudis que a dia de avui encara s'estan fent, diuen que si tenen impacte.

Des de l'any 1993 s'han fet uns 14 estudis que analitzen la possible associació d'alguns tipus de càncers en nens, i el residir a prop de línies elèctriques d'alta tensió, de aquests 14 estudis, 8 fan la conclusió de que existeix una relació, i els altres 4 diuen que hi ha una associació estadísticament significativa entre la leucèmia i residir a prop d'una línia elèctrica d'alta tensió.

S'han fet estudis recents sobre l'impacte del CEM a la salut de les persones, entre els quals, els més destacables són, el de NIEHS, que fa l'estudi sobre el càncer en general, el de Bowman, sobre la leucèmia, el de McLean i el de Kumin, sobre tumors a la pell, el de Mevissen i el de Loomis, sobre el càncer de mama i el de Armstrong, sobre el càncer de pulmó.

El primer estudi del any 79 va indicar una possible relació entre viure a prop de les línies de transmissió i la leucèmia infantil, el estudis més recents van associar aquest fet però per camps magnètics de una elevada intensitat o magnitud. Per una exposició de un camp magnètic de 0,3  $\mu$ T o més, esta demostrat que la leucèmia infantil te més impacte, encara que estudis posterior a l'any 2000, menys del 1 % dels nens estan exposats a aquesta magnitud de camp.

---

<sup>4</sup> Organització Mundial de la Salut

Tots aquests estudis realitzats fins el dia de avui, tenen problemes o falta d'informació exacte, a causa de la dificultat de mesura d'aquests camps, la falta de publicació sobre aquest tema en la literatura científica existent, la repetició dels mateixos estudis, donada per la dificultat d'aconseguir les mateixes condicions, i la exposició del camp fora del habitatge, i del temps d'exposició.

Algunes solucions per reduir el camp, podria ser l'augment de la distància entre la persona i l'aparell emissor del camp, la disminució del temps d'exposició, i el dissenyar línies amb una alçada més gran respecte al terra, amb menor consum, és a dir, que tinguin menor intensitat, substituir les de menor tensió per major tensió, què estiguin soterrades, que si s'han de fer noves línies de transport, aprofitar les rutes existents i agrupar-les, i finalment incrementar la distància de seguretat del reglament.

Respecte a la legislació, el BOE<sup>5</sup> (Industria, 2016) del 22 de Juliol de 2016, el camp elèctric límit amb efectes relacionats amb la salut, entre l'interval de freqüències de 1 Hz i 3 kHz es de 1,1 V/m en valor de pic.

En l'àmbit Europeu, (inclòs Espanya) la legislació diu que els nivells límits de referència són, pel camp elèctric 5 kV/m, i pel camp magnètic es de 100  $\mu$ T, la superació d'aquests límits no implica que es superin les restriccions bàsiques. Aquests valors de referència estan enfocats a efectes sobre el sistema nerviós per a freqüència industrial i una densitat de corrent de 2 mA/m<sup>2</sup>.

### **7.1.2 Impacte sobre el medi ambient del CEM.**

El camp electromagnètic també té un impacte sobre el medi ambient, sobre tot a les aus i també s'ha estudiat l'impacte sobre les zones forestals, encara que hi ha poca bibliografia sobre aquest tema.

En el tema dels animals o fauna terrestre (incloses les aus), molts dels estudis han sigut relacionats per investigar els efectes sobre la salut humana, usualment s'han fet estudis

---

<sup>5</sup> Boletín oficial del estado.



toxicològics en animals com rates i ratolins en els laboratoris, però altres estudis també han introduït mosques per impactes sobre la genotoxicitat<sup>6</sup>.

Els estudis presentats fins ara, han trobat poca evidència dels efectes del CEM sobre la fauna en nivells per sota de les recomanacions del ICNIRP<sup>7</sup>, no s'ha trobat efectes adversos sobre el bestiar sota les línies de transport, en canvi es coneix que el vol dels insectes pot ser influït per el camp elèctric per sobre de 1 kV/m, pels efectes significatius només han sigut demostrats per abelles quan han estat ubicades sota les línies de transmissió. Els conductors no aïllats, ni connectats a terra, col·locats en un camp elèctric, poden arribar a causar lesions o alterar l'activitat dels animals, aus i insectes.

Respecte a les aus, hi ha 2 problemes significatius, les aus que s'aturen sobre els conductors o sobre les torres, i poden morir electrocutades, en fer el contacte entre dues fases o entre fase i terra, o fins i tot de la seva mort però per l'impacte amb el conductors.

Les aus que moren electrocutades solen ser de grans dimensions, ja que al reposar-se toquen amb les seves ales a les dues fases o a una fase i a una part metàl·lica posada a terra, o en el moment de sortir volant. Al ser aus de grans dimensions, les que tenen aquest tipus d'accidents, i aquestes són les aus que són més escasses i estan en perill d'extinció.

La perillositat està relacionada amb el disseny i la funció de la torre, les quals les més perilloses són les de derivació i les que sustenten dispositius de maniobra o de transposició, ja que aquestes torres tenen més elements metàl·lics que poden ser tocats.

Encara que en línies d'alta, la major perillositat és en el tema de les col·lisions en els conductors, ja que la separació entre fases en una línia d'alta és prou gran com pel contacte d'una au. Per que les aus puguin veure millor els conductors ja s'implementen en algunes línies elements de senyalització com esferes vermelles, i elements reflectants com cintes.

També existeixen alguns estudis sobre la vegetació, en que plantes o cultius per sota de línies elèctriques de fins a 765 kV, no presenten efectes nocius enfront al CEM, ni tampoc a magnituds amb nivells normals. L'impacte sobre els arbres es conegut que passa per intensitats de camp elèctric per sobre dels nivells que estableix la ICNIRP degut a les descàrregues de tipus corona

---

<sup>6</sup> Acció nociva que afecta a la integritat d'una cèl·lula de material genètic, dany cromosòmic.

<sup>7</sup> Comissió Internacional de la protecció per radiacions no ionitzants.

en la punta de les fulles, aquests nivells de camp es troben a prop de conductors de línies de voltatge molt gran.

La relació entre els incendis forestals i les línies elèctriques, és un tema polèmic, ja que s'han produït incendis forestals que han estat atribuïts a les línies elèctriques que travessen boscos cremats, encara que la majoria de casos són relacionats per instal·lacions de mitja tensió. Les causes dels incendis pot ser el contacte entre una fase i un arbre, el contacte directe per una fase, o per arcs elèctrics o explosió de certs elements, però una referència directa amb l'efecte corona, no hi ha demostracions, només si es produeix un arc elèctric o un altre tipus de fenomen que produeixi cert nivell de calor.

Per últim la fauna aquàtica també és sensible al CEM, ja que alguns animals s'orienten pel camp magnètic terrestre, i la presència de línies subterrànies o submarines afecten a la orientació d'aquesta fauna, però la demès fauna i el medi ambient submarí no es veu afectat per la presència del CEM.

Es pot concloure que hi ha poca informació sobre l'impacte i és necessari fer més estudis per assegurar l'impacte sobre el medi ambient, encara que és difícil a causa de la mesura del camp i d'aconseguir sempre les mateixes condicions.

## 7.2 Impacte de l'ozó.

La producció d'ozó a les línies d'alta tensió, es dur a terme a causa de la ionització del aire produïda per l'efecte corona. Aquestes emissions d'ozó troposfèric<sup>8</sup> produïdes per l'efecte corona contribueixen a l'augment de nivells d'ozó generat per unes altres activitats industrials i de producció d'energia elèctrica.

L'ozó ( $O_3$ ) és un gas incolor, invisible i d'olor agradable. És tracta d'una molècula formada per 3 àtoms d'oxigen, a diferència de la molècula d'oxigen que respirem que està formada per 2 àtoms ( $O_2$ ).

Aquest tercer àtom d'oxigen en l'ozó té tendència a separar-se de la molècula d'ozó i combinar-se amb altres elements químics, tot oxidant-los, això fa que l'ozó sigui un gas molt reactiu, i

---

<sup>8</sup> Es l'ozó que es troba a la troposfera, que es la capa de l'atmosfera mes propera a la superfície terrestre.

pugui tindre efectes corrosius sobre materials, i a certes concentracions, efectes irritants sobre els essers vius.

L'ozó també es troba de manera natural sobre l'atmosfera, la seva concentració màxima es troba a uns 20 km d'altura, dins l'estratosfera, on és l'anomenada capa d'ozó, la qual ens protegeix de les radiacions ultraviolades del sol.

La capa d'ozó que s'estudiarà en aquest projecte, és la que es troba a la troposfera, així que aquest ozó és l'anomenat ozó troposfèric.

L'ozó troposfèric es un contaminant secundari, no es emès directament a l'atmosfera per una font, sinó que es format a partir de reaccions químiques entre contaminants primaris. Els principals precursors del ozó s'emeten de manera natural o com a conseqüència d'activitats humanes, com pot ser el transport d'energia per les línies elèctriques.

L'ozó en concentracions de  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pot produir efectes sobre la salut pública, i en concentracions al voltant de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pot tindre incidència sobre determinats cultius.

### **7.2.1 Impacte sobre les persones de l'ozó.**

L'ozó troposfèric és un potent oxidant que produeix efectes adversos a la salut humana. Diversos estudis a curt termini, mostren que concentracions de  $\text{O}_3$ , tenen efectes adversos en la funció respiratòria, causant inflamació pulmonar, insuficiència respiratòria, asma i altres malalties broncopulmonars, també pot produir irritació ocular, disminució de rendiment i símptomes de mal estar general com cansament, mal de cap i efectes semblants.

Diverses investigacions han mostrat que la mortalitat diària s'incrementa amb l'augment d'exposició d'ozó. També existeixen proves que vinculen l'exposició d'ozó, a llarg termini, amb majors efectes del que es pensava en relació de la salut reproductiva i de mortalitat. Cal destacar que l'Agència Internacional contra el Càncer (IARC), a classificat aquesta contaminació ambiental com a cancerígena de nivell 1, és a dir el nivell més alt de classificació.

Aquest ozó en l'ambient pot reaccionar amb altres components, produint contaminants de curta duració, però que resulten altament irritants i que tenen efectes sobre la salut, per exemple si

tenim humitat, l'ozó reacciona i produeix àcid nítric, del qual parlarem en l'apartat següent (7.3).

Es sap que, en cas d'exercici físic, per una concentració d'ozó de  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en dues hores, la capacitat pulmonar pot disminuir un 5%.

### **7.2.2 Impacte sobre el medi ambient de l'ozó.**

Alts nivells d'ozó, poden afectar a la vegetació, perjudicant la reproducció i el creixement de les plantes, el que porta a la reducció de la biodiversitat, disminució del creixement de boscos i reducció del rendiment dels cultius agrícoles. L'ozó disminueix el procés de fotosíntesis, reduint l'absorció del diòxid de carboni per la planta.

L'impacte als cultius agrícoles causats per l'ozó, són un problema significatiu en el sud d'Europa, que pot arribar a ser catastròfic per el sector agrícola. L'impacte per l'ozó pot reduir tant el rendiment del cultiu i la qualitat, com el valor de la collita. Hi ha cultius més sensibles a l'ozó, com el cotó, l'enciam i els tomàquets. L'efecte de l'ozó a les plantes varia en funció de diversos factors, com l'edat, els nivells de llum, la humitat o les condicions del sòl.

Noves evidències científiques suggereixen que l'ozó i el nitrogen poden tindre efectes sinèrgics<sup>9</sup> i antagònics<sup>10</sup> sobre la salut de les espècies i els processos dels ecosistemes, i poden interactuar de manera imprevisible, afectant a les comunitats vegetals.

Cal destacar que l'ozó es considera com el tercer gas en importància de l'efecte hivernacle, després del diòxid de carboni i del metà.

---

<sup>9</sup> Fenomen pel qual actuen en conjunt diversos factors, observen així un efecte.

<sup>10</sup> Conseqüència de una substància química que contraresta l'efecte de un altre.

### **7.3 Impacte de l'àcid nítric.**

L'àcid nítric a les línies elèctriques es produeix a causa de les emissions d'ozó juntament amb presència de la humitat.

L'àcid nítric és un líquid incolor o groguenc, amb una olor molt sufocant, molt corrosiu i molt soluble a l'aigua. El seu color groguenc es degut a l'alliberació d'òxids de nitrogen, especialment el diòxid de nitrogen, al aire després de l'exposició a la llum. L'àcid nítric pot formar una boira fotoquímica de la reacció d'òxid nítric e hidrocarburs, i és un dels àcids que componen la pluja àcida.

#### **7.3.1 Impacte sobre les persones de l'àcid nítric.**

L'àcid nítric en exposicions molt llargues pot provocar tos i sequedat en el nas i el coll, en grans concentracions pot provocar laringospasmes<sup>11</sup>, i obstrucció de les vies respiratòries i fins i tot la mort.

Aquest tipus d'àcid també afecta al sistema cardiovascular, produint shocks, insuficiència cardíaca i lesions isquèmiques<sup>12</sup>, també pot produir lesions al sistema gastrointestinal, produint gastritis<sup>13</sup>, gastritis hemorràgica i cremades gàstriques i a l'esòfag, té efectes sobre el sistema renal, podent produir una fallada renal.

Un dels impactes més típic pel àcid nítric són en el sistema dèrmic i ocular, ja que pot produir cremades profundes a la pell, i a les membranes de les mucoses, el contacte amb vapors i fums menys concentrats, pot produir inflamació i dolors per cremades a la pell, en el tema del sistema ocular, pot produir cremades greus als ulls, creant perforacions al globus ocular i per conseqüència la ceguera, per concentracions baixes pot produir llagimeig, inflamació, enrogiment i tancament involuntari de les parpelles.

---

<sup>11</sup> Reflex exagerat i prolongat del tancament de la laringe.

<sup>12</sup> Lesió d'un teixit per falta d'irrigació sanguínia.

<sup>13</sup> Inflamació de la mucosa de l'estomac.

### **7.3.2 Impacte sobre el medi ambient de l'àcid nítric.**

L'àcid nítric té un impacte sobre el medi ambient, ja que és un líquid corrosiu, produeix la degradació en fauna i sobre les plantes, és un dels àcids presents a la pluja àcida.

En cas d'infiltració en aigües subterrànies, aquesta no pot catalogar-se com aigua potable, per alt contingut de nitrats, així que pot afectar també a la fauna marina, i té més repercussió en aquesta, també pot produir incendis, encara que no sigui un líquid inflamable, en entrar en contacte amb altres substàncies, pot produir explosions i petits focs.

### **7.4 Altres impactes.**

Després d'estudiar els impactes més greus en els apartats anteriors, els altres impactes que pot tenir l'efecte corona, té un sentit més estètic o menys important sobre les persones i el medi ambient, també de forma general produeix òxids de nitrogen, que també són gasos corrosius i bastant importants per ser molt tòxics, encara que no es produeix en grans quantitats.

L'impacte estètic es deu a que hi ha molts paisatges que estan afectats per les línies elèctriques, encara que les persones ja estem acostumades a aquest tipus d'impacte, això és un problema per zones protegides, o paisatges dins de parcs naturals, amb especial interès turístic, aquest impacte estètic té difícil solució, ja que és difícil proposar un altre tipus de transport d'energia, i des de fa temps provoca enfrontaments entre les companyies elèctriques i la població.

Un altre impacte és el soroll audible que provoca l'efecte corona, això pot ser una molèstia per els animals que viuen a prop de línies elèctriques, o a les persones que resideixen a prop.

Encara que existeix una distància de seguretat, definida pel reglament de les línies aèries d'alta tensió (Industria, 2008), l'efecte o l'impacte del soroll audible depèn de la proximitat de d'instal·lació i del receptor, i del temps d'exposició.

Per últim també es pot definir com a impacte sobre el medi en el que passa la línia, que quan es comença a construir la línia, es creen camins forestals, es modifica el relleu del terreny, es produeix una tala de vegetació, això afecta al medi en el que transcorre la línia, ja que el paisatge es veu modificat per l'home.



## 8. Programa de càlcul de les pèrdues per l'efecte corona.

En el capítol següent, es presenta l'eina de càlcul que s'ha realitzat per trobar les pèrdues per efecte corona més fàcils i senzilles, ja que amb la introducció d'algunes dades de la línia, automàticament s'obtenen els resultats de pèrdues, és a dir, que tot el càlcul realitzat al capítol 5, es simplifica en aquest full de càlcul.

El software o programa realitzat s'ha fet mitjançant Microsoft Excel, el qual esta compost de cinc pestanyes o subapartats, on en un dels apartats següents (8.2), es mostrà quin és el criteri de funcionament del programa per què doni els resultats correctes

### 8.1 Característiques i variacions del programa.

El programa, tal i com s'ha dit, esta realitzat mitjançant Microsoft Excel, què és una potent eina de càlcul, molt útil per introduir moltes formules diferents i programar, entre altres funcions més específiques.

S'ha de diferenciar entre 4 tipus de programes què s'han realitzat, que són:

- **Càlcul\_efecte\_corona\_línia\_simple\_capa:** Aquest tipus de programa calcula, per línies d'un sol conductor per fase, i per una configuració capa dels conductors (Figura 8-1), les pèrdues per efecte corona pel mètode de Peek, llarg i simplificat.
- **Càlcul\_efecte\_corona\_línia\_feix\_capa:** Aquest tipus de programa calcula, per línies en feix, és a dir, més d'un sol conductor per fase, i per configuració capa dels conductors, les pèrdues per efecte corona pel mètode de Peek, llarg i simplificat.
- **Càlcul\_assaig\_laboratori\_simple:** Aquest tipus de programa, està fet per comparar les dades que s'han obtingut en l'apartat 6, ja que només dona pèrdues per una sola fase, ja que les altres, representa que no tenen tensió, tal i com teníem la bancada del laboratori, amb alimentació monofàsica, i es per un sol conductor.



- **Càlcul\_assaig\_laboratori\_feix:** Aquest es l'últim tipus de programa realitzat, que al igual que l'anterior, serveix per comparar les dades que s'han obtingut en l'apartat 6, a causa de que només s'alimenta per una fase, és a dir, amb alimentació monofàsica igual que la bancada de laboratori, però aquest programa es per conductors en feix.

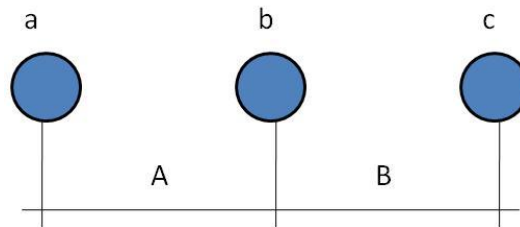


Figura 8-1 Configuració en capa dels conductors.

El nostre programa, tots tenen la mateixa estructura, consta de 5 subapartats, els quals destaquen:

- Introducció de dades i resultats
- Mètode del Gradient.
- Càlcul de tensions crítiques.
- Càlcul efecte corona Peek llarg.
- Càlcul efecte corona Peek simplificat.

Tots aquests subapartats, s'expliquen a l'apartat següent (8.2), on s'explica, pas a pas el funcionament del programa.

## 8.2 Funcionament del programa.

En aquest apartat es fa l'explicació de com és el funcionament del programa, encara que existeixen 4 variacions o tipus de programes diferents, només es farà el funcionament d'un sol, ja que els demes funcionen igual, l'única diferència respecte el simple i el de feix, es que el nº de conductors per feix, en el simple sempre serà 1, i en el de feix serà de 2 cap amunt. I exactament igual per els programes referents als assaigs de laboratori.

Es farà l'explicació per subapartats, anomenats a l'apartat anterior (8.1), i tot esta representat per taules, ja que el programa utilitzat funciona amb cel·les.

- **Introducció de dades i resultat.**

On la visió general d'aquest subapartat es pot veure a la Figura 8-2.

The screenshot displays a software interface for calculating corona losses. It is divided into several sections:

- DADES DE LA LÍNIA a introduir:** A table where line parameters are entered. Values include: Alçada dels conductors (m): 14; Diàmetre del conductor (mm): 25,38; Nº de conductors per feix: 2; Distància entre conductors del feix (m): 0,25; α per conductors al-ac, segons taula 2: 0,809; Distància entre fases (m): 10; Tensió de línia (kV): 400; Coeficient d'estat del conductor, Ks (0,83-1): 0,9; Coeficient de mediambient, Kc (0,8-1): 0,9; Alçada respecte el nivell del mar (m): 250; Temperatura (°C): 20; Tensió més elevada de la línia, segons Taula 1, Un (kV): 420; Distància de línia (km): 255.
- DADES DE LA LÍNIA calculades:** A table showing calculated parameters: DMGab (mm): 10000; DMGbc (mm): 10000; DMGca (mm): 20000; DMG (mm): 12599; Rad (mm): 12,69; distància entre conductors del feix (mm): 250; radi del feix (mm): 125; RMG feix (mm): 50,66; δ factor de densitat del aire: 0,9863.
- Configuració dels conductors (CAPA):** A diagram showing three conductors labeled a, b, and c, with phase labels A and B.
- RESULTATS DE PÈRDUES TOTALS:** A table with results: Mètode de Peek (llarg) (kW/km): 5,05; Mètode de Peek (llarg) (kW): 1287,58; Mètode de Peek (simplificat) (kW/km): 0,50; Mètode de Peek (simplificat) (kW): 127,81.
- RESULTATS DE TENSIONS CRÍTQUES:** A table with results: |Uc1 (kV): 326,4; |Uc2 (kV): 308,5; |Uc3 (kV): 326,4; Uc (kV) (mètode simplificat): 237,1.
- RESULTATS DE GRADIENTS:** A table with results: Emig1 (kV/cm): 24,2; Emig2 (kV/cm): 25,6; Emig3 (kV/cm): 24,2; Emax1 (kV/cm): 26,4; Emax2 (kV/cm): 28,1; Emax3 (kV/cm): 26,4; Ec (kV/cm): 24,0; Ev (kV/cm): 39,4.
- Tabla 1. Tensiones nominales y tensiones mas elevadas de la red:** A table with two columns: TENSION NOMINAL DE LA RED (Un) kV and TENSION MAS ELEVADA DE LA RED (Ua) kV. Values range from 3 to 420 kV.
- Tabla 2. alpha per conductors al-ac:** A table with columns for material (Alumini, Acero) and number of wires (N. capas, N. fila), and a column for alpha. Values range from 0,276 to 0,908.

Figura 8-2 Subapartat d'introducció de dades i resultats del programa de càlcul de pèrdues per efecte corona.

On les dades de la línia a introduir són les representades a la Taula 8-1.

DADES DE LA LÍNIA a introduir	
Alçada dels conductors (m)	14
Diàmetre del conductor (mm)	25,38
Nº de conductors per feix	2
Distància entre conductors del feix (m)	0,25
α per conductors al-ac, segons taula 2	0,809
Distància entre fases (m)	10
Tensió de línia (kV)	400
Coeficient d'estat del conductor, Ks (0,83-1)	0,9
Coeficient de mediambient, Kc (0,8-1)	0,9
Alçada respecte el nivell del mar (m)	250
Temperatura (°C)	20
Tensió més elevada de la línia, segons Taula 1, Un (kV)	420
Distància de línia (km)	255

Taula 8-1 Introducció de les dades de la línia.

Aquestes dades o cel·les de color verd de la Taula 8-1, són les que l'usuari del programa ha de variar, és important saber que aquestes dades són les úniques que es poden modificar en tot el programa, es donen directament, sense cap tipus de càlcul, serien les dades que ens proporcionaria el propietari de la línia, i en el cas del conductor, el fabricant d'aquest, a partir d'aquí, tot el programa fa els càlculs automàticament.

Les dades de la tensió més elevada de la línia i del coeficient  $\alpha$  per a conductors de alumini-acer, es troben a la Taula 8-2 i Taula 8-3.

TENSIO NOMINAL DE LA XARXA ( $U_n$ ) kV	TENSIÓ MÉS ELEVADA DE LA XARXA ( $U_s$ ) kV
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20*	24
25	30
30	36
45	52
66*	72,5
110	123
132*	145
150	170
220*	245
400*	420

Taula 8-2 Tensió més elevada de la línia, segons (Industria, 2008).

<i>Alumini</i>		<i>Acer</i>		<i>a</i>
<i>N. capes</i>	<i>N. fils</i>	<i>N. capes</i>	<i>N. fils</i>	
2	18	1	1	0,776
2	26	2	7	0,811
2	30	2	7	0,826
2	30	3	19	0,827
3	30	3	19	0,827
3	54	2	7	0,809
3	54	3	19	0,808
4	76	3	19	0,793

Taula 8-3 Valor del coeficient  $\alpha$ , per conductors d'alumini-acer.

Seguidament en el subapartat d'introducció de dades i resultats, tenim un àrea, representada a la Taula 8-4, on es calculen dades de la línia, que depenen de les dades introduïdes a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, i de la geometria de la línia, segons Figura 8-1 i que són, les distàncies mitjanes geomètriques (DMG), el radi mig geomètric (RMG) i el factor de densitat del aire ( $\delta$ ).

<b>DADES DE LA LÍNIA calculades</b>	
DMG <sub>ab</sub> (mm)	10000
DMG <sub>bc</sub> (mm)	10000
DMG <sub>ca</sub> (mm)	20000
<b>DMG (mm)</b>	<b>12599</b>
Radi (mm)	12,69
distància entre conductors del feix (mm)	250
radi del feix (mm)	125
<b>RMG feix (mm)</b>	<b>50,66</b>
<b><math>\delta</math> factor de densitat del aire</b>	<b>0,9863</b>

Taula 8-4 Dades de la línia calculades, a partir de les dades introduïdes.

Després d'introduir les dades de la línia i de que es calculin les altres, per tal de poder continuar amb tot el procés de càlcul, en aquest subapartat també es mostra un resum de totes les dades obtingudes, així com les pèrdues per el mètode de Peek, tant el mètode llarg, com el

simplificat, tots els gradients mitjos, màxims, crítics i visuals, així com les tensions críiques disruptives, es pot veure un exemple a la Taula 8-5

<b>RESULTATS DE PÈRDUES TOTALS</b>	
Mètode de Peek (llarg) (kW/km)	5,05
Mètode de Peek (llarg) (kW)	1287,58
Metode de Peek (simplificat) (kW/km)	0,50
Metode de Peek (simplificat) (kW)	127,81
<b>RESULTATS DE TENSIONS CRÍTIQUES</b>	
Uc1  (kV)	326,4
Uc2  (kV)	308,5
Uc3  (kV)	326,4
Uc (kV) (mètode simplificat)	237,1
<b>RESULTATS DE GRADIENTS</b>	
Emig1 (kV/cm)	24,2
Emig2 (kV/cm)	25,8
Emig3 (kV/cm)	24,2
E <sub>max</sub> 1 (kV/cm)	26,4
E <sub>max</sub> 2 (kV/cm)	28,1
E <sub>max</sub> 3 (kV/cm)	26,4
E <sub>c</sub> (kV/cm)	24,0
E <sub>v</sub> (kV/cm)	30,4

Taula 8-5 Resum de resultats de pèrdues, tensions i gradients.

- **Mètode del gradient.**

A continuació es veu el segon subapartat del programa, el qual dona tots els resultats automàtics, ja que tot el programa depèn de les dades del primer subapartat. Aquest apartat té el nom de mètode del gradient, ja que aquest subapartat té la finalitat de donar el resultat dels gradients mitjos i màxim, així com totes les dades oportunes per trobar aquests, podem veure la representació del segon subapartat a la Figura 8-3.

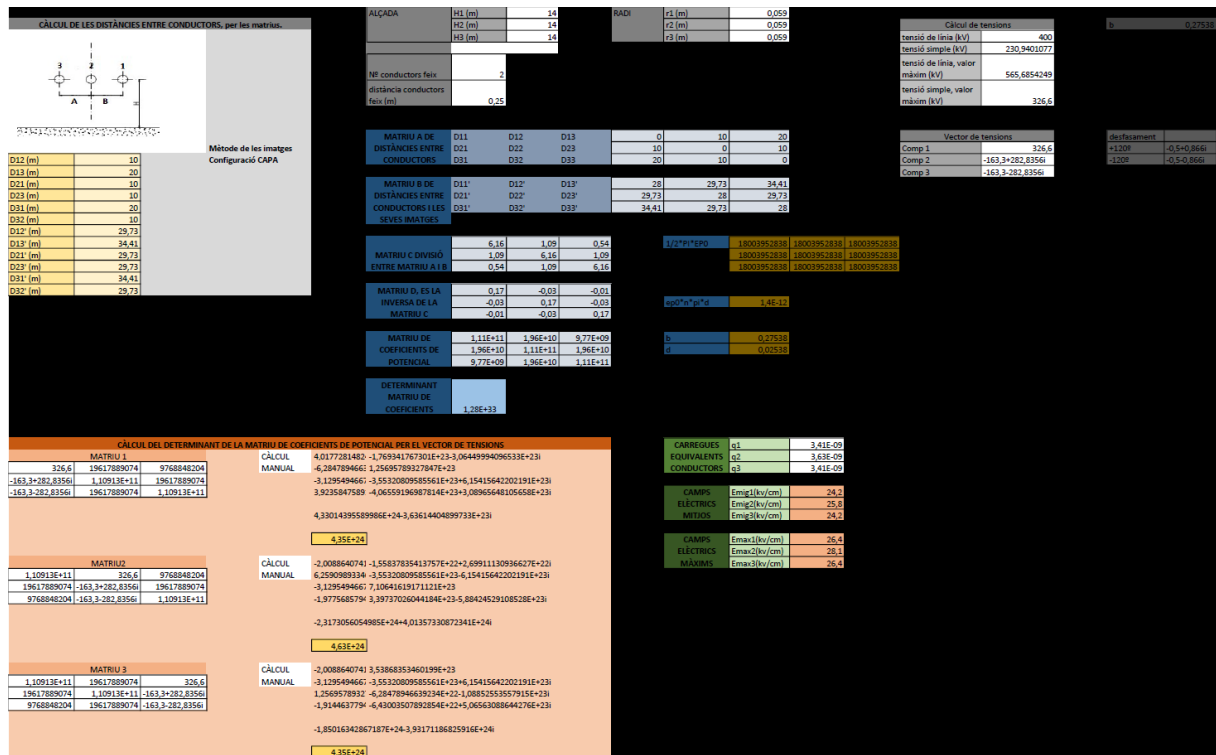
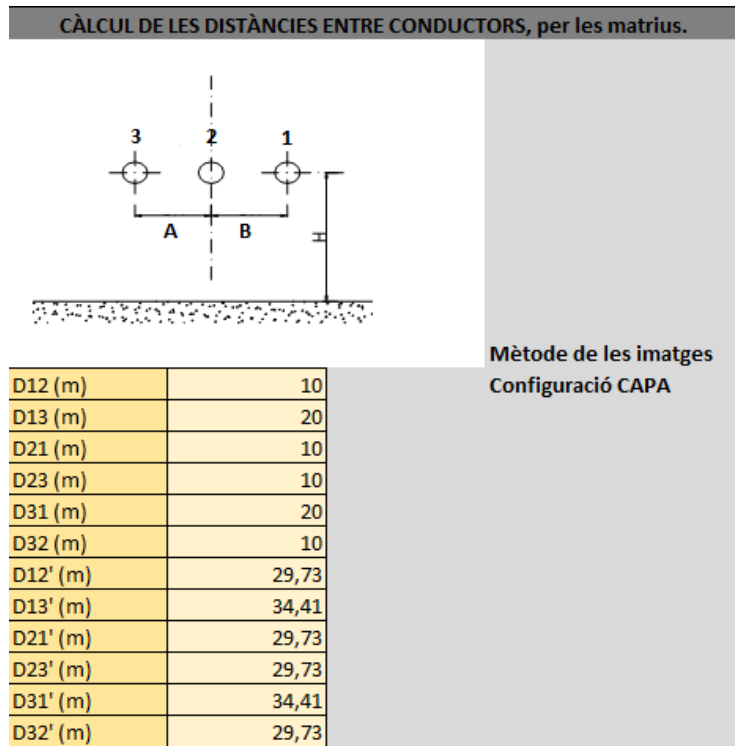


Figura 8-3 Subapartat del mètode dels gradients, del programa de càlcul de les pèrdues per efecte corona.

Primer de tot el programa fa el càlcul de les distàncies per tal d'obtenir la matriu de distàncies, i la matriu de les imatges, per poder trobar la matriu de coeficients de potencial. El càlcul de les distàncies es pot veure a la Taula 8-6.



Taula 8-6 Taula de distàncies entre conductors i aquests i les seves imatges, per configuració capa.

Després d'obtenir totes les distàncies, s'obtenen directament totes les matrius de distàncies entre conductors, de distàncies entre conductors i a les imatges, de coeficients de potencial i el seu determinant, i altres dades importants, i es pot veure a la Taula 8-7.

<b>MATRIU A DE DISTÀNCIES ENTRE CONDUCTORS</b>	D11	D12	D13	0	10	20
	D21	D22	D23	10	0	10
	D31	D32	D33	20	10	0
<b>MATRIU B DE DISTÀNCIES ENTRE CONDUCTORS I LES SEVES IMATGES</b>	D11'	D12'	D13'	28	29,73	34,41
	D21'	D22'	D23'	29,73	28	29,73
	D31'	D32'	D33'	34,41	29,73	28
<b>MATRIU C DIVISIÓ ENTRE MATRIU A I B</b>	6,16	1,09	0,54	$1/2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0$	18003952838	18003952838
	1,09	6,16	1,09		18003952838	18003952838
	0,54	1,09	6,16		18003952838	18003952838
<b>MATRIU D, ES LA INVERSA DE LA MATRIU C</b>	0,17	-0,03	-0,01	$\epsilon_0 \cdot n \cdot \pi \cdot d$	1,4E-12	
	-0,03	0,17	-0,03			
	-0,01	-0,03	0,17			
<b>MATRIU DE COEFICIENTS DE POTENCIAL</b>	1,11E+11	1,96E+10	9,77E+09	b	0,27538	
	1,96E+10	1,11E+11	1,96E+10	d	0,02538	
	9,77E+09	1,96E+10	1,11E+11			
<b>DETERMINANT MATRIU DE COEFICIENTS</b>	1,28E+33					

Taula 8-7 Matrius de distàncies entre conductors, entre aquests i les seves imatges i de coeficients de potencials, juntament amb les dades necessàries.

Per realitzar el càlcul de totes aquestes matrius es fa servir dades complementaries, com l'alçada, el radi o la distància entre els conductors del feix i el número de subconductors del feix, les quals estan representades a Taula 8-8, i es completen automàticament amb la introducció de dades del primer subapartat.

ALÇADA	H1 (m)	14	RADI	r1 (m)	0,059
	H2 (m)	14		r2 (m)	0,059
	H3 (m)	14		r3 (m)	0,059
Nº conductors feix	2				
distància conductors feix (m)	0,25				

Taula 8-8 Dades complementaries pel càlcul de la matriu de coeficients de potencial i per completar càlculs del mètode del gradient.

Després de trobar la matriu de coeficient de potencials, s'ha de trobar les càrregues equivalents per cada conductor, però abans s'ha de calcular el vector de tensions, que es fa a la Taula 8-9.

Càlcul de tensions		b		0,27538
tensió de línia (kV)	400			
tensió simple (kV)	230,9401077			
tensió de línia, valor màxim (kV)	565,6854249			
tensió simple, valor màxim (kV)	326,6			
Vector de tensions		desfasament		
Comp 1	326,6	+120º	-0,5+0,866i	
Comp 2	-163,3+282,8356i	-120º	-0,5-0,866i	
Comp 3	-163,3-282,8356i			

Taula 8-9 Càlcul del vector de tensions.

Després de trobar el vector de tensions, multiplicarem aquest, per la matriu de coeficients de potencial, per trobar les càrregues equivalents de cada conductor o fase.



Es farà el càlcul de tres matrius, formades per el vector de tensions i la matriu de potencials, i calcularem els seus determinants, es pot veure el procediment de càlcul del programa a la Taula 8-10.

CÀLCUL DEL DETERMINANT DE LA MATRIU DE COEFICIENTS DE POTENCIAL PER EL VECTOR DE TENSIONS			
MATRIU 1			CÀLCUL
326,6	19617889074	9768848204	4,0177281482 -1,769341767301E+23-3,06449994096533E+23i
-163,3+282,8356i	1,10913E+11	19617889074	MANUAL -6,284789466 1,25695789327847E+23
-163,3-282,8356i	19617889074	1,10913E+11	-3,129549466 -3,55320809585561E+23+6,15415642202191E+23i
			3,9235847589 -4,06559196987814E+23+3,08965648105658E+23i
			4,33014395589986E+24-3,63614404899733E+23i
			4,35E+24
MATRIU 2			CÀLCUL
1,10913E+11	326,6	9768848204	-2,008864074 -1,55837835413757E+22+2,69911130936627E+22i
19617889074	-163,3+282,8356i	19617889074	MANUAL 6,2590989334 -3,55320809585561E+23-6,15415642202191E+23i
9768848204	-163,3-282,8356i	1,10913E+11	-3,129549466 7,10641619171121E+23
			-1,977568579 3,39737026044184E+23-5,88424529108528E+23i
			-2,3173056054985E+24+4,01357330872341E+24i
			4,63E+24
MATRIU 3			CÀLCUL
1,10913E+11	19617889074	326,6	-2,008864074 3,53868353460199E+23
19617889074	1,10913E+11	-163,3+282,8356i	MANUAL -3,129549466 -3,55320809585561E+23+6,15415642202191E+23i
9768848204	19617889074	-163,3-282,8356i	1,2569578932 -6,28478946639234E+22-1,08852553557915E+23i
			-1,914463779 -6,43003507892854E+22+5,06563088644276E+23i
			-1,85016342867187E+24-3,93171186825916E+24i
			4,35E+24

Taula 8-10 Càlcul dels determinants de la matriu de coeficient de potencial pel vector de tensions.

Un cop trobats els determinants d'aquestes matrius, el programa procedeix al càlcul de les càrregues equivalents per cada fase, així com els camps elèctrics mitjos i màxim de cada una d'elles. Resultats expressats a la Taula 8-11.

CARREGUES EQUIVALENTS CONDUCTORS	q1	3,41E-09
	q2	3,63E-09
	q3	3,41E-09
CAMPS ELÈCTRICS MITJOS	Emig1(kv/cm)	24,2
	Emig2(kv/cm)	25,8
	Emig3(kv/cm)	24,2
CAMPS ELÈCTRICS MÀXIMS	Emax1(kv/cm)	26,4
	Emax2(kv/cm)	28,1
	Emax3(kv/cm)	26,4

Taula 8-11 Càrregues equivalents, gradients mitjos i màxims per cada fase.

- Càlcul de tensions crítiques.

En aquest subapartat, es calculen les tensions crítiques per cada fase del mètode llarg de Peek, es pot veure l'esquema a la Figura 8-4

MATRIU DE COEFICIENTS DE POTENCIAL	1,11E+11	1,96E+10	9,77E+09
	1,96E+10	1,11E+11	1,96E+10
	9,77E+09	1,96E+10	1,11E+11
desfasament	+120º	-0,5+0,866i	
	-120º	-0,5-0,866i	
Ec (kV/cm)	24,0		
qi	3,38E-09		
q1	3,38E-09		
q2	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
q3	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
<b>Tensor de càrregues</b>			
comp 1	3,37876E-09		
comp 2	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
comp 3	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
<b>TENSIONS CRÍTQUES RESPECTE FASE 1</b>			
Uc11	374,747664986181		
Uc12	-33,1420242485565-57,4019859984999i		
Uc13	-16,5032742732601+28,5836710412865i		
<b>TENSIONS CRÍTQUES RESPECTE FASE 2</b>			
Uc21	66,284048497113		
Uc22	-187,37383249309-324,531477878033i		
Uc23	-33,1420242485565+57,4019859984999i		
<b>TENSIONS CRÍTQUES RESPECTE FASE 3</b>			
Uc31	33,0065485465203		
Uc32	-33,1420242485565-57,4019859984999i		
Uc33	-187,37383249309+324,531477878033i		
<b>TENSIO CRÍTICA 1</b>			
Uc1	325,102366464364-28,8183149572134i		
Uc1	326,4		
<b>TENSIO CRÍTICA 2</b>			
Uc2	-154,231808244533-267,129491879533i		
Uc2	308,5		
<b>TENSIO CRÍTICA 3</b>			
Uc3	-187,509308195126+267,129491879533i		
Uc3	326,4		

Figura 8-4 Subapartat del càlcul de les tensions crítiques, del programa de càlcul de les pèrdues per efecte corona.

Primer de tot es calcularà el vector de càrregues, on la  $q_i$  es calcularà mitjançant el gradient crític, i seguidament amb els desfasaments es calcularà el vector de càrregues, els resultats es mostren a la Taula 8-12, on tot es fa de forma automàtica.

MATRIU DE COEFICIENTS DE POTENCIAL	1,11E+11	1,96E+10	9,77E+09
	1,96E+10	1,11E+11	1,96E+10
	9,77E+09	1,96E+10	1,11E+11
desfasament	+120º	-0,5+0,866i	
	-120º	-0,5-0,866i	
Ec (kV/cm)	24,0		
qi	3,38E-09		
q1	3,38E-09		
q2	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
q3	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
<b>Tensor de càrregues</b>			
comp 1	3,37876E-09		
comp 2	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		
comp 3	-1,68937769619314E-09+2,92600216980652E-09i		

Taula 8-12 Càlcul del vector de tensions, juntament amb el gradient crític.

A la Taula 8-12, també està la matriu de coeficients de potencial, ja que es fa servir per trobar les diferents tensions crítiques respecte les diferents fases.

A continuació, es procedeix al càlcul de les tensions crítiques, respecte cada fase, i després el resultat del mòdul de cada tensió crítica de cada fase. Aquests resultats es mostren a la Taula 8-13

TENSIONS CRÍTiques RESPECTE FASE 1		TENSIO CRÍTICA 1	
Uc11	374,747664986181		
Uc12	-33,1420242485565-57,4019859984999i	Uc1	325,102366464364-28,8183149572134i
Uc13	-16,5032742732601+28,5836710412865i	Uc1  (kV)	326,4
TENSIONS CRÍTiques RESPECTE FASE 2		TENSIO CRÍTICA 2	
Uc21	66,284048497113		
Uc22	-187,37383249309-324,531477878033i	Uc2	-154,231808244533-267,129491879533i
Uc23	-33,1420242485565+57,4019859984999i	Uc2  (kV)	308,5
TENSIONS CRÍTiques RESPECTE FASE 3		TENSIO CRÍTICA 3	
Uc31	33,0065485465203		
Uc32	-33,1420242485565-57,4019859984999i	Uc3	-187,509308195126+267,129491879533i
Uc33	-187,37383249309+324,531477878033i	Uc3  (kV)	326,4

Taula 8-13 Càlcul de les tensions crítiques.

#### - Càlcul efecte corona Peek llarg.

En aquest subapartat es procedirà al càlcul de les pèrdues per efecte corona de la línia, així com el càlcul del gradient crític, calculat al subapartat anterior i del gradient crític visual.

Es pot veure l'esquema i la distribució del subapartat a la Figura 8-5

CÀLCUL DELS GRADIENTS CRÍTICS I VISUAL DE L'EFECTE CORONA			
Ks (rug; 0,83 - 1)	0,9	δ factor de densitat del aire	0,9863
Kc (hum; 0,8 - 1)	0,9	Ec (kV/cm)	24,0
radi (mm)	12,69	Ev (kV/cm)	30,4
DMG (mm)	12599	E <sub>max1</sub> (kV/cm)	26,4
RMG (mm)	50,66	E <sub>max2</sub> (kV/cm)	28,1
alçada respecte nivell del mar (m)	250	E <sub>max3</sub> (kV/cm)	26,4
temperatura (°C)	20		
CÀLCUL DE LES PÈRDUES PER EFECTE CORONA			
Uc1 (kV. eficaç)	230,8		
Uc2 (kV. eficaç)	218,1		
Uc3 (kV. eficaç)	230,8		
Tensió més elevada de la línia, Un (kV)	420		
P1(kW/km)	0,80	Només es calculen les pèrdues si el valor de E <sub>max</sub> > Ec	
P2(kW/km)	3,46		
P3(kW/km)	0,80		
P(kW/km) totals	5,05		
P(kW) totals	1287,58		

Figura 8-5 Subapartat del càlcul de les pèrdues per efecte corona amb el mètode de Peek llarg, del programa de càlcul de les pèrdues per efecte corona.

On primer de tot es fa una recopilació de dades dels altres subapartats, i es calcula el gradient crític visual, ja que el gradient crític es calcula al subapartat anterior, del càlcul de tensions crítiques.

Es pot veure els resultats a la Taula 8-14.

CÀLCUL DELS GRADIENTS CRÍTICS I VISUAL DE L'EFECTE CORONA					
Ks (rug; 0,83 - 1)	0,9	δ factor de densitat del aire	0,9863	Ec (kV/cm)	24,0
Kc (hum; 0,8 - 1)	0,9			Ev (kV/cm)	30,4
radi (mm)	12,69			E <sub>max1</sub> (kV/cm)	26,4
DMG (mm)	12599			E <sub>max2</sub> (kV/cm)	28,1
RMG (mm)	50,66			E <sub>max3</sub> (kV/cm)	26,4
alçada respecte nivell del mar (m)	250				
temperatura (°C)	20				

Taula 8-14 Càlcul de gradients crítics i visual.

Després el programa procedeix al càlcul de les pèrdues per efecte corona segons el mètode llarg de Peek, es calculen les tensions crítiques en valor eficaç, juntament amb les pèrdues per cada fase, més les totals en kW/km i les totals per la línia en kW, en la Taula 8-15.

CÀLCUL DE LES PÈRDUES PER EFECTE CORONA	
Uc1 (kV. eficaç)	230,8
Uc2 (kV. eficaç)	218,1
Uc3 (kV. eficaç)	230,8
Tensió més elevada de la línia, Un (kV)	420
P1(kW/km)	0,80
P2(kW/km)	3,46
P3(kW/km)	0,80
Només es calculen les pèrdues si el valor de E <sub>max</sub> > E <sub>c</sub>	
P(kW/km) totals	5,05
P(kW) totals	1287,58

Taula 8-15 Càlcul de les pèrdues per efecte corona, segons el mètode de Peek llarg.

- **Càlcul efecte corona Peek simplificat.**

Per últim, el subapartat del càlcul de les pèrdues per efecte corona pel mètode de Peek simplificat, es resumeix en una petita taula, Taula 8-16, on es calcula la tensió crítica disruptiva, les pèrdues totals per fase en kW/km, les pèrdues totals en kW/km i les pèrdues totals de la línia en kW.

CÀLCUL DE LA TENSIO CRITICA DISRUPTIVA (Uc)	237,1
PÈRDUES TOTALS PER FASE (kW/km)	0,17
PÈRDUES TOTALS (kW/km)	0,50
PÈRDUES TOTALS DE LA LÍNIA (kW)	127,81

**Taula 8-16 Càlcul de les pèrdues per efecte corona segons el mètode de Peek simplificat, en el programa de càlcul de pèrdues per efecte corona.**

Tal i com s'ha dit al apartat (8.1), el funcionament del programa es igual per totes les variacions d'aquest, l'única variació es que si es té una línia amb un sol conductor per fase, s'ha d'utilitzar la versió què es per conductors simples, i si la línia té conductors en feix, s'ha d'utilitzar la versió per conductor en feix.

El mateix cas per les versions per comprovar les dades o resultats del laboratori.

## 9. Propostes d'ampliació del projecte.

En aquest capítol, s'exposaran les propostes per ampliar aquest projecte, i els possibles camins per on s'ha d'aprofundir.

- Respecte al càlcul de les pèrdues per efecte corona, en aquest projecte només s'han calculat per una línia simple, a efectes pràctics, es proposa realitzar el càlcul per una línia doble, i també tenint en compte el conductor de terra.
- En el capítol dels assaigs al laboratori, tractar d'optimitzar la bancada per tal de millorar els resultats, ja sigui augmentant la longitud de la línia i les seves proporcions, així com fer l'estudi experimental, alimentant la bancada amb alimentació trifàsica, i no monofàsica com s'ha fet servir, és a dir, fer una bancada amb 3 fases i no només amb una sola fase, i millorar els instruments de mesura, sobretot la seva precisió.
- En referència a l'estudi al laboratori, mirar d'optimitzar la resistència limitadora i trobar una resistència que es sàpiga el seu comportament en tot moment, ja que la resistència limitadora utilitzada, té molta variabilitat i produïa més potència de pèrdues i d'una magnitud molt gran respecte la bancada.
- També en referència als assaigs del laboratori, verificar i estudiar les formes d'ona que té el corrent de pèrdues a la línia, mitjançant un oscil·loscopi, així com l'estudi dels seus valors per diferents configuracions.
- Per un futur projecte, seria interessant saber quin cost econòmic tenen les pèrdues per efecte corona a les companyies elèctriques, ja que és molt important optimitzar les línies, per tal de que siguin lo més eficients possibles, tant en l'àmbit de potència, com en l'àmbit econòmic.
- Referent al software de càlcul, fer un software per totes les configuracions possibles de conductors, on es pugui incloure diversos factors, com les pèrdues econòmiques per efecte corona, ja que en aquest projecte només s'ha realitzat el software per una sola configuració.



## Bibliografía

- Ambiental, Direcció General de Qualitat. 2012.** *Informe relatiu al comportament de l'ozó troposfèric a Catalunya.* Barcelona : Generalitat de Catalunya, 2012.
- Belmonte, Pedro. 2007.** *Los impactos ambientales de las líneas e infraestructuras eléctricas.* Murcia : Ecologistas en acción, 2007.
- Comber, M.G., Deno, D.W. i Zaffanella, L.E. 1975.** *Transmission Line Reference Book.* s.l. : Electric Power Research Institute, 1975.
- Gary, Claude. 1998.** *Effet couronne sur les réseaux électriques aériens.* Paris : s.n., 1998.
- Gary, Claude y Moreau, Marcel. 1977.** *L'effet de couronne en tension alternative.* Paris : Eyrolles, 1977. Vol. Direction des études et recherches d'Electricité de France (EDF).
- Hartwig, Dr. G. 1886.** *St. Elmo's Fire on Mast of Ship at Sea in The Aerial World.* NOAA Library Collection, London : 1886.
- Horta, Ricard y Candela, Iñaki. 2001.** *Teoria, càlcul i disseny de línies elèctriques.* Barcelona : Edicions UPC, 2001.
- Industria, Ministerio de. 2008.** *(RLAT) Reglamento de las líneas de alta tension.* Madrid : s.n., 2008.
- Industria, Ministerio de. 2016.** *Boletin Oficial del Estado BOE-A-2016-7303.* Madrid : s.n., 2016.
- Industria, Ministerio de. 2016.** *Real decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.* Madrid : Boletín oficial del estado, 2016.
- N. Tchernitchin, Dr. Andrei.** *Efectos de la Radiación Electromagnética sobre la Salud.*
- Peek, F.W. 1911.** *Law of Corona and the Dielectric Strenght of Air.* s.l. : AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, 1911.
- Peek, F.W. 1929.** *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering.* New York : McGraw-Hill, 1929.
- Peterson, W.S. 1933.** *AIEE Discuss. AIEE Transactions Power Apparatus and Systems.* 1933.
- Ras, Enrique. 1973.** *Teoría de la líneas eléctricas.* Barcelona : Universidad Politecnica de Barcelona, 1973.



**RLAT. 2008.** *Real Decreto 223/2008, Reglamento sobre las condiciones técnicas y garantías de seguridad en las líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 A 09.* s.l. : Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2008.

**Ryan, H.J i Henline, H.H. 1924.** *Hysteresis Character of Corona Formation.* s.l. : AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, 1924.

**Siegert, Luis. 1989.** *Alta tensión y sistemas de transmisión.* Caracas : Limusa, 1989.

**Simón, Pascual, y otros. 2011.** *Cálculo y diseño de líneas eléctricas de Alta tensión.* Madrid : ibergarceta, 2011.

**Tora, Jose Luis. 1997.** *Transporte de la energia electrica.* Madrid : Universidad Pontificia Comillas Madrid, 1997.

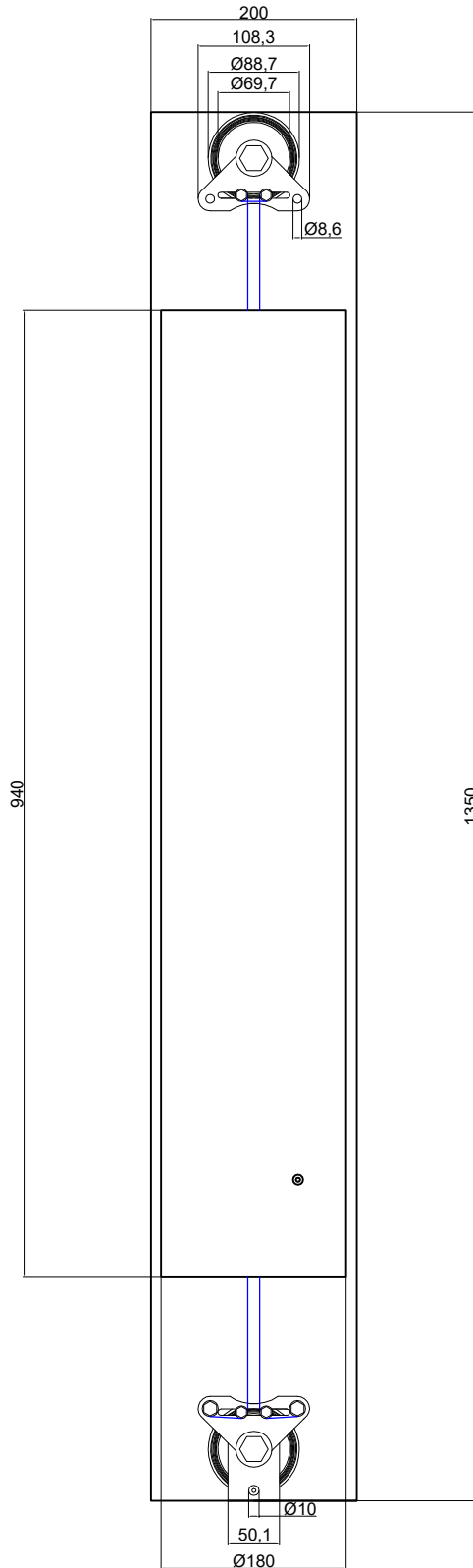
**Townsend, John Sealy. 1910.** *The Theory of Ionisation of Gases by Collision.* Oxford : s.n., 1910.


## **Annexos.**

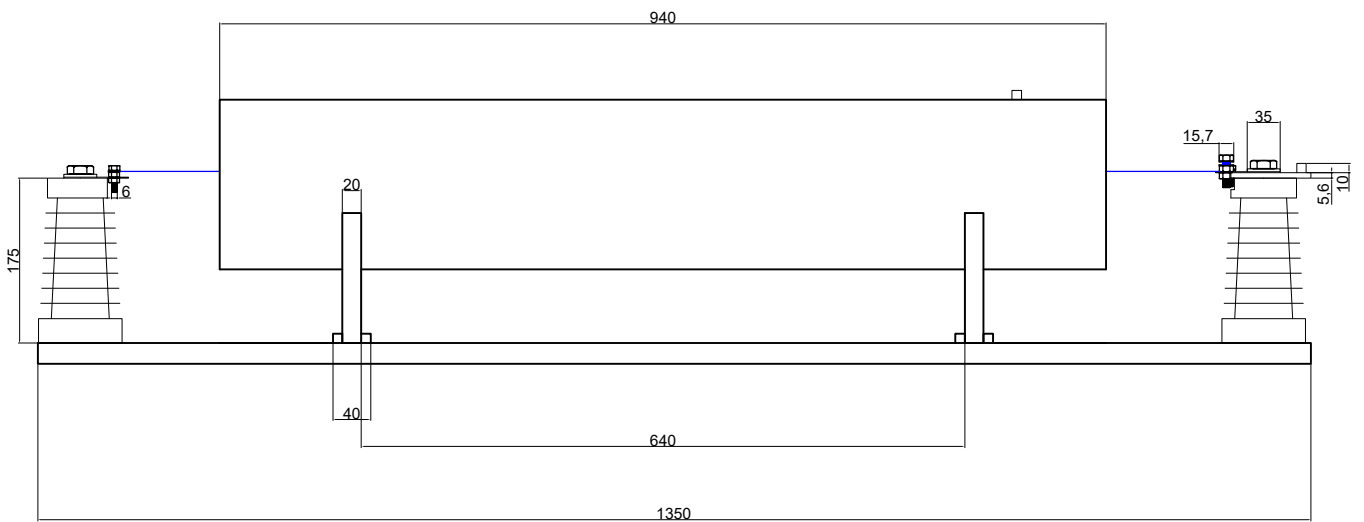
### **Annex I. Plànols**


En aquest annex es mostraran els plànols dels dos tipus de bancada de l'efecte corona utilitzats en els assaigs del capítol 6.

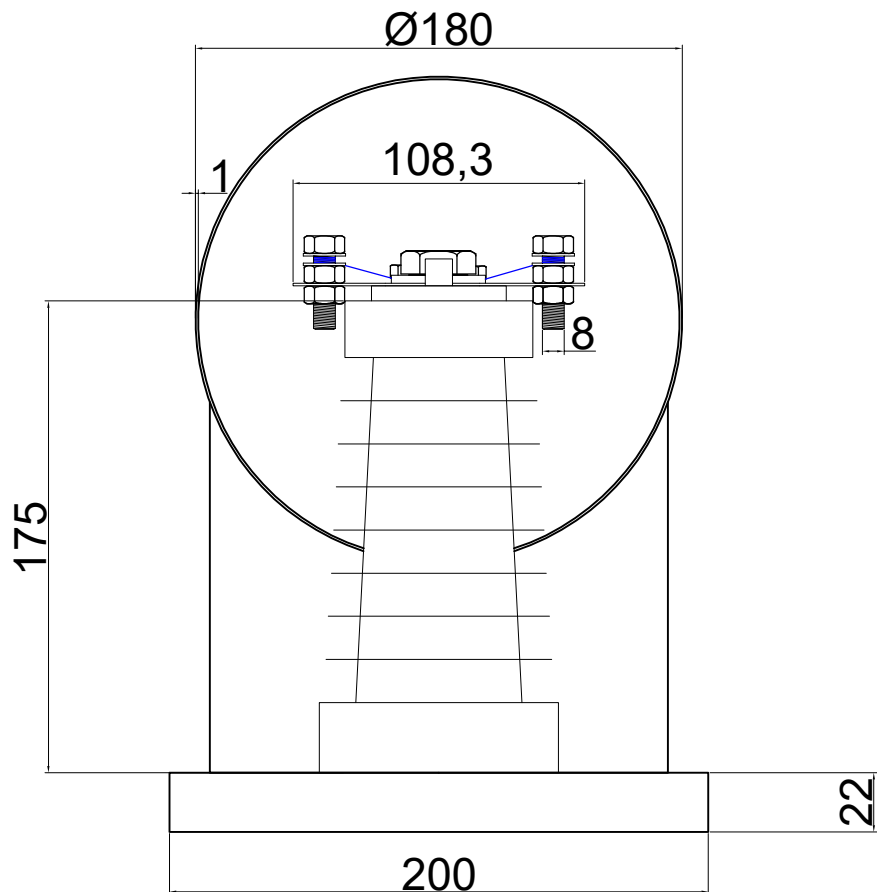
Tota la informació referent a cada plànol, està ubicada en el caixetí.




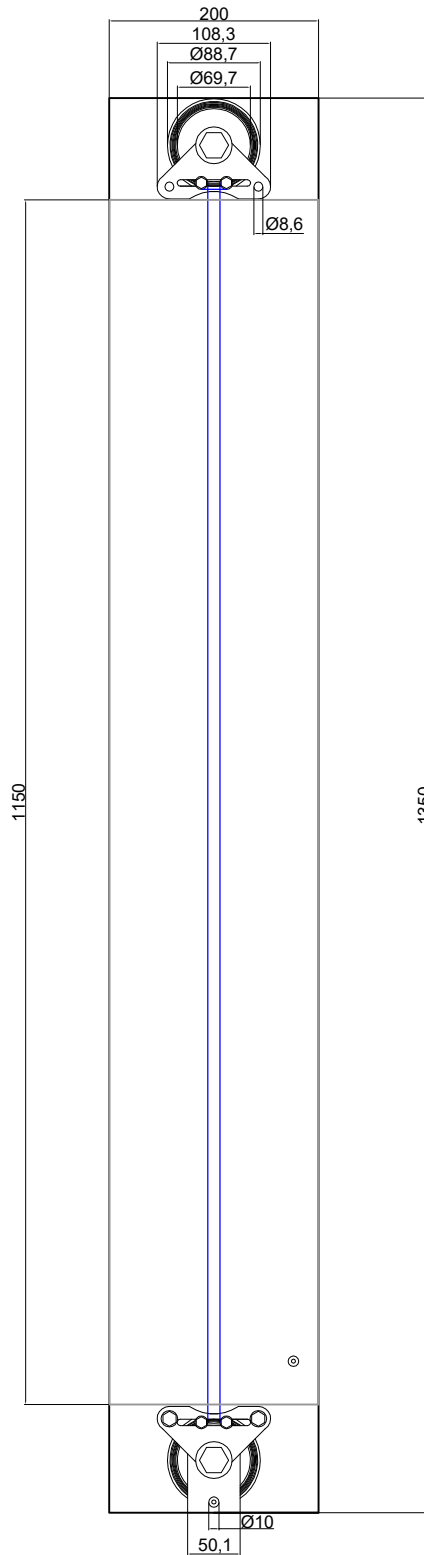
	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Firma:</i>	<b>ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA</b> 
<i>Dibuixat</i>	18/12/16	Xavi Corbi		
<i>Comprovat</i>				
		distàncies en mm.		
<i>Escala:</i>	<b>1:7</b>			<i>Plànol</i> planta - bancada amb tub
				<i>Alumne:</i> Xavi Corbi
				PFC- Efecte Corona




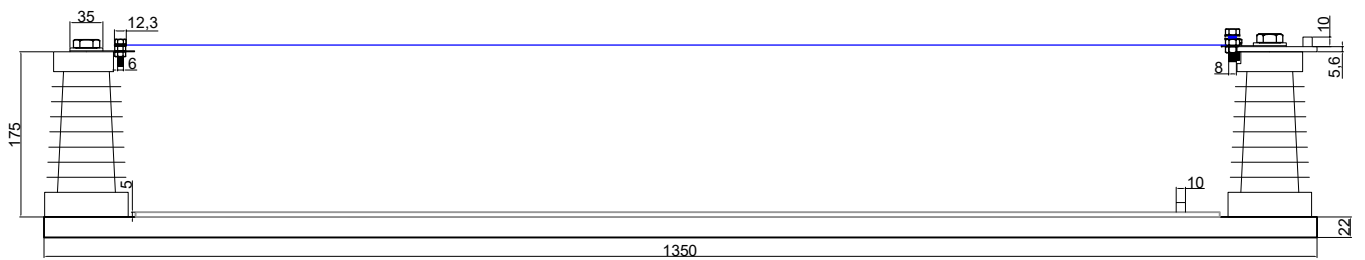
	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Firma:</i>	<i>ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA</i> 
<i>Dibuixat</i>	18/12/16	Xavi Corbi		
<i>Comprovat</i>				
		distàncies en mm.		
<i>Escala:</i>	<h1>1:8</h1>		<i>Plànol</i>	alçat- bancada amb tub
			<i>Alumne:</i> Xavi Corbi	
			PFC- Efecte Corona	




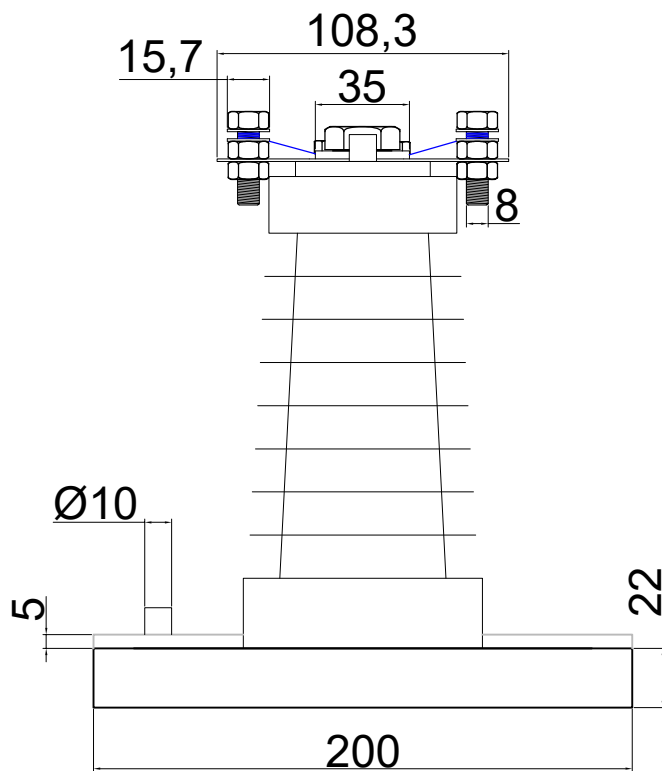
	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Firma:</i>	<i>ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA</i> 
<i>Dibuixat</i>	18/12/16	Xavi Corbi		
<i>Comprovat</i>				
		distàncies en mm.		
<i>Escala:</i>	<span style="font-size: 2em;">1:3</span>			<i>Plànol</i> perfil- bancada amb tub
				<i>Alumne:</i> Xavi Corbi PFC- Efecte Corona




	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Firma:</i>	<b>ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA</b> 
<i>Dibuixat</i>	18/12/16	Xavi Corbi		
<i>Comprovat</i>				
		distàncies en mm.		
<i>Escala:</i>	<h1>1:7</h1>			<i>Plànol</i> planta - bancada amb placa de terra.
				<i>Alumne:</i> Xavi Corbi PFC- Efecte Corona



	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Firma:</i>	<b>ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA</b> 
<i>Dibuixat</i>	18/12/16	Xavi Corbi		
<i>Comprovat</i>				
		distàncies en mm.		
<i>Escala:</i>	<h1>1:8</h1>			<i>Plànol</i> alçat - bancada amb placa de terra
				<i>Alumne:</i> Xavi Corbi
				PFC- Efecte Corona



	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Firma:</i>	<b>ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA</b> 
<i>Dibuixat</i>	18/12/16	Xavi Corbi		
<i>Comprovat</i>				
		distàncies en mm.		
<i>Escala:</i>	<h1>1:3</h1>			<i>Plànol</i> perfil- bancada amb pla de terra
				<i>Alumne:</i> Xavi Corbi PFC- Efecte Corona





## **Annex II. Article tècnic**

En aquest annex es mostra l'article relacionat amb el càlcul de l'efecte corona a les línies aèries d'alta tensió, referent al capítol 3, concretament al apartat 3.2.3 segons CLAUDE GARY, Enginyer d'Électricité de France.

Referencia bibliogràfica;

**Gary, Claude. 1998.** *Effet couronne sur les réseaux électriques aériens.* Paris : s.n., 1998.

# Effet couronne sur les réseaux électriques aériens

par **Claude GARY**

*Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité  
Conseiller Scientifique Honoraire  
Direction des Études et Recherches d'Électricité de France*

<b>1. Aspect physique du phénomène en tension alternative .....</b>	D 4 440 - 4
<b>2. Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs .....</b>	— 7
<b>3. Méthodes de prédétermination des pertes par effet couronne ..</b>	— 9
<b>4. Perturbations radioélectriques dues à l'effet couronne .....</b>	— 13
<b>5. Perturbations radioélectriques dues à l'appareillage de poste et aux chaînes d'isolateurs .....</b>	— 20
<b>6. Perturbations radioélectriques aux fréquences télévision .....</b>	— 22
<b>7. Effet couronne sur les lignes à courant continu .....</b>	— 22
<b>8. Règles d'établissement de valeurs limites des perturbations .....</b>	— 24
<b>Pour en savoir plus .....</b>	Doc. D 4 440

**L'**effet couronne, phénomène aujourd'hui bien connu, se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse bleuâtre qui apparaît autour d'un fil mince, lorsque celui-ci est porté à un potentiel suffisant. Il rappelle le halo lumineux visible à la périphérie du soleil, au moment des éclipses, et qui lui a donné son nom. Du point de vue physique et électrique, ce phénomène est dû à l'ionisation de l'air, dès que le champ électrique régnant au voisinage immédiat du conducteur devient suffisant.

Lorsque l'on utilise des conducteurs de plus gros diamètre, comme ceux qui équipent les lignes aériennes, on constate que la gaine lumineuse évolue en décharges discrètes que les spécialistes ont coutume d'appeler « **aigrettes** » ou « **effluves** ».

On peut remarquer ici que ce phénomène se manifeste aussi dans des conditions naturelles, en particulier à l'approche d'un orage : sous l'effet de l'intense champ électrique généré par les charges électriques du nuage orageux, il se forme au sommet de toutes les pointes ou aspérités (mâts, paratonnerres, pics montagneux...) des effluves ou aigrettes, accompagnées d'un crépitement caractéristique. Les alpinistes connaissent bien ce bruit, qu'ils appellent « bruit d'abeilles ». Les feux de Saint-Elme, décrits par les anciens navigateurs, n'ont pas d'autre origine.

Lors de l'effet couronne, l'énergie dissipée est à l'origine de pertes électriques et les impulsions électriques associées aux aigrettes entraînent des perturbations radioélectriques.

Par l'analyse des résultats de mesures antérieures sur de nombreux types de conducteurs, on a mis en évidence l'influence des principaux paramètres régissant l'amplitude des phénomènes couronne. Dans leur ordre de mise en évi-

dence, ce sont : le champ électrique superficiel du conducteur, son diamètre, son état de surface, la densité de l'air environnant.

Pour l'exploitation du réseau à 380 kV, l'effet couronne devient gênant et le choix de conducteurs en faisceaux permet d'en limiter les pertes et le champ perturbateur à des valeurs raisonnablement acceptables.

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que, plus il se dégrade, plus les pertes augmentent, et plus le champ perturbateur est élevé. Parmi les facteurs de dégradation, la pollution végétale ou industrielle, voire le suintement en surface de la graisse de toronage, jouent un rôle important, mais malheureusement difficilement maîtrisable. Plus encore, la pluie, en raison des aspérités que constituent les gouttes d'eau suspendues aux conducteurs, multiplie le nombre d'aigrettes génératrices de l'effet couronne.

Le code de calcul EFCOR (EFFet CORona), mis au point par EDF pour analyser la formation des **pertes** peut être considéré comme un outil remarquable, car il permet de suivre physiquement le mécanisme des pertes : entre autres performances, ce code permet de visualiser le mouvement des charges d'espace, et il est fascinant pour l'esprit d'assister quasi concrètement au ballet des ions qui se déplacent, s'entrecroisent et se recombinent au rythme du potentiel alternatif du conducteur. Mais, au-delà de cette satisfaction toute intellectuelle, les méthodes pratiques dérivées d'EFCOR permettent une prévision plus que satisfaisante au niveau des pertes sous pluie, précisément dans les conditions où elles sont économiquement les plus gênantes.

En ce qui concerne les **perturbations radioélectriques**, les diverses étapes de la connaissance des mécanismes de leur génération permettent maintenant la prédétermination du niveau perturbateur d'une ligne en projet. Actuellement, deux groupes de méthodes se partagent la faveur des spécialistes :

— la méthode comparative, qui se base sur une comparaison directe avec des lignes témoins de caractéristiques plus ou moins semblables, et cherche à établir des relations empiriques de passage d'une structure de ligne à l'autre et d'un champ superficiel à l'autre ;

— la méthode analytique, qui exploite les notions présentées ci-avant, prenant en compte l'influence de tous les paramètres constructifs d'une ligne, en remontant jusqu'au phénomène initial de l'aigrette ; cette méthode a donné lieu, également à EDF, à la mise au point du code de calcul ANALIG (ANALyse des LIGnes).

Actuellement, la structure socio-géographique de la plupart des pays d'Europe de l'Ouest fait que les très hautes tensions (comprises entre 750 et 1 000 kV) ne seront probablement pas introduites dans un proche avenir (France, République fédérale d'Allemagne, Grande-Bretagne, Benelux, etc.), sauf dans les pays où des puissances massives doivent être transportées sur des distances de l'ordre du millier de kilomètres ; cela est le cas en Suède et le sera peut-être en Italie. Dans ce dernier pays, notamment, on envisage des transports à des tensions de 1 200 kV, voire de 1 500 kV. Il en est de même dans d'autres pays de vastes dimensions ou à très forte densité de population (États-Unis, Canada, Russie, Japon, etc.), où de telles tensions sont prévues et où des réseaux à 750 ou 800 kV sont déjà exploités. Ce sont donc dans ces pays que se déploient les plus importants efforts actuels de recherche, centrés sur l'emploi des ultra-hautes tensions.

Enfin, la multiplication des lignes aériennes, nécessitée par le développement économique, fait apparaître des contraintes de passage et met en évidence des **phénomènes perturbateurs** autres que ceux dus à l'effet couronne auxquels on n'avait jusqu'à présent prêté que peu d'attention. Les contraintes de passage ont conduit le CISPR (Comité International Spécial pour les Perturbations Radioélectriques) à élaborer, à la demande de certains pays, des règles de bon voisinage entre lignes perturbatrices et installations de réception riveraines, sans que toutefois l'application de ces règles devienne obligatoire. Parmi les phénomènes perturbateurs à considérer, on mentionnera notamment, outre l'effet couronne des conducteurs :

— les perturbations dues aux chaînes d'isolateurs et à l'appareillage de poste ;

— la perturbation des images de télévision par les ondes réfléchies sur les lignes (échos) ;

— le bruit acoustique directement rayonné par les conducteurs ; ce problème a été traité dans l'article D 566 « Bruit des matériels électriques ».

En outre, certains pays (Brésil, États-Unis, Chine, Japon, Russie) développent, à côté des transports en courant alternatif triphasé, des liaisons à courant continu à très haute tension, ce qui entraîne la nécessité d'étudier également les phénomènes associés à l'effet couronne en tension continue.

## 1. Aspect physique du phénomène en tension alternative

### 1.1 Nature de l'effet couronne

#### 1.1.1 Avalanche électronique

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension.

Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation, que l'on explique de la façon suivante :

Il existe toujours dans l'air un certain nombre de paires ions positifs - électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par la radioactivité naturelle. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc). Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite : le processus prend une allure d'avalanche, dite *avalanche de Townsend*. Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante.

En champ uniforme, dans les conditions normales de l'air, cette valeur est très voisine de 30 kV/cm, et le phénomène évolue jusqu'au claquage de l'intervalle entre les électrodes. Ce champ est alors appelé *champ disruptif*.

Mais au voisinage d'un conducteur d'une ligne électrique, les surfaces équipotentielles ont une très forte courbure, et le champ électrique décroît très rapidement en fonction de la distance au conducteur. L'avalanche électronique ne peut se produire que si le champ à la surface du conducteur atteint une valeur supérieure à 30 kV/cm, d'autant plus grande que le rayon du conducteur est petit. Ce champ superficiel est appelé *champ critique*.

En **polarité négative du conducteur**, l'avalanche électronique se développe depuis le conducteur vers l'extérieur ; elle s'arrête à une certaine distance où le champ n'est plus suffisant pour assurer l'effet multiplicateur. Ce champ est de l'ordre de 26 kV/cm. Le phénomène d'ionisation est alors limité à une couronne d'une épaisseur bien définie.

En **polarité positive du conducteur**, au contraire, l'avalanche électronique prend naissance dans l'espace voisin, et se développe vers le conducteur. Les électrons sont absorbés par celui-ci, laissant der-

rière eux un nuage d'ions positifs, beaucoup moins mobiles ; tout se passe comme si le conducteur était prolongé par une pointe positive, qui permet ensuite la formation d'une nouvelle avalanche un peu en avant de la précédente. Ce processus d'ionisation se propage autour du conducteur nettement plus loin que les avalanches de polarité négative, et est appelé *streamer* (la traduction française qui paraît s'imposer actuellement est *dard*).

#### 1.1.2 Calcul du champ critique (formule de Peek)

Pour déterminer le champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur cylindrique, on emploie généralement la formule de Peek, qui est la plus connue [1]. Elle a pour expression :

$$E_c = 31\delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (1)$$

avec  $E_c$  (kV/cm) valeur de crête du champ critique (en champ alternatif),

$r$  (cm) rayon du conducteur,

$\delta = \frac{3,92p}{273 + t}$  densité relative de l'air,

( $\delta = 1$  pour  $p = 76$  cm Hg et  $t = 25$  °C).

L'état de surface du conducteur est très important : la relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies.

La rugosité superficielle diminue le champ critique ; on tient compte de cette influence en attribuant au conducteur un coefficient expérimental  $m \leq 1$ , appelé *coefficient d'état de surface*. Le champ critique  $E_0$  d'un conducteur non poli s'exprime alors sous la forme :

$$E_0 = mE_c$$

Ainsi, le toronnage d'un conducteur de ligne aérienne introduit un coefficient d'état de surface de l'ordre de 0,9.

#### 1.1.3 Modes d'émission des charges. Aigrettes

Les premières expériences sur l'effet couronne, qui datent du début du siècle, étaient faites à l'aide de fils minces, de quelques millimètres de diamètre. Portés à une tension suffisante, il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, maintenant universellement employée, d'*effet couronne* ou *corona*.

Mais lorsque le diamètre du fil croît, pour atteindre les dimensions des câbles utilisés sur les lignes de transport d'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme ; il se discrétise en lueurs localisées désignées sous le nom général d'*aigrettes*. Cette discrétisation de l'effet couronne est observée sur des cylindres parfaitement polis, et est encore grandement favorisée, dans le

## Historique

Dès les débuts de l'électrotechnique des hautes tensions, l'attention des ingénieurs et des chercheurs fut attirée par le curieux phénomène désigné par « Effet couronne » ou « Corona ».

On peut considérer que le véritable pionnier de l'étude scientifique de l'effet couronne est un chercheur américain, R.W. Peek, qui, vers 1920, établit une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la lueur, en terme de champ électrique superficiel. Cette loi célèbre est toujours en usage aujourd'hui. Mais si la curiosité scientifique fut sans doute la motivation originale des chercheurs, les premiers transports d'énergie à haute tension montrèrent rapidement que l'effet couronne était une source de **pertes**, et ce furent alors des préoccupations d'ordre économique qui incitèrent à poursuivre les recherches et à approfondir les mécanismes physiques mis en jeu. De 1920 jusqu'à l'immédiat avant-guerre, de nombreuses théories virent le jour, pour expliquer la formation des pertes : il est alors reconnu que l'ionisation génère des charges d'espace, et que c'est leur mouvement autour des conducteurs qui est responsable de ces pertes. On peut citer, pour cette époque, les travaux de Ryan et Henline (1924), de Hesselmeier et Kostko (1925), de Holm (1927). La très grande variété de formules donnant les pertes, proposées par ces auteurs et d'autres, montre à quel point le problème est délicat.

C'est à cette même période que l'on mit en évidence le fait que la gaine lumineuse des fils fins évoluait en décharges discrètes lorsque le diamètre du conducteur utilisé croissait. Ce fut le mérite de Trichel (1938), puis plus tard de Loeb, Raether et d'autres, d'analyser les caractéristiques et les mécanismes de formation de ces décharges, plus communément appelées « **aigrettes** » dans le langage des spécialistes. Ces chercheurs montrèrent très clairement que le phénomène fondamental générant l'effet couronne est l'« **avalanche électronique** ».

Ce n'est qu'à partir de 1945 que l'on a commencé à se préoccuper d'une autre conséquence de l'effet couronne, liée à la formation des aigrettes : les **perturbations radioélectriques**. Les aigrettes, qui sont d'un point de vue électrique des impulsions de courant très brèves, génèrent au voisinage d'une ligne à haute tension un champ électromagnétique à haute fréquence ; à l'écoute d'une émission de radiodiffusion, ce champ est capable de gravement perturber le signal utile, en y superposant des parasites qui se manifestent par un crépitement quasi permanent.

Le décalage de près de 25 ans entre l'étude de ces deux aspects de l'effet couronne – pertes et perturbations – n'a rien d'étonnant, car si les considérations énergétiques apparurent très vite, le phénomène perturbateur ne devenait vraiment gênant qu'aux tensions supérieures à 220 kV. C'est donc l'introduction du transport de l'énergie électrique à 380 kV et au-dessus qui suscita d'actives recherches dans ce domaine.

Pour réduire le champ superficiel d'un conducteur équipant une ligne de tension donnée, s'offrent deux possibilités : accroître son rayon, ou utiliser

plusieurs sous-conducteurs de rayon moindre, groupés en « faisceau ». Les tentatives pour utiliser des conducteurs de fort diamètre (de l'ordre de 50 mm) se heurtèrent rapidement à des poids excessifs, à une mauvaise utilisation de la section (*effet de Peau*) et à des difficultés de pose. Aussi eut-il plusieurs tentatives pour mettre au point des conducteurs creux, remplis de polythène, ou comportant des entretoises internes. Dans certains de ces types de conducteurs, la couche superficielle était constituée de méplats emboîtés les uns dans les autres, mais ces conducteurs s'avèrent très fragiles. Finalement, on s'orienta vers l'emploi de faisceaux, cette solution technique étant aujourd'hui universellement utilisée sur les lignes de tension supérieure ou égale à 380 kV.

Des mesures correctes du **champ perturbateur** nécessitèrent de nombreuses études et mises au point. Il existait vers 1950 une grande diversité d'appareils de mesure des champs, se différenciant par leur bande passante, leurs caractéristiques de détection (c'est-à-dire mesurant la valeur efficace du signal, ou sa valeur de crête, ou de quasi-crête) ; on se rendit rapidement compte que la comparaison des mesures effectuées dans les divers pays participant aux études nécessitait une unification des caractéristiques. Ce travail de normalisation fut réalisé au sein d'un Comité International, le CISPR, comité aujourd'hui intégré à la Commission Électrotechnique Internationale. Néanmoins, les Américains préférèrent toujours utiliser l'appareil conforme à la norme américaine « ANSI », mais le facteur de correction entre les deux est maintenant bien connu. Il est clair qu'à côté de tout ce travail expérimental, il était nécessaire de mener des recherches théoriques, en vue d'une compréhension approfondie de la physique des phénomènes : par une évolution toute naturelle des esprits, celles-ci ont porté d'abord sur l'étude de l'aigrette individuelle et de son champ électromagnétique local. Mais, très rapidement, a été mise en évidence l'importance de la propagation des hautes fréquences le long d'une ligne, ce qui a conduit à l'étude théorique des champs guidés, de leur propagation et de leur atténuation. Ces travaux ont abouti à la mise au point de méthodes de calcul des perturbations extrêmement élaborées, d'ailleurs encore poursuivies et affinées jusque vers les années 1980. La mise au point par EDF du code de calcul ANALIG permet désormais la prévision, avec une grande précision, non seulement du niveau perturbateur, mais aussi de son atténuation transversale.

En ce qui concerne la **théorie des pertes**, celle-ci avait peu progressé pendant de longues années, jusqu'à l'apparition des grands ordinateurs ; cette lacune a été comblée par le code de calcul EFCOR.

*Les recherches se sont maintenant quelque peu ralenties, tout au moins en France, après une trentaine d'années d'intense activité, de 1945 à 1975 environ. Ces recherches étaient liées au développement des réseaux à 400 kV, puis à la préparation technique en vue de l'éventuel emploi de tensions comprises entre 750 et 1 000 kV.*

cas des conducteurs industriels, par des irrégularités de surface telles que le toronnage, les éraflures, les dépôts de poussière végétale, de pollution industrielle, voire de petits insectes. Toutes ces aspérités de natures diverses créent un renforcement local du champ électrique, et ont pour conséquence une réduction du niveau de la tension d'apparition des aigrettes.

Il existe un grand nombre de modes d'émission de charges dus à l'ionisation des gaz, pouvant prendre l'aspect d'émission continue ou d'émission impulsionnelle, et constituant autant de variétés d'aigrettes.

En ce qui concerne l'étude des pertes et des perturbations, 3 modes d'émission principaux sont à retenir.

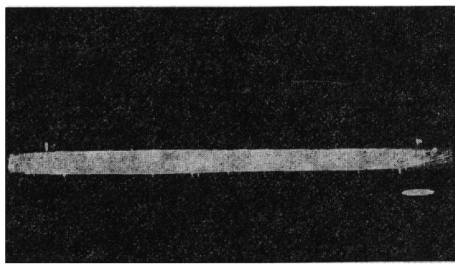
a) *Petites aigrettes négatives (impulsions de Trichel)* : en général, le champ critique est légèrement plus faible en polarité négative qu'en polarité positive. Lorsque ce champ critique négatif est atteint au sommet d'une aspérité du conducteur, l'observation à l'oscilloscope montre l'apparition de trains d'impulsions, avec des fréquences de relaxation pouvant aller de 1 kHz à 100 kHz.

Les impulsions sont d'autant plus petites et plus serrées que la pointe est fine ; leur amplitude est relativement faible (de l'ordre du milliampère) mais elles sont caractérisées par des fronts de montée très raides, de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. A ces impulsions, dites *impulsions de Trichel*, correspond visuellement un cône

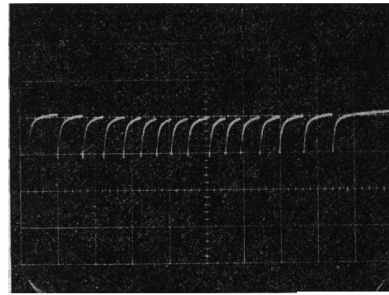
lumineux dont le sommet plus brillant est posé sur la pointe. Le mécanisme de ces impulsions est du type *avalanches négatives* (figure 1).

b) *Zone de conductivité d'Hermstein* : c'est un mode d'émission en polarité positive qui a la propriété d'être continu. Il a lieu généralement, en tension alternative, immédiatement au-dessus du seuil positif. Sa participation est importante dans la formation des pertes couronne mais négligeable dans la formation des perturbations radioélectriques.

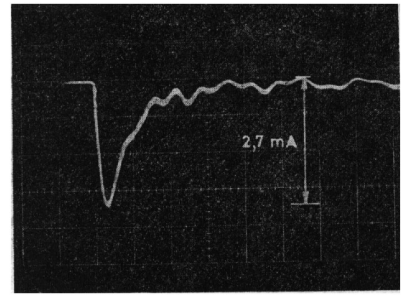
c) *Grandes aigrettes positives* : le mode d'émission impulsionnel apparaît au-delà de la zone continue d'Hermstein, pour des champs positifs un peu supérieurs. Le courant d'émission prend la forme d'une série irrégulière d'impulsions de grande amplitude ( $\geq 100$  mA). Visuellement, elles se présentent comme des aigrettes très lumineuses, dont la base est attachée à une aspérité du câble, et qui se propagent de façon arborescente à des distances de plusieurs centimètres. Leur mécanisme de formation est du type *streamer* (figure 2). Ce sont ces grandes aigrettes positives qui sont responsables des perturbations radioélectriques. Elles s'accompagnent également, du point de vue acoustique d'un claquement sec dont la multiplication engendre le *bruit d'abeilles* bien connu au voisinage des lignes à haute tension.



(a) impulsions de Trichel (aigrettes négatives) à la surface d'un conducteur toronné

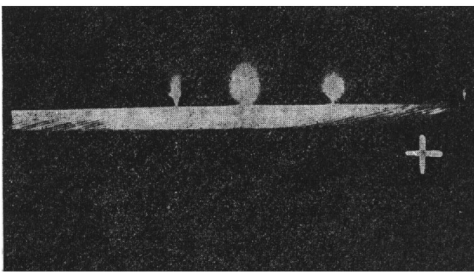


(b) train d'impulsions (vitesse de balayage : 0,2 ms/carreau)

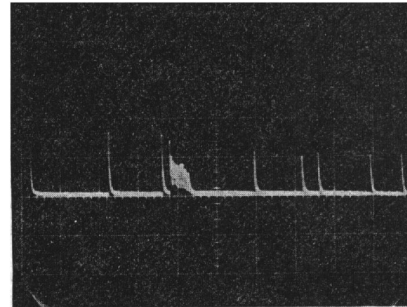


(c) détail d'une impulsion (vitesse de balayage : 50 ns/carreau)

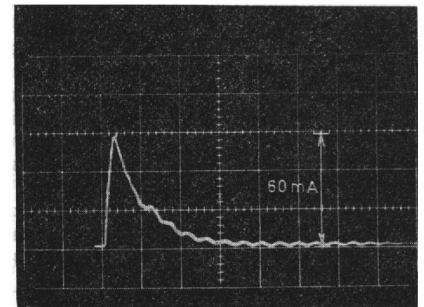
Figure 1 – Effet couronne négatif



(a) impulsions de prédécharge (aigrettes positives) à la surface d'un conducteur toronné



(b) train d'impulsions (vitesse de balayage : 0,2 ms/carreau)



(c) détail d'une impulsion (vitesse de balayage : 200 ns/carreau)

Figure 2 – Effet couronne positif

## 1.2 Mécanisme de formation des pertes couronne

Quel que soit le mode d'émission, le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes en électrons et en ions positifs. Les charges de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirées vers celui-ci et neutralisées, alors que les charges de même signe sont entraînées vers l'extérieur par le champ électrique. Comme les électrons s'attachent très rapidement à des atomes neutres pour former des ions négatifs, tout se passe, du point de vue de l'électrotechnicien, comme si le conducteur émettait, sous l'effet du phénomène d'ionisation, des ions lourds de même polarité que lui.

La migration de ces ions dans le champ électrique est la cause physique des pertes couronne, l'énergie étant dissipée par frottement des ions contre les molécules neutres de l'air. Le mouvement des ions appelle dans les conducteurs, par induction électrostatique, un courant qui comporte une composante fondamentale en phase avec la tension ; par cet intermédiaire s'effectue un transfert d'énergie mécanique en énergie électrique, de sorte que l'énergie dissipée est finalement fournie sous forme électrique.

Tant que le nombre de points générateurs d'ions est faible, le champ principal dû aux charges portées par le conducteur n'est pratiquement pas perturbé. On dit qu'on est en régime de *pertes localisées* ; le calcul du mouvement individuel et de la perte d'énergie des charges d'espace est alors possible ; par contre, la quantité de charges émises est extrêmement fluctuante et dépend considérablement de l'état de surface du conducteur, de sorte qu'un calcul exact des pertes est quasi impossible et illusoire. Les pertes sont d'ailleurs, dans cette zone de fonctionnement, assez faibles pour que leur influence économique soit négligeable.

Lorsque la tension appliquée s'accroît ou lorsque pluie, brouillard ou neige multiplie les aspérités du conducteur en déposant sur sa surface des gouttes d'eau, le nombre d'aigrettes augmente. La charge d'espace créée devient suffisamment dense pour réagir de façon sensible sur le champ superficiel. Il se produit alors une sorte de phénomène de régulation, par lequel le champ électrique superficiel ne peut pas dépasser une certaine valeur critique, légèrement supérieure au seuil d'ionisation ; en effet, toute tendance au dépassement a immédiatement pour conséquence la génération de nouveaux ions qui tendent à leur tour à limiter la croissance du champ. Dans ce type de fonctionnement, la quantité de charges d'espace émises ne dépend plus des caractéristiques propres des sources d'ions, mais est directement liée au phénomène d'interaction mentionné. Une description quantitative des mécanismes en jeu, et par conséquent, un calcul des pertes deviennent alors possibles. Le régime de formation intense de charges d'espace est appelé *régime des pertes généralisées* ; il rend assez bien compte des phénomènes

qui se produisent sous pluie, c'est-à-dire justement dans des conditions où l'effet couronne est économiquement le plus gênant.

### 1.3 Mécanisme de formation des perturbations radioélectriques

Le phénomène fondamental est ici le mode d'émission impulsionnelle, au cours duquel les charges libres, ions et électrons, sont brusquement formées puis violemment entraînées par le champ électrique intense au voisinage immédiat du conducteur.

La formation et le déplacement de ces charges dans l'espace voisin du conducteur provoquent une modification rapide de la distribution des potentiels électrostatiques, d'où résulte l'émission d'une onde électromagnétique : ce rayonnement direct, de type sphérique, s'atténue en  $1/r^2$  et il a été reconnu que sa contribution au champ perturbateur total mesuré en un point voisin de la ligne était faible. Mais le déplacement des charges provoque également un appel de courant dans le conducteur, se répartissant par moitié de part et d'autre de l'aigrette. Le siège de celle-ci peut donc être considéré comme origine de deux impulsions de courant symétriques, se propageant en sens inverses le long du conducteur. Ces impulsions sont représentables par leur spectre de Fourier ; les composantes de ce spectre vont avoir des comportements différents, selon leur fréquence.

a) Tant que la longueur d'onde associée à une composante spectrale est grande devant les dimensions transversales de la ligne, c'est-à-dire tant que l'on peut négliger la propagation *transversale* des potentiels, on peut considérer qu'à cette composante de courant est associé un système de deux champs orthogonaux, l'un électrique et l'autre magnétique, qui se propagent ensemble le long de la ligne ; ils forment une onde plane guidée, dont le vecteur-énergie de Poynting est parallèle à la ligne (cf en D 50 *Le système d'unités MKSA de Giorgi*). Compte tenu de l'atténuation, relativement faible, de cette propagation, la part dominante du champ perturbateur est due à la superposition des effets de toutes les aigrettes réparties sur plusieurs dizaines de kilomètres de part et d'autre du point de mesure et non à l'effet direct des aigrettes proches.

b) En ce qui concerne les composantes spectrales dont les *longueurs d'onde* se rapprochent des dimensions transversales de la ligne, l'étude théorique des mécanismes de propagation s'apparente aux études de rayonnement des antennes. On peut dire qu'une partie de l'énergie est rayonnée directement sous forme d'une onde électromagnétique, ce qui a pour conséquence une atténuation plus grande de la composante guidée, et une modification du plan de polarisation du champ perturbateur. Enfin, les composantes spectrales très élevées (fréquences de télévision par exemple) sont pratiquement rayonnées en totalité, la part guidée devenant négligeable.

Cette façon de voir est bien confirmée par l'expérience, qui montre que les perturbations aux fréquences télévision ne sont jamais propagées par les lignes à très haute tension, et que leur source n'ont qu'une action locale.

Outre l'effet couronne des conducteurs, il existe d'autres sources perturbatrices ; elles ont leur siège dans l'appareillage de poste et aux chaînes d'isolateurs réparties tout le long de la ligne. Ces perturbations sont essentiellement engendrées par 3 types de mécanismes : l'*effet de pointe*, c'est-à-dire des aigrettes qui apparaissent sur des parties d'accessoires métalliques à forte courbure, telles que extrémités de cornes de garde, boulons, goupilles mal protégées ; des *micro-claquages partiels* se

formant entre les pièces métalliques et le verre ou la porcelaine des isolateurs ; enfin, des *mauvais contacts* entre pièces métalliques ou dans des isolateurs descellés ou fêlés. Ces mécanismes sont la cause accidentelle de violentes perturbations qui s'étendent jusqu'aux fréquences télévision ; les remèdes en sont heureusement assez aisés à mettre en œuvre.

### 1.4 Aspect statistique

Nous avons déjà signalé l'importance de l'état de surface des conducteurs sur l'intensité de l'effet couronne. La pollution atmosphérique, les particules végétales, des insectes qui peuvent se déposer sur les conducteurs, modifient profondément cet état de surface, l'influence du brouillard et de la pluie est encore bien plus importante. Même en ne considérant que l'état sec des conducteurs, on a relevé des fluctuations de l'effet couronne, au cours du temps, qui faisaient varier la valeur des pertes et du champ perturbateur radioélectrique dans un rapport de 1 à 5, sans qu'il soit possible de maîtriser ce phénomène. Une valeur de pertes, un niveau perturbateur ne sauraient donc s'exprimer qu'en termes statistiques, par exemple, pour un conducteur fonctionnant dans des conditions électriques données, par leur valeur la plus probable et par leur écart-type, ou par la courbe de distribution statistique. L'obtention de tels résultats statistiques suppose des mesures de longue durée, effectuées sur des conducteurs soumis en permanence à une tension constante. Il est même préférable, pour comparer des conducteurs différents entre eux, dans les mêmes conditions d'environnement, de les étudier simultanément. Ces considérations expliquent que, dans plusieurs pays, des installations expérimentales importantes aient été réalisées pour étudier l'effet couronne.

### 1.5 Causes de variations d'état de surface des conducteurs

Les variations de l'état de surface des conducteurs ont plusieurs causes, dont les principales sont les suivantes.

a) *Vieillessement* : lorsqu'un conducteur est neuf, sa surface porte des traces de graisse, des petites éraflures dues à une pose plus ou moins soignée ; une fois mis sous tension permanente, le conducteur se recouvre peu à peu d'une couche noirâtre, poreuse, qui finit par masquer les aspérités d'origine. Cette couche est formée par des poussières et divers aérosols qui, attirés électrostatiquement par le conducteur, engendrent une aigrette éphémère et se carbonisent rapidement. Ce vieillissement, dont la durée est de l'ordre de quelques mois, entraîne une réduction des pertes qui se stabilisent au tiers environ des pertes à l'état neuf.

b) *Variations saisonnières* : celles-ci sont dues aux alternances de pollution des conducteurs et de leur lavage par les pluies. En France, les pertes sont généralement plus élevées en été et diminuent en hiver, après les pluies d'automne. (Il semble également que la température ait un effet sur l'émission des charges d'espace, mais cet effet serait lié aux variations de densité de l'air).

c) *État de surface anormal* : citons, à titre d'exemple, le cas extrême suivant : un faisceau de conducteurs présentait, durant l'hiver et le printemps suivant sa mise en service, des pertes moyennes de l'ordre de 2 kW par kilomètre. Sous l'effet de très fortes chaleurs survenant au mois de juillet, la graisse contenue dans le toronnage des conducteurs s'est liquéfiée, puis s'est répandue à leur surface ; un grand nombre d'insectes et de particules végétales sont venus se coller sur cette couche visqueuse, formant autant de sources d'ionisation ; on a alors vu les pertes du faisceau croître jusqu'à 24 kW par kilomètre, puis se maintenir à cette valeur pendant plusieurs mois, les pluies étant insuffisantes pour laver cette couche.



## 2. Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs

### 2.1 Principe du calcul

Le paramètre caractéristique le plus évident auquel on a coutume de rattacher l'intensité de l'effet couronne est le champ électrique à la surface du conducteur ou *gradient superficiel*. En raison de la grande sensibilité du phénomène couronne à la valeur de ce champ, il est nécessaire d'employer une méthode de calcul fournissant le champ avec une précision de l'ordre de 1 %.

Du fait de la réalisation des conducteurs usuels en brins toronnés, le champ superficiel réel accuse, le long de leur circonférence, des fluctuations autour d'une valeur moyenne. Il est d'usage de calculer le champ superficiel du conducteur lisse *de même diamètre extérieur*, quitte à introduire, si nécessaire, un coefficient expérimental de correction de toronnage.

De la façon la plus générale, le champ superficiel se calcule par le théorème de Gauss :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

avec  $E$  (V/cm) champ superficiel,  
 $q$  (C/m) charge superficielle par unité de longueur,  
 $r$  (cm) rayon du conducteur lisse équivalent,

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9}$  est la permittivité du vide (ou de l'air), en F/m.

### 2.2 Matrice des coefficients de potentiel et de capacité

La relation générale que l'on emploie pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle suivante :

$$\{q\} = [C] \{V\} \quad (3)$$

où  $\{q\}$  et  $\{V\}$  sont respectivement les matrices unicolonnes des charges et des potentiels des conducteurs (le sol étant au potentiel nul), et  $[C]$  est la matrice carrée des coefficients de capacité propre et mutuelle. Pour déterminer  $[C]$ , on commence d'abord par calculer les coefficients de potentiel de la ligne. Ces coefficients sont obtenus par application directe de la théorie des images : on remplace le sol, considéré comme un plan de potentiel nul, par l'image des conducteurs par rapport à ce plan. Désignons par  $i, j, \dots$  les conducteurs parallèles en présence, et par  $i', j', \dots$  leurs images.

En se conformant aux notations de la figure 3, posons :

$r_i$  = rayon du conducteur

$$D'_{ij} = \sqrt{(h_j + h_i)^2 + d_{ij}^2}$$

$$D_{ij} = \sqrt{(h_j - h_i)^2 + d_{ij}^2}$$

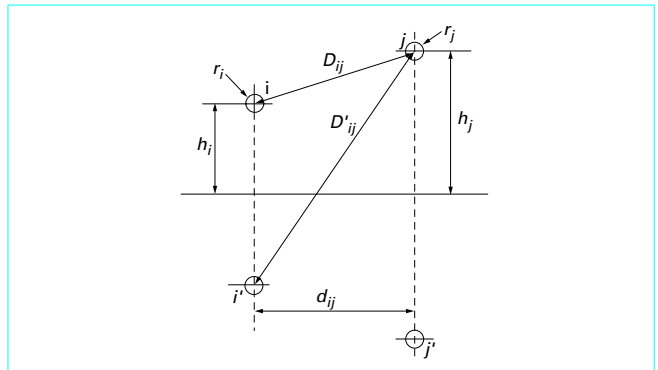


Figure 3 – Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne

Les coefficients de potentiel s'écrivent :

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{2h_i}{r_i} \right) \quad (4)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (5)$$

On notera que

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$$

**Nota :** en pratique, la hauteur des conducteurs varie le long d'une portée, ainsi que d'une portée à l'autre. Les hauteurs  $h_i$  et  $h_j$  à introduire dans les calculs de gradients sont les *hauteurs moyennes* définies par :

$$h \text{ (moyenne)} = \text{hauteur d'accrochage moyenne} - \frac{2}{3} \text{ flèche moyenne.}$$

A l'aide des coefficients de potentiel ainsi obtenus, on forme la matrice carrée :

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1i} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{j1} & \dots & \lambda_{jj} & \dots & \lambda_{jn} \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{ni} & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Par inversion on en déduit enfin la matrice des capacités :

$$[C] = [\lambda]^{-1} \quad (7)$$

La matrice  $[C]$  permet de calculer les charges portées par chaque conducteur en fonction de leurs potentiels respectifs, conformément à l'équation (3).

Dans le cas des lignes triphasées de transport d'énergie, la charge d'un conducteur, et par conséquent son champ superficiel, ne sont pas nécessairement maximaux en même temps que la tension du conducteur lui-même.

Ce phénomène est dû au déphasage entre les 3 tensions du système triphasé. Ainsi par exemple, si la succession des phases est définie par  $1, a^2, a$ , (où  $a$  est l'opérateur de Fortescue), la matrice unicolonne des tensions s'écrira :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 + j 0 \\ -1/2 + j\sqrt{3}/2 \\ -1/2 - j\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

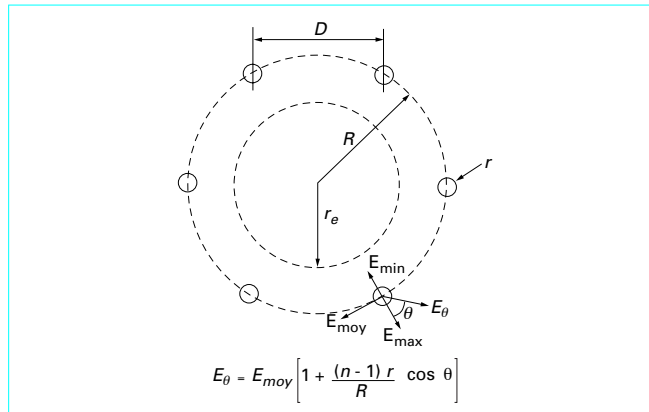


Figure 4 – Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteurs

### 2.3 Lignes à plusieurs ternes

Il arrive fréquemment que plusieurs systèmes triphasés soient portés par les mêmes pylônes. Dans de tels cas, le calcul précis des gradients exige d'établir des matrices des  $[\lambda]$  et des  $[C]$  qui peuvent être d'ordre élevé : une ligne à deux ternes sera caractérisée par des matrices d'ordre 6. L'inversion de telles matrices n'est pratiquement possible qu'à l'aide d'un ordinateur ; mais le parc d'ordinateurs est maintenant suffisamment développé pour que ces calculs ne posent plus aucun problème à l'heure actuelle.

Il faut faire remarquer par ailleurs que la position des indices de phase de chaque terne influe sur les charges des conducteurs : il est important d'en tenir compte lors du calcul des gradients d'une ligne à deux ternes. Ainsi par exemple, la disposition en nappe horizontale de deux ternes définies par  $1, a, a^2$  et  $1, a, a^2$  entraînera des gradients plus élevés que la disposition  $1, a, a^2$  et  $a^2, a, 1$ .

### 2.4 Emploi des faisceaux de conducteurs

Les lignes à très hautes tensions, supérieures à 300 kV, sont équipées presque exclusivement de faisceaux de plusieurs conducteurs par phase. Cette disposition permet de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles.

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes (figure 4) :

- $r$  (cm) rayon des conducteurs élémentaires,
- $n$  nombre de conducteurs élémentaires,
- $R$  (cm) rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs),
- $D$  (cm) distance entre deux conducteurs consécutifs :

$$D = 2R \sin \frac{\pi}{n}$$

•  $r_e$  (cm) rayon équivalent. C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants. Il est donné par l'expression :

$$r_e = R \sqrt[n]{\frac{nR}{R}} \quad (9)$$

Pour calculer le champ superficiel des conducteurs d'un faisceau, on détermine d'abord la charge totale  $Q$  de celui-ci, en introduisant

son rayon équivalent  $r_e$  dans les expressions des coefficients du potentiel. Le gradient moyen d'un conducteur est alors donné par :

$$E_{moy} = \frac{1}{n} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (10)$$

puisque la charge totale du faisceau se répartit également sur les  $n$  conducteurs du faisceau. Mais, par effet de blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur, et plus faible vers l'intérieur du faisceau. On définit donc le champ maximal et le champ minimal des conducteurs, obtenus respectivement par les expressions :

$$E_{max} = E_{moy} \left[ 1 + \frac{(n-1)r}{R} \right] \quad (11)$$

$$E_{min} = E_{moy} \left[ 1 - \frac{n-1}{R} r \right]$$

On admet généralement que le champ varie autour du conducteur de la façon suivante (figure 4) :

$$E_\theta = E_{moy} \left[ 1 + \frac{(n-1)r}{R} \cos \theta \right] \quad (12)$$

## 3. Méthodes de prédétermination des pertes par effet couronne

### 3.1 Pertes aux tensions inférieures à la tension critique (régime localisé)

Lorsque l'on augmente progressivement la tension à laquelle est porté un conducteur, l'effet couronne n'apparaît brusquement que si le conducteur a une surface parfaitement lisse et propre (coefficient d'état de surface  $m = 1$ ). Les mesures effectuées sur les lignes expérimentales montrent que les pertes par effet couronne apparaissent à des tensions très inférieures à la tension critique, c'est-à-dire à la tension pour laquelle le champ superficiel du conducteur est égal au champ critique. C'est ce que nous avons appelé (§ 1.2) les pertes en régime localisé.

Dans ce régime de fonctionnement, il est très difficile d'établir des lois dimensionnelles, parce que les variations d'état de surface sont telles qu'elles masquent en grande partie l'influence des paramètres électriques et géométriques des conducteurs.

La loi de croissance des pertes est néanmoins assez bien représentée par l'expression suivante :

$$P_2/P_1 = 10^7 (E_2^2 - E_1^2) \quad (13)$$

dans laquelle  $P_2$  et  $P_1$  sont les pertes engendrées par un conducteur soumis à deux champs superficiels différents  $E_2$  et  $E_1$ , ici exprimés en valeurs relatives  $E^* = E/E_c$ .

$E$  est la valeur de crête du champ appliqué et  $E_c$  le champ critique obtenu par la formule de Peek (§ 1.1.2).

### 3.1.1 Influence des paramètres géométriques du conducteur ou du faisceau

La topographie du champ électrique autour d'un conducteur ou d'un faisceau de conducteurs pouvant être déterminée à partir des lois de l'électrostatique classique, il est possible de calculer la trajectoire d'une charge d'espace dans l'espace voisin des conducteurs, puis l'énergie qu'elle dissipe au cours de ce mouvement.

#### 3.1.1.1 Trajectoire

On utilise la loi du mouvement d'une charge (ici un ion lourd) dans un gaz neutre :

$$\vec{u} = \mu \vec{E} \quad (14)$$

avec  $\vec{u}$  (cm·s<sup>-1</sup>) vitesse acquise par l'ion sous l'effet du champ local  $\vec{E}$ ,

$\mu$  mobilité ionique, de l'ordre de 1,5 à 2 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>.

Si l'on exprime le champ local en fonction de la distance  $\rho$  à l'axe du conducteur (ou du faisceau), et en fonction du temps  $t$ , la loi précédente s'écrit :

$$\frac{d\rho}{dt} = \mu E(\rho, t) \quad (15)$$

équation différentielle dont la résolution donnera les trajectoires. La figure 5 montre un exemple de trajectoires de charges autour d'un conducteur simple, le paramètre caractéristique étant l'instant, exprimé en angle électrique  $\varphi_0$ , de leur émission. On voit que le mouvement est symétrique, et qu'une charge émise à l'instant  $\varphi_0$  est restituée au conducteur à l'instant  $\varphi_0 + (\pi/2)$ . Le rayon de migration des charges d'espace atteint quelques dizaines de centimètres dans le cas des conducteurs simples et peut dépasser le mètre pour des gros faisceaux des lignes à très haute tension.

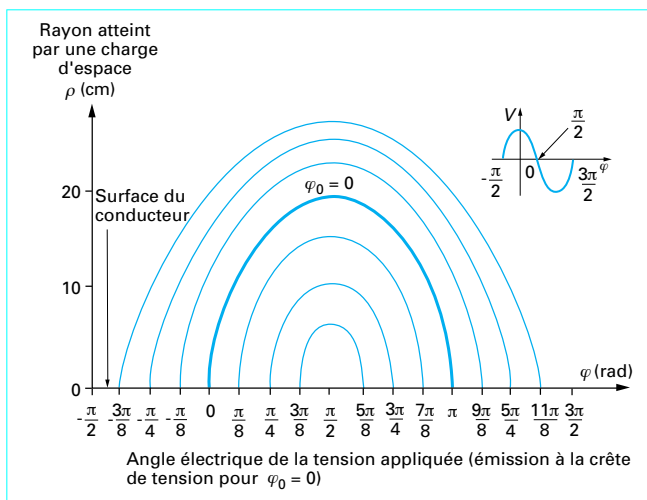


Figure 5 – Trajectoire d'une charge en champ non modifié autour d'un conducteur simple

#### 3.1.1.2 Énergie dissipée

L'énergie élémentaire  $dw$  dissipée par une charge  $q$  à un instant donné de sa trajectoire s'écrit :

$$dw = q \vec{u} \cdot \vec{E} dt \quad (16)$$

soit

$$dw = q \mu E^2(\rho, t) dt \quad (17)$$

L'intégration de  $dw$ , étendue à une alternance de la tension alternative, représente donc l'énergie dissipée par une charge au cours de cette alternance.

Par ailleurs, on a pu mettre en évidence par de nombreuses mesures que, pour un état de surface et un champ superficiel donnés des conducteurs, la quantité de charges émises par alternance était à peu près proportionnelle au rayon des conducteurs, soit  $q = q_0 r$ . Les pertes, égales à l'énergie dissipée par seconde, sont données par :

$$P = w q_0 r 2\nu$$

avec  $\nu$  fréquence de la tension alternative.

Cet ensemble de considérations a conduit à établir une formule d'influence des paramètres géométriques, obtenue en partie par le calcul et en partie par ajustement sur les résultats de mesure, et qui s'écrit :

$$P = P_0 [r^{1,8} (n + 6)^2] \quad (18)$$

$P_0$  est une puissance de référence représentative de la quantité  $w q_0 2\nu$ .

### 3.1.2 Quantité de charges émises

**Exemple :** Si l'on excepte le cas particulier des conducteurs très gras et très sales, on peut retenir à titre d'ordre de grandeur que, pour un champ superficiel de 17 kV/cm (valeur efficace), la quantité de charges émise par centimètre de rayon et par mètre linéaire de conducteur est de l'ordre de 0,1  $\mu$ C pour un état de surface mauvais et qu'elle tombe à 0,01  $\mu$ C pour des conducteurs propres et vieilliss.

### 3.1.3 Abaque de prédétermination des pertes par temps sec

La combinaison des diverses relations obtenues (influence du gradient superficiel, relations dimensionnelles, influence de l'état de surface) avec les résultats expérimentaux permet d'établir un abaque universel en coordonnées réduites, représenté à la figure 6.

L'abscisse est graduée en champ relatif  $E^* = E/E_c$  (dans le cas d'un faisceau, c'est le champ maximal qui doit être pris en compte).

L'ordonnée est graduée en pertes réduites  $P_0$  ; on en déduit les pertes réelles en multipliant  $P_0$  par le coefficient dimensionnel donné au (§ 3.1.1) formule (18).

La droite supérieure I correspond à des conducteurs sales et gras, la droite inférieure IV à des conducteurs très propres et bien vieilliss. Ces deux droites délimitent un domaine de pertes possibles, dans lequel l'évaluation des pertes réelles pourra être améliorée par une estimation de l'état de surface des conducteurs.

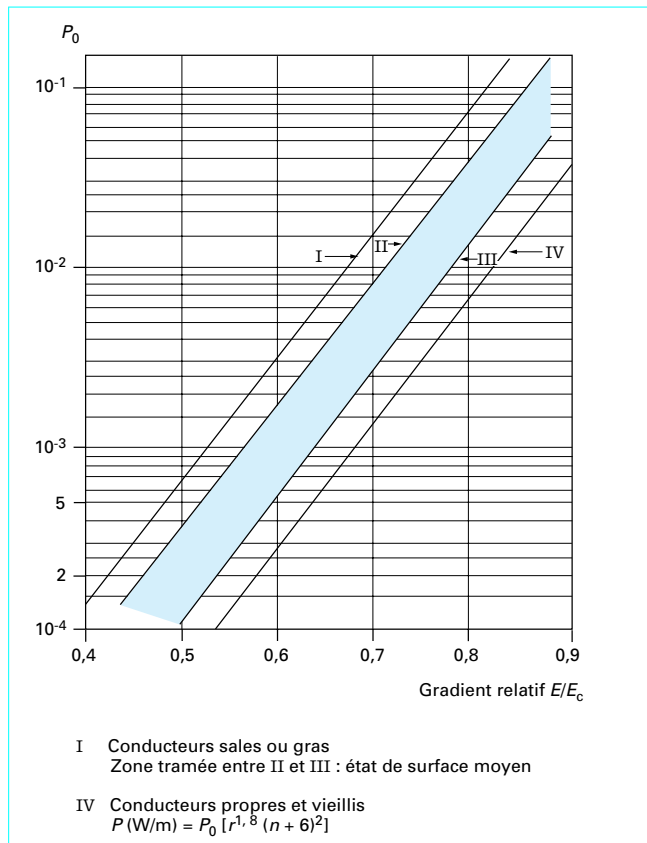


Figure 6 – Abaque de prédétermination des pertes de conducteurs secs

## 3.2 Pertes aux tensions supérieures à la tension critique (régime généralisé)

### 3.2.1 Cycle de pertes

Dans ce domaine de tensions, les charges d'espace sont émises en quantité suffisante pour que l'on puisse cesser de considérer chaque source d'ions de façon indépendante ; on admet que le conducteur émet uniformément des charges, lesquelles vont former dans l'espace voisin une couronne cylindrique ; c'est la quantité de charges contenue dans cette couronne qui régit l'émission de nouvelles charges.

Lorsque l'on trace expérimentalement, par exemple à l'aide d'un oscillographe cathodique, un diagramme représentant la quantité de charges  $q_f$  fournies par la source de tension en fonction de la tension instantanée  $v$  appliquée au conducteur, on obtient des courbes fermées symétriques, telles que celles qui sont représentées par la figure 7. En l'absence d'effet couronne, il existe simplement entre charge fournie et tension appliquée la relation de proportionnalité  $q_f = Cv$  ( $C$  étant la capacité du conducteur par rapport à la masse), et le cycle se réduit à la droite inclinée centrale. A tension croissante, l'effet couronne démarre puis augmente, et le cycle s'ouvre de plus en plus.

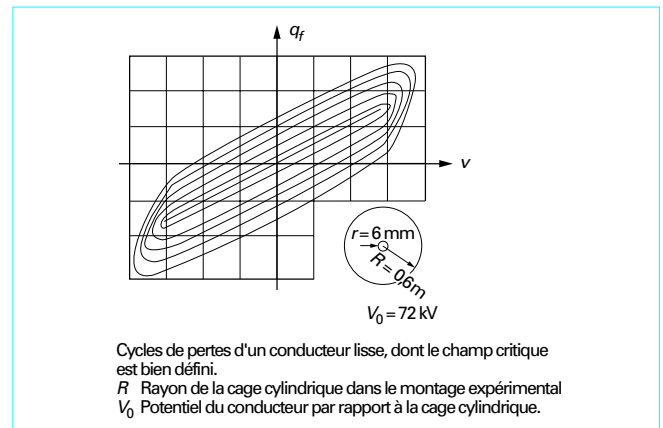


Figure 7 – Cycles de pertes tracés expérimentalement

### 3.2.2 Modèle EFCOR d'Électricité de France

#### 3.2.2.1 Principe du modèle

Le modèle EFCOR (Effet CORona) simule le mouvement des charges d'espace, dont la position dans l'espace voisin du conducteur est connue à tout instant. Les hypothèses fondamentales sont les suivantes :

- limitation du champ superficiel à sa valeur critique  $E_0$ ,
- émission de charges dès que le champ a tendance à dépasser  $E_0$ .

À ces hypothèses ont été adjointes :

- la loi du mouvement des charges  $\vec{u} = \mu \vec{E}$  [formule (14)],
- une loi de recombinaison des ions positifs et négatifs.

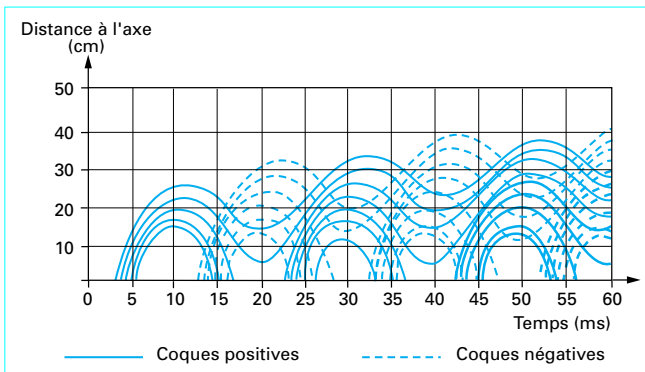
Le calcul procède alors, par itération, comme suit : à un instant donné  $t$ , le programme teste, compte tenu des charges d'espace déjà existantes, la valeur du champ superficiel du conducteur. Si ce champ est supérieur au champ critique, le conducteur émet une coque de charges, en quantité suffisante pour ramener le champ à sa valeur critique. Le programme calcule ensuite les champs locaux  $E(\rho, t)$  au niveau de chacune des coques déjà émises, toujours en tenant compte de la présence de toutes les charges, et détermine leur déplacement élémentaire au cours de l'intervalle de temps  $\Delta t$  d'une itération. Pour chacune des coques, on a donc :

$$\Delta \rho = \mu E \Delta t$$

Au cours de leur mouvement, les coques de charges de signes opposés se croisent, et c'est à ce stade qu'intervient la loi de recombinaison.

Bien que très sommaire, cette description du modèle EFCOR suffit pour montrer que, grâce aux lois d'émission et de recombinaison, la quantité de charges d'espace est connue à chaque itération et que, d'autre part, leur mouvement peut être correctement analysé. À partir de ces données fondamentales, il n'y a ensuite aucune difficulté pour déduire les pertes, puis d'autres grandeurs telles que le courant de pertes avec ses harmoniques, l'accroissement de capacité apparente du conducteur, etc. La figure 8 montre, à titre d'exemple, le mouvement des coques de charges d'espace, autour d'un conducteur de 1 cm de rayon, lorsque la tension qui lui est appliquée dépasse de 25 % la tension critique.

Le programme fournit en définitive des familles de courbes de pertes en fonction de la tension (ou du champ superficiel moyen) des conducteurs, avec le coefficient d'état de surface en paramètre. L'introduction de l'hypothèse d'ionisation brusque se traduit par le démarrage brutal des pertes à partir du gradient critique. Le régime



**Figure 8 – Mouvement des charges d'espace calculé par le programme EFCOR**

de pertes localisées n'est donc pas pris en compte, mais il s'agit là d'une limitation consciente de la représentativité du modèle EFCOR.

### 3.2.2.2 Obtention de courbes de pertes en coordonnées réduites

Un grand nombre de réseaux ont été calculés à l'aide de ce programme pour des configurations de faisceaux les plus diverses, depuis le conducteur simple de 12 mm de diamètre jusqu'aux faisceaux de  $4 \times 52$  mm. Ces réseaux couvrent donc une gamme de diamètres dans un rapport de 1 à 50. L'allure générale toujours semblable de tous ces réseaux suggère l'existence de lois de similitude, et par conséquent la possibilité d'établir un réseau universel en coordonnées réduites.

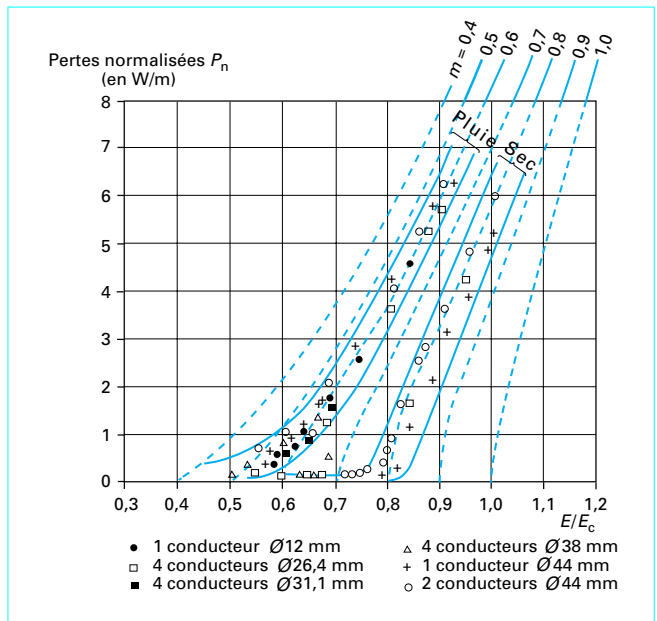
La loi de réduction a été vérifiée expérimentalement, à partir de mesures effectuées sur des conducteurs et faisceaux les plus variés, à sec et sous pluie. On a pu constater un regroupement des résultats tout à fait remarquable, comme le montre la figure 9, sur laquelle sont superposés pour différents coefficients d'état de surface  $m$ , le réseau de pertes réduites calculées par le programme EFCOR et les points expérimentaux obtenus au cours des mesures. Seuls les points correspondant aux pertes les plus faibles s'écartent des courbes calculées : ils se placent dans un domaine de champs superficiels où, même sous pluie, le régime de fonctionnement est intermédiaire entre le régime *généralisé* et le régime *localisé*. Mais il est intéressant de remarquer que la partie coudeée des courbes expérimentales présente, une fois qu'elles ont été réduites, toujours à peu près la même forme. Cela signifie que le facteur de réduction reste utilisable dans ce domaine de pertes.

### 3.2.2.3 Méthode pratique de prédétermination des pertes sous pluie

Tout comme dans le cas des pertes par temps sec (§ 3.1.3), le calcul du coefficient de réduction dimensionnel  $K$  et du champ superficiel de fonctionnement d'un conducteur ou d'un faisceau permet de prévoir un domaine de pertes, mais non les pertes effectivement dissipées dans des conditions données.

Or, alors que la définition précise d'un état de surface était impossible à sec, le dépouillement de nombreuses mesures de pertes sous pluie a permis de mettre en évidence une corrélation étroite, à champ superficiel donné, entre la valeur instantanée des pertes et le débit de pluie. Grâce au réseau de courbes réduites, on peut traduire cette corrélation en une relation univoque entre le coefficient d'état de surface  $m$  et l'intensité de la pluie.

Lorsque les conducteurs sont neufs ou gras, on obtient, d'un faisceau à l'autre, des coefficients assez divers, bien que toujours décroissants à intensité de pluie croissante.



**Figure 9 – Réseau de pertes calculées réduites, sur lequel on a porté des valeurs de pertes expérimentales relevées sous pluie, relatives à plusieurs types de faisceaux**

Mais lorsque les conducteurs sont bien vieillissés, et par conséquent présentent des états de surface physiquement comparables, on constate que la relation  $m = f(\text{pluie})$  est assez exactement la même, quels que soient le faisceau considéré ou son gradient de fonctionnement. En d'autres termes, on peut considérer que les coefficients  $m$  dépendent uniquement de l'état de surface global des conducteurs, mais ne dépendent ni du gradient de fonctionnement ni de la géométrie du faisceau.

L'ensemble des divers résultats exposés au cours de ce chapitre est entièrement résumé dans un système d'abaques que nous proposons comme un outil de travail pour la prévision des pertes sous pluie. On y trouve (figure 10) :

- le réseau des pertes réduites  $P_n = f(E/E_c, m)$  présenté ici sous une forme plus commode à utiliser, les courbes de pertes étant transformées en droites par l'emploi d'une échelle de pertes convenable,
- la formule du coefficient de réduction  $K$ ,
- les courbes de corrélation entre le coefficient d'état de surface  $m$  et l'intensité de la pluie.

Dans la formule du coefficient de réduction, les divers termes ont la signification suivante :

- $\beta$  est le facteur de Peek qui donne l'augmentation du champ superficiel critique d'un conducteur cylindrique de rayon  $r$  par rapport à la valeur du champ critique en champ uniforme,
- $r_e$  est le rayon, en cm, d'un conducteur simple. Dans le cas d'un faisceau on utilise le rayon équivalent (§ 2.5),
- $\rho$  est la distance moyenne, en cm, atteinte par les charges d'espace ; cette distance est donnée par la formule empirique figurant sur l'abaque.

En ce qui concerne le champ superficiel à introduire dans le calcul du champ relatif  $E/E_c$ , on notera que, dans le cas des faisceaux, c'est ici le champ superficiel *moyen*, équation (9), qu'il convient d'utiliser.

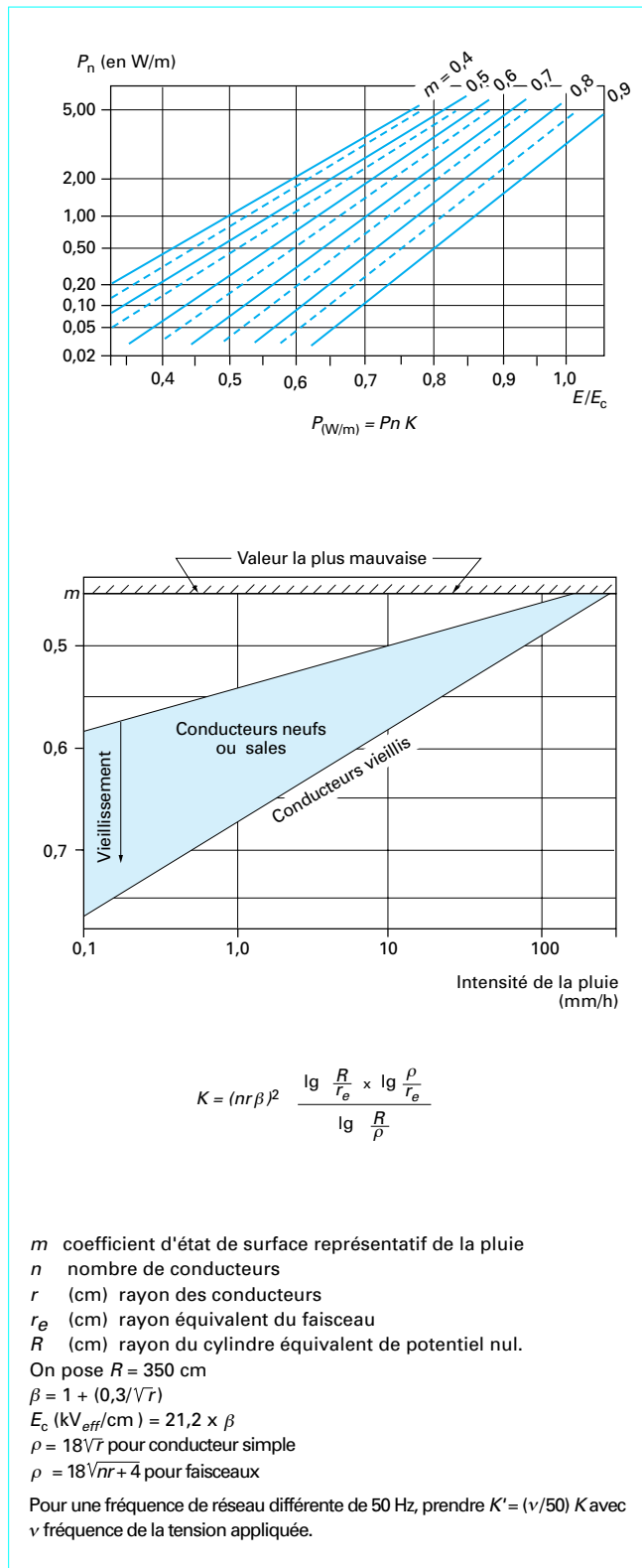


Figure 10 – Abaque de prédétermination des pertes sous pluie

**Exemple** : un exemple numérique illustrera l'emploi de ce système d'abaques. Considérons à cet effet un faisceau  $4 \times 570 \text{ mm}^2$  équipant une ligne à 765 kV. Soient les caractéristiques suivantes :

$$n = 4 \quad \beta = 1,24$$

$$r = 1,55 \text{ cm} \quad E_c = 26,3 \text{ kV/cm}$$

$$r_e = 15,5 \text{ cm} \quad K = 58$$

$$\rho = 18\sqrt{nr+4} \approx 58 \text{ cm}$$

phase centrale :  $E = 15,9 \text{ kV/cm}$  ;  $E/E_c = 0,60$

phase latérale :  $E = 15,1 \text{ kV/cm}$  ;  $E/E_c = 0,57$

À partir des abaques, on tire pour des conducteurs vieillis :

État de surface	Pertes Phase centrale W/m	Perte Phase latérale W/m	Pertes totales W/m
Faible pluie $m = 0,70$	20	16	52
Forte pluie $m = 0,55$	68	57	182

## 4. Perturbations radioélectriques dues à l'effet couronne

### 4.1 Définitions relatives aux perturbations

Le propos de ce paragraphe est de définir les principales notions et quantités utilisées dans l'étude des perturbations radioélectriques. On n'y trouvera ni démonstration ni description détaillée des théories auxquelles elle se réfère. Il s'agit plutôt d'éviter des ambiguïtés dans l'interprétation et la présentation des résultats, et de faciliter, pour les lecteurs non avertis, la compréhension du texte.

L'effet nuisible des lignes de transmission d'énergie, et plus généralement de toutes sources perturbatrices, sur la qualité des réceptions radioélectriques est due à la superposition d'un bruit radioélectrique et de l'onde porteuse du signal utile.

La qualité de la réception ou, si l'on préfère, l'effet perturbateur, dépend essentiellement du rapport entre les intensités respectives du signal et du bruit (on dit *rapport signal sur bruit*).

Afin de caractériser correctement ce rapport signal sur bruit, il convient de définir le bruit par une quantité mesurable. En général, l'intensité instantanée  $s(t)$  d'un bruit varie continuellement et de façon erratique ; mais si son énergie moyenne relevée pendant une durée  $T$  quelconque suffisamment longue (par exemple une seconde) est constante, on dit de ce bruit qu'il est *aléatoire stationnaire* [E 6 150]. Utilisant l'analyse spectrale, on peut alors passer de l'espace temporel  $s(t)$  à l'espace fréquentiel  $h(\omega)$ . Le théo-

rème de Parseval donne l'équivalence énergétique entre les deux représentations du bruit :

$$\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty h^2(\omega) d\omega \quad (19)$$

$h^2(\omega)$  est la densité spectrale du bruit à la fréquence  $f = \omega/2\pi$ .

Ce théorème montre en particulier que la valeur efficace  $b$  de la partie du bruit contenue dans une bande de fréquences étroite  $\Delta\omega$ , centrée sur une fréquence  $\omega_0/2\pi$ , s'exprime par :

$$b = \sqrt{\frac{h^2(\omega_0)\Delta\omega}{2\pi}} \quad (20)$$

Un appareil de mesure de bruit est essentiellement un voltmètre sélectif, caractérisé par une bande passante  $B = \Delta\omega/2\pi$  et que l'on peut accorder sur une fréquence centrale  $f = \omega_0/2\pi$  quelconque.

Raccordé à une antenne ou un cadre, cet appareil devient sensible à la composante électrique ou magnétique d'un bruit de nature électromagnétique.

Pour mesurer un bruit, il suffit de remarquer que la valeur efficace de ce bruit, relative à la bande passante de l'appareil, doit être égale à la valeur efficace d'un signal sinusoïdal pur, de fréquence  $\omega_0/2\pi$ , donnant la même déviation de l'appareil de lecture. Cela est la définition énergétique d'un bruit.

L'équation (20) montre alors que deux mesureurs de bruit, dont les bandes passantes sont respectivement  $B_1$  et  $B_2$ , donneront du même bruit deux valeurs efficaces  $b_1$  et  $b_2$  telles que :

$$\frac{b_1}{b_2} = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad (21)$$

Mais de nombreux bruits d'origine industrielle, et également le bruit dû à l'effet de couronne, sont, en outre, constitués par une succession d'impulsions brèves, dont la fréquence de répétition est plus ou moins stable. Aussi, dans les appareils généralement utilisés et répondant d'ailleurs à des normes internationales, on préfère exprimer, plutôt que la valeur efficace, la valeur *quasi-crête*. Cette définition conduit à des dispositifs de mesure plus simples et plus sensibles ; elle représente mieux l'effet psychologique de la gêne ressentie par un auditeur, parce qu'elle varie avec la fréquence de répétition des impulsions à peu près de la même manière que l'effet de gêne.

La figure 11 montre les transformations successives que subit, à travers les divers étages d'un mesureur de quasi-crête, un train d'impulsions appliqué à son entrée.

Les spécifications internationales auxquelles il est recommandé de se tenir, relatives aux phénomènes perturbateurs et à leur mesure, sont publiées par la CISPR (Commission Internationale Spéciale des Perturbations Radioélectriques). Pour les fréquences utilisées en radiodiffusion à modulation d'amplitude (0,15 à 30 MHz), les caractéristiques principales des mesureurs ont été fixées comme suit :

bande passante : 9 kHz

constante de temps de charge : 1 ms  
constante de temps de décharge : 160 ms } pour la détection quasi-crête

La valeur du bruit perturbateur qui résulte des caractéristiques précédentes n'est pas directement transposable à la réception en modulation de fréquence ou en télévision, car ces récepteurs présentent des bandes passantes très différentes (respectivement 120 kHz et environ 10 MHz). Il existe d'autres spécifications de mesureurs pour ces fréquences, mais nous n'en parlerons pas ici,

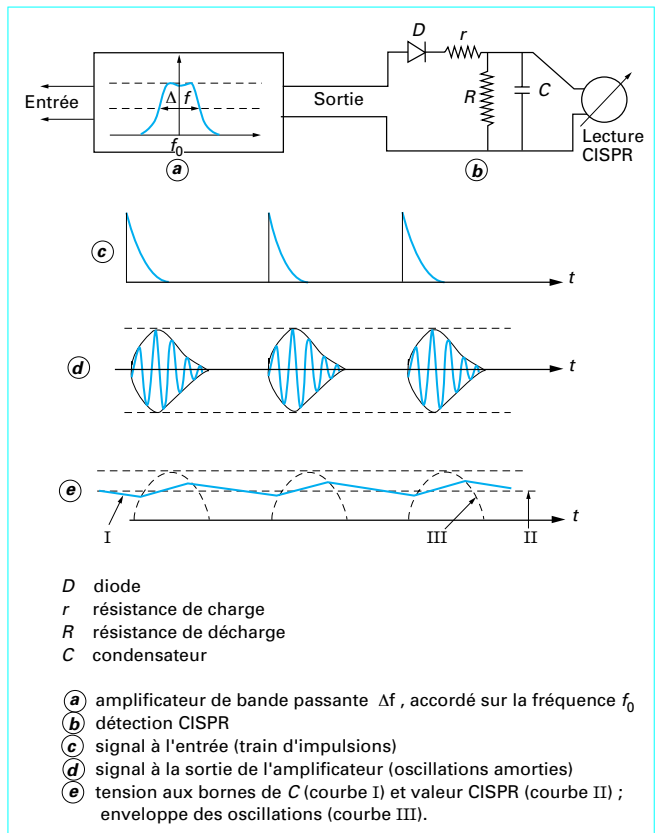


Figure 11 – Transformations successives d'un train d'impulsions à travers un mesureur CISPR

les lignes de transport ne posant pas de problème au-delà de quelques 10 MHz.

Les champs électromagnétiques, y compris les champs perturbateurs, sont généralement exprimés soit en microvolts par mètre ( $\mu\text{V/m}$ ) ou millivolts par mètre ( $\text{mV/m}$ ), soit en décibels (dB), suivant la relation :

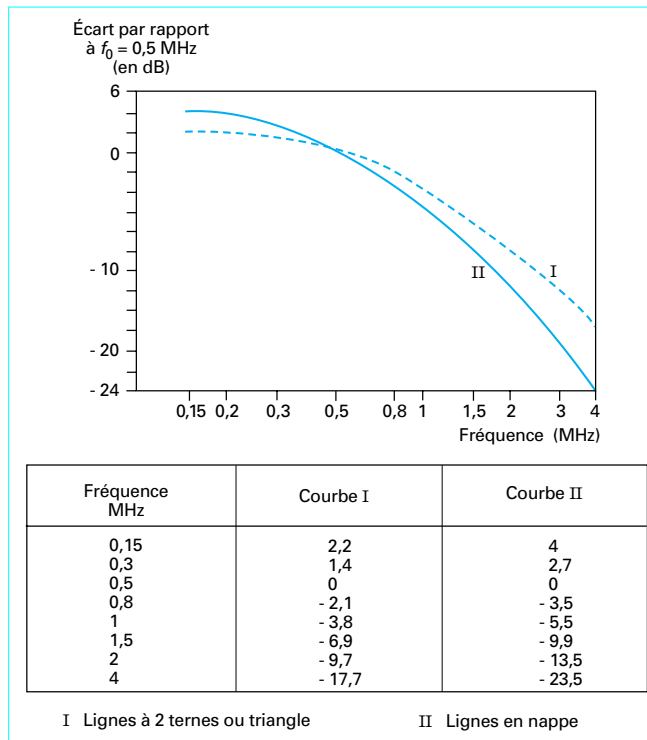
$$\text{champ en dB} = 20 \lg (\text{champ en } \mu\text{V/m})$$

Lorsque l'on mesure la composante magnétique  $H$  du champ à l'aide d'un cadre, on l'exprime cependant en champ électrique équivalent  $E$ , en raison du rapport constant  $E/H = 120 \pi \Omega$  (impédance du vide) existant entre les deux composantes du champ électromagnétique.

Ainsi, un niveau perturbateur de 46 dB signifie que le champ mesuré à l'aide d'un appareil CISPR vaut  $200 \mu\text{V/m}$ , même si la mesure a été effectuée avec un cadre.

## 4.2 Principales caractéristiques du champ perturbateur

Il s'agit ici du champ perturbateur engendré par l'effet couronne des conducteurs, ce qui est le cas des lignes de transport à haute et très haute tensions (> 200 kV). Aux tensions inférieures, ce sont les chaînes d'isolateurs qui ont une influence prépondérante : leur cas sera traité au (§ 5).



**Figure 12 – Spectres-types permettant d'estimer le champ perturbateur à une fréquence  $f$  quelconque comprise entre 0,15 et 4 MHz, lorsque le champ à  $f_0 = 0,5$  MHz est connu**

#### 4.2.1 Spectre du champ perturbateur

Le spectre est la variation du niveau perturbateur, mesuré en un point donné au voisinage d'une ligne, en fonction de la fréquence.

Les spectres mesurés sont généralement assez irréguliers, tant à cause des fluctuations continues de niveau du champ perturbateur au cours d'une mesure que pour des raisons plus subtiles, telles que des réflexions de propagation dues à des discontinuités de la ligne (pylônes d'ancrage, variations du terrain, etc.).

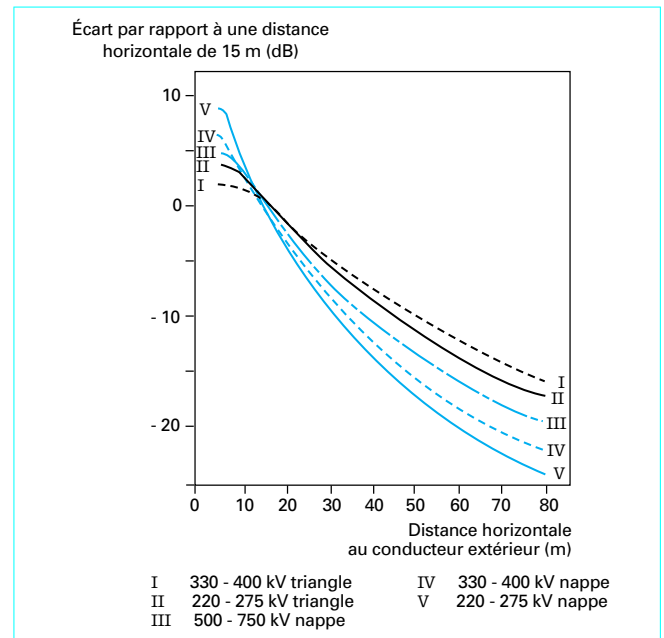
Pour les besoins des calculs de prédétermination, on en a tiré des *spectres-types* assez bien représentatifs. L'expérience a montré que l'ensemble des spectres pouvait être regroupé en deux familles, l'une s'appliquant aux lignes en *nappe horizontale*, et l'autre aux lignes à *deux ternes* et aux lignes à configuration *triangle*.

La figure 12 donne les spectres-types en valeurs relatives ; le point de référence est pris à 500 kHz, qui est l'une des fréquences de mesure généralement utilisées en Europe.

#### 4.2.2 Profil latéral du champ perturbateur

Le profil latéral est la variation du champ perturbateur en fonction de la distance à l'axe de la ligne ; il est caractérisé par une décroissance rapide. Le profil est, en général, déterminé au niveau du sol, à des fréquences inférieures à 10 MHz et pour des distances latérales n'excédant pas 200 m. Aux fréquences et distances supérieures, l'effet perturbateur des lignes devient en général négligeable.

Le profil latéral est souvent mesuré et calculé à la fréquence de référence de 500 kHz. On admet qu'il ne se déforme pas en fonction de la fréquence, bien que cette propriété ne soit pas vraie en toute



**Figure 13 – Profils-types permettant d'estimer le champ perturbateur à une distance quelconque de la ligne, lorsque le champ à 15 m de l'aplomb du conducteur extérieur le plus bas est connu**

rigueur (influence du rayonnement direct et des phénomènes de propagation). Par contre, comme pour les spectres, il subit une translation pratiquement sans déformation sous l'influence des variations de conditions météorologiques.

Comme dans le cas des spectres, et pour les mêmes raisons, les profils mesurés sont souvent irréguliers. Mais de nombreuses mesures confirmées par le calcul ont permis, ici encore, de regrouper les profils en familles relatives à des types de lignes, comme le montre la figure 13. Ils sont donnés en valeur relative, le point de référence étant fixé à 15 m de l'aplomb de la phase extérieure la plus basse de la ligne. C'est le point pour lequel l'influence de la hauteur des conducteurs sur le niveau perturbateur est minimale. Ce point correspond aussi sensiblement à une distance directe du conducteur de 20 m, distance recommandée par le CISPR lorsqu'on se contente de faire une mesure en un seul point.

#### 4.2.3 Fluctuation du niveau-distribution annuelle

L'étude systématique des fluctuations du niveau perturbateur d'une ligne nécessite l'enregistrement permanent du champ sous cette ligne pendant 1 an au moins. De nombreux chercheurs, dans de nombreux pays, ont effectué de telles mesures, de sorte que l'on possède maintenant des données assez solides sur les variations annuelles ou saisonnières du niveau perturbateur. On présente souvent ces résultats selon les méthodes de l'analyse statistique, c'est-à-dire sous forme d'histogrammes ou sous forme de distributions cumulées. Ces dernières expriment le pourcentage du temps, pendant lequel le niveau perturbateur a été inférieur à une valeur donnée.

On conçoit qu'une distribution des niveaux dépende du type de climat où est située une ligne : un climat très humide ou pluvieux augmentera le pourcentage des niveaux élevés, un climat très sec au contraire le réduira. Aussi, pour pouvoir tirer des renseignements utiles des différentes distributions obtenues, on les sépare en trois catégories de temps : beaux temps (conducteurs secs), pluie, temps



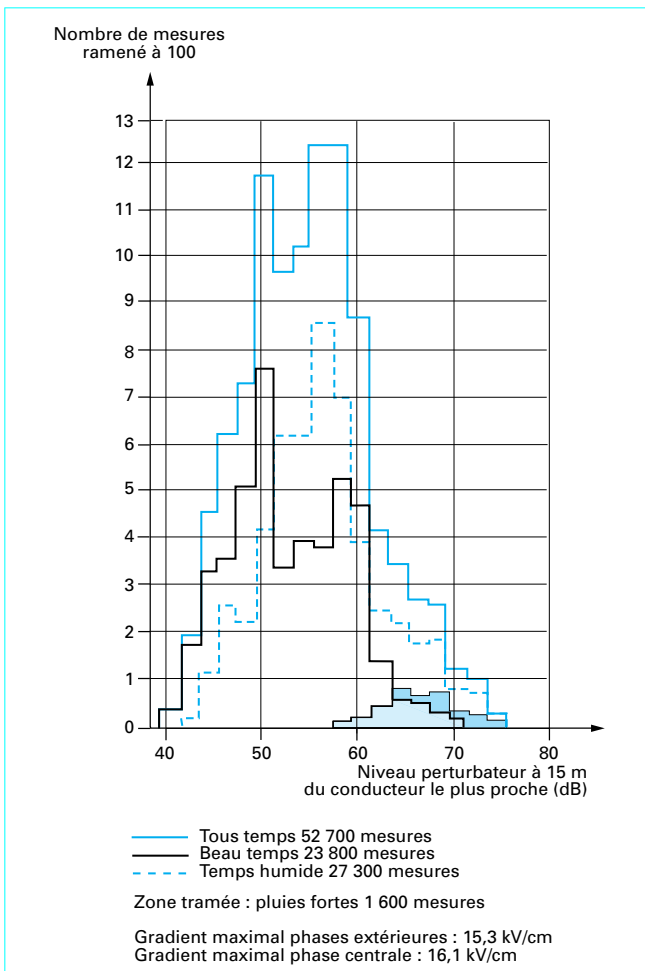
humide. Les deux premières catégories sont parfaitement définies, et permettent la recherche de certaines corrélations ; la troisième est une catégorie intermédiaire dans laquelle on regroupe des conditions météorologiques mal définies, telles que rosée, brouillard, neige, ou givre.

L'examen des histogrammes complets des distributions annuelles met en évidence l'existence de deux classes de niveaux :

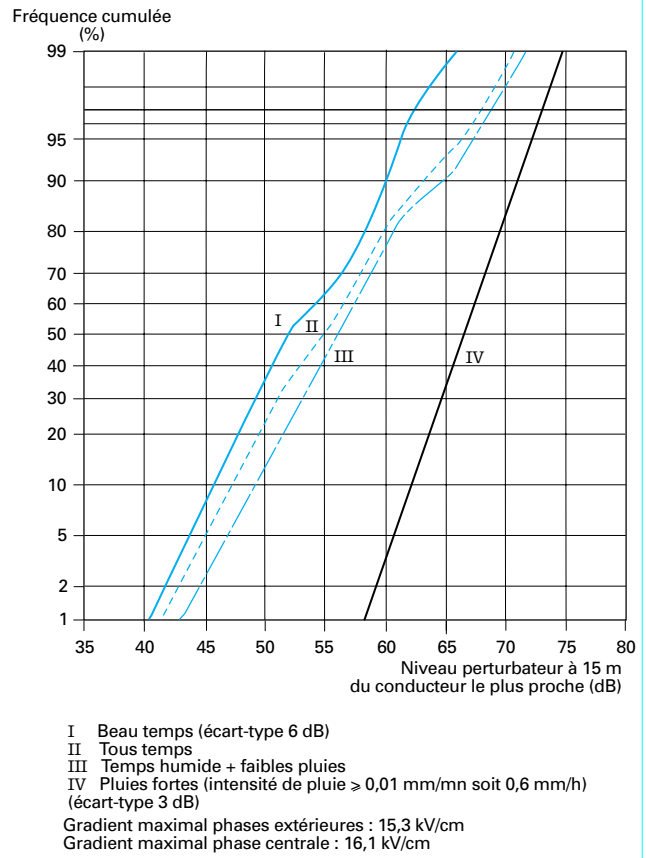
- une classe *forts niveaux*, centrée sur la moyenne annuelle de la catégorie fortes pluies, de largeur  $2\sigma = 6$  dB,
- une classe *niveau beau temps*, centrée sur la moyenne annuelle de la catégorie beau temps, de largeur  $2\sigma = 12$  dB.

La classe *forts niveaux* comporte environ 10 % des mesures annuelles, ce qui montre que ces niveaux ne sont pas exceptionnels. En effet, outre le cas de fortes pluies, un niveau élevé peut être atteint dans de nombreux cas où les conducteurs sont mouillés, et a même été observé par temps sec et chaud, avec des conducteurs fortement pollués.

**Exemple :** notons encore que les distributions représentées par les figures 14 et 15 font apparaître un écart entre niveau moyen *beau temps* et niveau moyen *fortes pluies* à environ 18 dB.



**Figure 14 – Histogramme annuel des champs perturbateurs de la ligne Génissiat-Albertville 400 kV en exploitation normale**



**Figure 15 – Distribution annuelle des champs perturbateurs de la ligne Génissiat-Albertville à 400 kV en exploitation normale**

#### 4.2.4 Influence de l'altitude

La raison physique de l'influence de l'altitude est l'abaissement du champ critique lorsque la densité de l'air décroît, comme le met en évidence la formule (1) de Peek. La variation de niveau en fonction de l'altitude est assez bien représentée par l'expression empirique suivante :

$$E_h(\text{dB}) = E_0(\text{dB}) + \frac{h}{300} \quad (22)$$

avec  $E_0$  champ perturbateur au niveau de la mer,  
 $E_h$  champ perturbateur à l'altitude  $h$  (m).

### 4.3 Méthodes de prédétermination empiriques

Il existe de nombreuses méthodes de prédétermination empiriques des niveaux perturbateurs des lignes. Leur principe commun consiste à comparer à une ligne parfaitement connue et choisie comme référence, la ligne dont on veut estimer le niveau perturbateur.

Le niveau de référence est corrigé en fonction des différents paramètres électriques et géométriques qui différencient la ligne étudiée de la ligne de référence.

Ces méthodes empiriques, qui sont en fait des méthodes comparatives, diffèrent les unes des autres par la manière dont le niveau de référence a été déterminé, et par le nombre de paramètres qui ont été pris en compte. Il n'est pas utile de les décrire toutes. Nous nous bornerons à donner la formule dite « CIGRE », qui a aussi été adoptée par le CISPR pour les besoins de la normalisation.

Cette formule simple, proposée par la Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à haute tension (CIGRE), donne le niveau perturbateur le plus probable par **beau temps sec** et précise la sommation des champs telle qu'effectuée par un appareil de mesure CISPR, à une fréquence de 0,5 MHz, à une distance radiale de 20 m du conducteur le plus proche, avec une antenne située à 2 m au-dessus du sol.

■ La formule élémentaire pour **une phase d'une ligne** est :

$$E = 3,5 g_{\max} + 12r - 30 \quad (23)$$

avec  $E$  (dB au-dessus d'un niveau de référence de 1  $\mu\text{V/m}$ ) champ électrique perturbateur,  
 $g_{\max}$  (kV/cm) gradient de tension maximal superficiel du conducteur en valeur efficace,  
 $r$  (cm) rayon du conducteur, ou du sous-conducteur dans le cas d'un faisceau.

Un calcul précis du gradient de tension maximal à la surface des conducteurs est recommandé à cause de son influence importante sur le niveau perturbateur (cf. § 2).

■ Pour une **ligne triphasée à un seul circuit**, la formule précédente doit être complétée et l'on a :

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 3,5g_{\max 1} + 12r_1 - 33 \lg \frac{D_1}{20} - 30 \\ E_2 &= 3,5g_{\max 2} + 12r_2 - 33 \lg \frac{D_2}{20} - 30 \\ E_3 &= 3,5g_{\max 3} + 12r_3 - 33 \lg \frac{D_3}{20} - 30 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

avec  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  distances radiales, en mètres, des conducteurs à l'antenne.

Ces formules peuvent être également utilisées pour prédéterminer le niveau perturbateur à des points de mesure situés à une distance différente de la distance de référence de 20 m.

La sommation de ces trois champs perturbateurs est faite de la façon suivante. Si l'un d'eux est supérieur aux autres d'au moins 3 dB, on néglige les deux autres, et le champ total  $E$  lui est égal. Sinon, le champ total  $E$  est pris égal à :

$$E = \frac{E_a + E_b}{2} + 1,5 \quad (25)$$

où  $E_a$  et  $E_b$  sont les deux valeurs les plus élevées parmi les trois valeurs ci-dessus.

■ Pour une **ligne à deux circuits** triphasés, les champs perturbateurs produits par chacun des six conducteurs sont calculés comme pour un seul circuit au point de mesure. Ensuite, les champs produits par les phases ayant même indice horaire sont ajoutés deux à

deux quadratiquement et, enfin, la sommation CISPR est appliquée aux trois champs résultants.

Il faut remarquer que cette méthode donne le champ perturbateur à 0,5 MHz. Pour obtenir le niveau perturbateur à une fréquence différente, on utilisera la correction proposée par la figure 12.

Le niveau perturbateur, pour des conditions atmosphériques autres que le beau temps sec, peut être estimé à partir des figures 14 et 15.

L'influence de l'altitude peut être prise en compte avec la formule (22).

## 4.4 Méthode analytique (Electricité de France)

Alors que les méthodes empiriques sont des méthodes globales, les méthodes dites analytiques, beaucoup plus récentes, s'efforcent de reconstituer les mécanismes de formation du champ perturbateur, en partant du phénomène générateur initial, et en prenant en compte tous les paramètres constructifs de la ligne. Elles permettent donc de calculer les profils latéraux exacts de n'importe quelle ligne, et en particulier de prévoir les profils, en forme et en valeur absolue, de lignes non encore existantes, telles que les lignes à 750 kV ou à 1 200 kV de l'avenir.

Même si elles sont difficiles d'accès pour l'utilisateur non spécialiste, leur intérêt théorique et pratique est suffisant pour justifier au moins, dans le cadre de cet article, un exposé sommaire de leurs principes.

Les différentes étapes du calcul du champ perturbateur sont les suivantes :

- détermination de la fonction excitatrice,
- calcul des courants perturbateurs : modes de propagation,
- calcul du champ perturbateur au voisinage de la ligne.

### 4.4.1 Détermination de la fonction excitatrice

#### 4.4.1.1 Introduction du concept de fonction excitatrice

Un progrès récent, apportant une amélioration importante des méthodes de calcul des perturbations, a été obtenu par une meilleure connaissance de la formation des impulsions électriques induites dans les conducteurs par les aigrettes.

Dans la représentation habituelle que l'on se fait d'une aigrette, celle-ci se comporte simplement comme un générateur d'intensité, qui impose dans le conducteur un courant déterminé uniquement par ses propres caractéristiques. Cette façon de voir est un peu rudimentaire. En réalité, les charges d'espace, formées par ionisation au voisinage du conducteur, se déplacent violemment sous l'effet du champ électrique. Ce mouvement induit des courants, non seulement dans le conducteur qui est le siège de l'aigrette, mais également dans les autres conducteurs d'un système multifilaire. Ces courants dépendent à la fois des caractéristiques propres de l'aigrette et d'un facteur lié aux capacités propres et mutuelles des

conducteurs. La *fonction excitatrice* est le concept qui rend compte des propriétés intrinsèques de l'aigrette.

Du point de vue mathématique, la fonction excitatrice est la valeur efficace de la densité spectrale des impulsions d'aigrettes, engendrées par unité de longueur d'un conducteur ; cette valeur efficace est relative à une largeur de bande  $\Delta f$  centrée sur la fréquence de mesure  $f_0$ . Mais la pratique a montré qu'on pouvait aussi définir une fonction excitatrice en valeur *quasi-crête* CISPR car il existe, entre valeur quasi-crête et valeur efficace, une relation de proportionnalité qui a été vérifiée par l'expérience.

La relation entre fonction excitatrice  $\Gamma$  et courant  $i$  induit dans un conducteur s'écrit :

$$i = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (26)$$

où  $C$  est la capacité linéique propre du conducteur considéré.

Dans le cas d'une ligne multifilaire, cette relation prend la forme matricielle :

$$[i] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} [C][\Gamma] \quad (27)$$

Ainsi, pour une activité couronne donnée d'un conducteur, c'est la fonction excitatrice qui est la grandeur invariante. Il en résulte que le courant engendré, et par conséquent le champ électromagnétique, dépendront du système de capacités défini par la géométrie de la ligne.

#### 4.4.1.2 Abaque des fonctions excitatrices sous forte pluie

Dans l'état actuel de nos connaissances, la fonction excitatrice ne peut pas être calculée à partir des caractéristiques d'un conducteur : l'expérimentation reste nécessaire pour l'atteindre. Cette expérimentation est effectuée dans des nasses de dimensions réduites, qui peuvent être réalisées de façon beaucoup plus économique qu'une ligne expérimentale triphasée en vraie grandeur ; le changement des conducteurs, et par conséquent l'étude d'un grand nombre de variantes de faisceaux, y sont aussi beaucoup plus aisés.

Par beau temps, la mesure de la fonction excitatrice est difficile à effectuer à cause des fluctuations continues du niveau et parce que ces instabilités sont d'autant plus grandes que l'échantillon de conducteur soumis à la mesure est court.

Par contre, le dépouillement d'un très grand nombre de mesures statistiques a permis de mettre en évidence au moins un type de temps où le niveau perturbateur est stable, reproductible, et parfaitement défini : sous pluie forte, à savoir pour des intensités de pluie supérieure à environ 1 mm/h.

Cette propriété est indispensable, si l'on veut pouvoir calculer le niveau perturbateur d'une ligne avec quelque précision.

On en a alors tiré profit pour tracer expérimentalement un abaque qui permet de prédéterminer, avec une précision meilleure que  $\pm 0,5$  dB, la fonction excitatrice d'un faisceau sous pluie forte, en fonction du gradient superficiel, du rayon et du nombre de ses conducteurs élémentaires. Un tel abaque est représenté à la figure 16. Il a été tracé pour la fréquence  $f_0 = 500$  kHz.

#### 4.4.1.3 Estimation de la fonction excitatrice pour d'autres conditions météorologiques

Considérant le niveau sous pluie forte comme une valeur caractéristique d'un faisceau donné, soumis à un champ superficiel donné, on peut en déduire le niveau pour d'autres conditions météorologiques en s'aidant d'une distribution statistique.

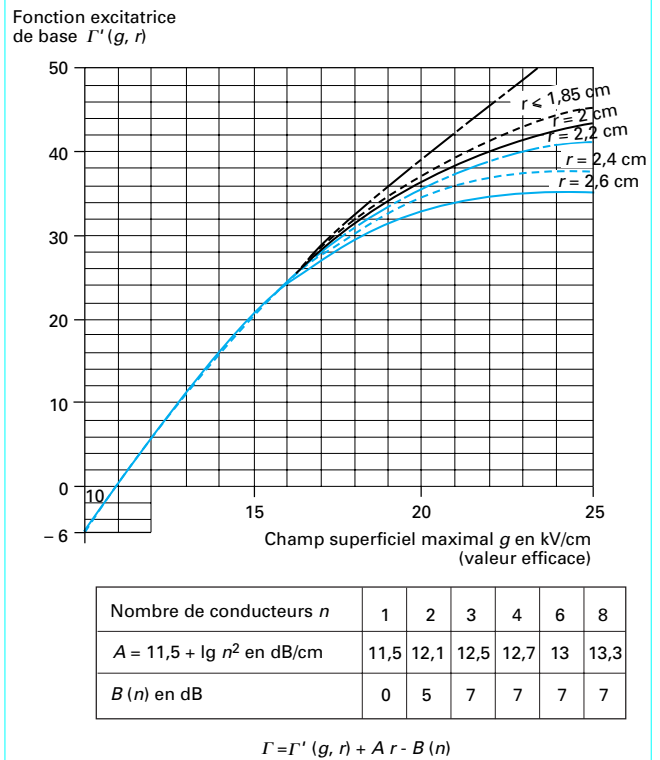


Figure 16 - Abaque de prédétermination des fonctions excitatrices  $\Gamma$  (en dB/1  $\mu\text{Am}^{-1/2}$ ) sous pluie ( $f_0 = 500$  kHz)

**Exemple :** montrons par un exemple numérique, l'emploi de cet abaque. Pour ce faire, considérons une ligne à 400 kV équipée de faisceaux de deux conducteurs de 1,55 cm de rayon. Ce faisceau fonctionne à un gradient maximal de 16,5 kV/cm.

On établit le tableau suivant.

Gradient de fonctionnement :

$$g = 16,5 \text{ kV/cm (val. eff) d'où } \Gamma'(g, r) = + 26,8 \text{ dB}$$

Rayon d'un conducteur :  $r = 1,55 \text{ cm d'où } Ar = + 18,7 \text{ dB}$

Nombre de conducteurs :  $n = 2 \text{ d'où } B(n) = - 5,0 \text{ dB}$

$$\text{Fonction excitatrice } \Gamma = 40,5 \text{ dB}$$

#### 4.4.2 Calcul des courants perturbateurs circulant dans les conducteurs

##### 4.4.2.1 Modes de propagation

En un point quelconque d'une ligne, le champ perturbateur est dû au courant total à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Mais ce courant est la superposition de tous les courants élémentaires engendrés par chaque tronçon de ligne, tels qu'on les obtient par l'équation (27). Ces courants subsistent, entre leur point de génération et le point de mesure, une atténuation de propagation, de sorte que, pour calculer le courant total, il faut d'abord étudier la propagation des courants élémentaires le long de la ligne. Cette étude s'effectue en utilisant l'analyse modale. Indiquons brièvement le principe de cette analyse. Dans le cas d'une ligne triphasée par exemple, ondes de tensions  $\bar{V}_i$  et ondes de courant  $\bar{I}_i$ , des conducteurs sont liées par le système d'équations suivant :

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{Z}_{11}\bar{I}_1 + \bar{Z}_{12}\bar{I}_2 + \bar{Z}_{13}\bar{I}_3 \\ \bar{V}_2 &= \bar{Z}_{21}\bar{I}_1 + \bar{Z}_{22}\bar{I}_2 + \bar{Z}_{23}\bar{I}_3 \\ \bar{V}_3 &= \bar{Z}_{31}\bar{I}_1 + \bar{Z}_{32}\bar{I}_2 + \bar{Z}_{33}\bar{I}_3 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

où les  $\bar{Z}_{ij}$  sont les impédances d'onde propres et mutuelles.

On a :

$$\bar{Z}_{ii} = 60 \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

$$\bar{Z}_{ij} = 60 \ln \frac{2D_{ij}'}{D_{ij}}$$

dont les notations ont déjà été définies au § 2.2.

L'expérience montre qu'un système quelconque de tensions ou de courants se propage en se déformant, c'est-à-dire que l'atténuation varie le long de la distance de propagation, et cela de façon différente sur les 3 conducteurs.

Pour rendre l'étude possible, on est conduit à admettre qu'il existe certains systèmes particuliers de tensions et de courants qui se propagent sans se déformer, avec une atténuation constante et bien définie : ce sont les modes. Physiquement, un mode est un système tel que les impédances apparentes d'onde soient les mêmes pour chaque conducteur, c'est-à-dire tel que :

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} = \frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2} = \frac{\bar{V}_3}{\bar{I}_3} = \bar{Z}_0 \quad (29)$$

Des études expérimentales ont bien mis en évidence les propriétés de conservation et de constance de l'atténuation de ces modes, donc leur réalité physique.

Si l'on veut fixer des ordres de grandeur, on peut caractériser ces modes par les valeurs suivantes, applicables à une ligne triphasée en nappe horizontale :

Mode	Courant dans le conducteur			Atténuation à $f_0 = 500$ kHz dB/km
	gauche	central	droite	
Homopolaire	+ 1	+ 1	+ 1	3 à 5
Bipolaire	+ 1	0	- 1	0,3 à 0,5
Interphase	+ 1	- 2	+ 1	0,1 à 0,2

L'atténuation de propagation est une fonction de la fréquence et de la conductivité du sol. Les valeurs indiquées ci-dessus correspondent à une fréquence de 500 kHz et à une conductivité de l'ordre de  $\sigma = 0,01 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$  ; celle-ci est assez représentative de nombreux terrains argileux et marno-calcaires.

#### 4.4.2.2 Calcul des courants de mode dans les conducteurs

On admet que les modes se propagent indépendamment les uns des autres, sans interaction mutuelle. Cette propriété permet de décomposer le système (24) des courants injectés réels en courants modaux, d'étudier la propagation de chacun des modes séparément, puis de recomposer ces courants modaux, après atténuation, pour obtenir les courants réels : la déformation du système des courants réels, au cours de sa propagation, est mise en évidence lors de cette reconstitution.

Il ne saurait être question de décrire dans le détail les différentes opérations à effectuer pour calculer les courants des conducteurs.

Bornons-nous à en donner le principe :

Soit  $m_j$  le système des courants modaux du mode  $j$  obtenu par décomposition du système (27) relatif à l'excitation  $I$  d'une des phases et soit  $\alpha_j$  le coefficient d'atténuation correspondant. À une distance de propagation  $\ell$ , le courant modal aura pour valeur :

$$m_j e^{-\alpha_j \ell}$$

Pour tenir compte, au point de mesure, de tous les courants élémentaires engendrés par toute la ligne, il convient de sommer ces courants quadratiquement (loi d'addition des phénomènes aléatoires stationnaires) ; le courant modal  $M_j$  d'une ligne supposée infinie de part et d'autre du point de mesure s'obtiendra donc, pour un effet couronne uniforme, par :

$$\left. \begin{aligned} M_j^2 &= 2 \int_0^\infty m_j^2 e^{-2\alpha_j \ell} d\ell \\ \text{soit } M_j &= \frac{m_j}{\sqrt{\alpha_j}} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

En pratique, à partir d'environ 20 km, une ligne est assimilable à une ligne infinie.

#### 4.4.3 Calcul des champs au sol. Obtention des profils latéraux

À partir des courants de mode  $M_j$ , on calcule les profils latéraux  $H_j(x)$  des champs de mode, généralement au niveau du sol ;  $x$  est la distance horizontale par rapport à l'aplomb du conducteur.

La relation entre courants de mode et champ au sol, nécessaire à l'obtention des profils, est celle des équations classiques de l'électromagnétisme en régime permanent, et s'applique sans difficulté. Une amélioration dans la forme des profils a été introduite en considérant l'image du conducteur, non par rapport à la surface du sol mais par rapport à un plan fictif situé à une profondeur définie par  $p = \sqrt{2/\mu_0 \omega \sigma}$  ; on tient ainsi mieux compte des courants de retour dans le sol.

Le champ au sol engendré par un courant  $I$  ( $\mu A$ ) circulant dans un conducteur placé à une hauteur  $h$  (m) s'exprime alors par :

$$H(x) = 60I \left[ \frac{h}{h^2 + x^2} + \frac{h + 2p}{(h + 2p)^2 + x^2} \right] \quad (31)$$

avec  $H(x)$  champ électrique équivalent, en  $\mu V/m$ .

Une fois calculés les profils de mode, et afin d'obtenir le profil perturbateur réel dû à l'excitation de l'une des phases, il convient de recombinaison point par point, les champs de modes. Cette combinaison s'effectue par addition quadratique. On aura donc, pour la phase excitée  $i$  :

$$H_i^2(x) = \sum_j H_{ji}^2(x) \quad (32)$$

Il reste ensuite à déterminer, de la même manière, le profil partiel dû à l'excitation de chacune des autres phases et, enfin, à combiner ces profils pour obtenir le profil définitif, tel que mesuré par un appareil CISPR. Cette combinaison s'effectue selon une règle semblable à celle donnée par la formule (25) du § 4.3.

Les différentes étapes qui constituent la méthode analytique ont été rassemblées dans le code de calcul ANALIG.

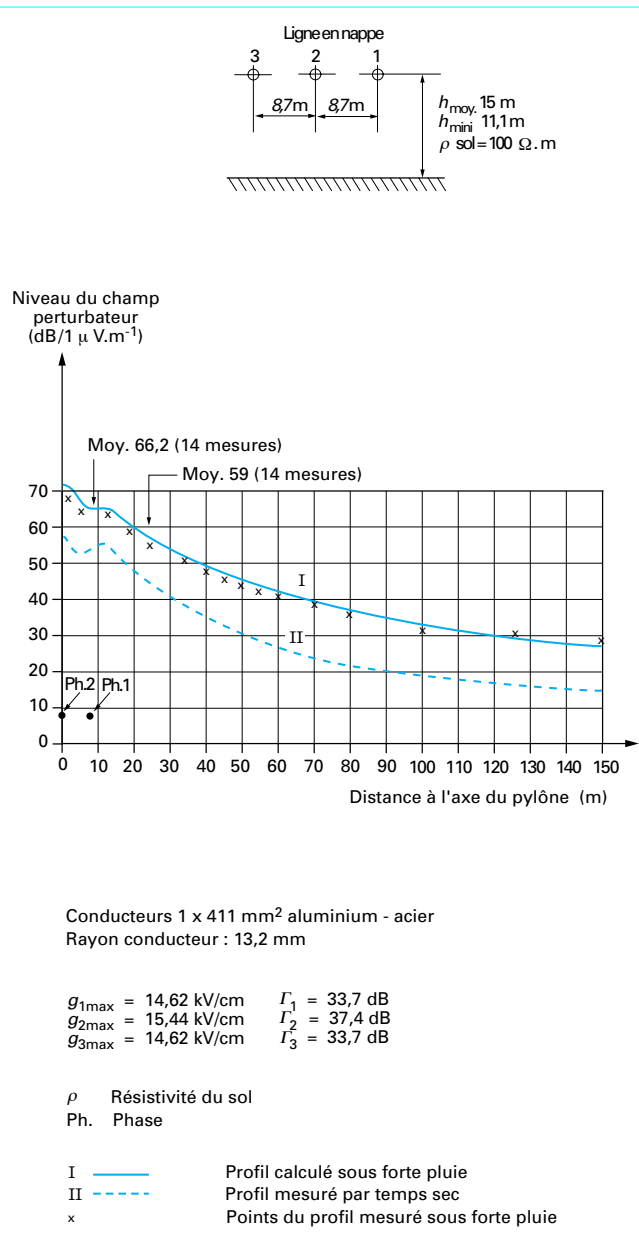


Figure 17 – Comparaison entre un profil mesuré sous pluie forte et le profil calculé par une méthode analytique (ligne 225 kV Le Chesnay-Rousson)

#### 4.4.4 Exemple de résultat obtenu

L'exposé ci-avant, nécessairement sommaire, se proposait de montrer comment on arrive à reconstituer le champ perturbateur par l'analyse détaillée de tous les mécanismes en jeu. Terminons-le par un exemple, illustré par la figure 17.

Il s'agit d'une ligne à 225 kV, en nappe horizontale, équipée de faisceaux de  $\varnothing = 26,4 \text{ mm}$ . Sur la figure, on a superposé le profil calculé à partir de la fonction excitatrice sous forte pluie (traits pleins) et le profil mesuré dans les mêmes conditions climatiques.

#### Cas des lignes à Ultra-Hautes Tensions

Selon la technique actuelle, les lignes à ultra-hautes tensions (> 800 kV) seront équipées exclusivement de conducteurs en faisceaux, en tout cas pour les phases, et sans doute aussi pour les câbles de garde. Le nombre de sous-conducteurs par faisceau pourra varier entre 4 et 8, voire 12 ou 16 pour les tensions les plus élevées (au-dessus de 1 200 kV). On montre en effet que, à section totale de conducteur donnée, il est toujours plus avantageux, du point de vue de la réduction de l'effet couronne, d'augmenter le nombre de sous-conducteurs. Seules les difficultés technologiques de mise en place et de réglage mécanique des faisceaux limitent ce nombre.

La plupart des chercheurs exprime maintenant le niveau perturbateur d'un faisceau en terme de fonction excitatrice  $\Gamma$ .

On se bornera à présenter l'une des nouvelles formules proposées. Elle est applicable **sous pluie** permanente, et pour la fréquence de 0,5 MHz :

$$\Gamma = 59 - \frac{580}{g_{\text{max}}} + 38 \lg d + K_n \quad (33)$$

où  $K_n = 0$  pour  $n < 8$

$$K_n = 5 \text{ pour } n \geq 8$$

avec

$\Gamma$  (dB au-dessus d'un niveau de  $1 \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-1/2}$ ) fonction excitatrice ;

$g_{\text{max}}$  (kV/cm) gradient de tension superficiel maximal, en valeur efficace ;

$d$  (cm) diamètre du sous-conducteur ;

$n$  nombre de sous-conducteurs dans le faisceau.

Pour l'estimation rapide du champ perturbateur par **temps sec** d'une ligne à ultra-haute tension, on pourra utiliser la formule suivante, proposée par le Japon :

$$E = 3,7 g_{\text{max}} - 12 + 40 \lg \frac{d}{2,53} + 20 \lg \frac{10h}{D^2} - 12 \lg f^2 - 17 \lg f \quad (34)$$

avec  $E$  (dB au-dessus d'un niveau de  $1 \mu\text{V}/\text{m}$ ) champ perturbateur,

$h$  (m) hauteur du conducteur extérieur de la ligne, côté mesure,

$D$  (m) distance directe entre le conducteur et le point de mesure,

$f$  (MHz) fréquence de mesure,

$d$  (cm) diamètre du sous-conducteur.

Les autres symboles ont la même signification que pour la formule précédente. On remarquera que le nombre  $n$  de sous-conducteurs n'est pas pris en compte dans cette formule simplifiée.

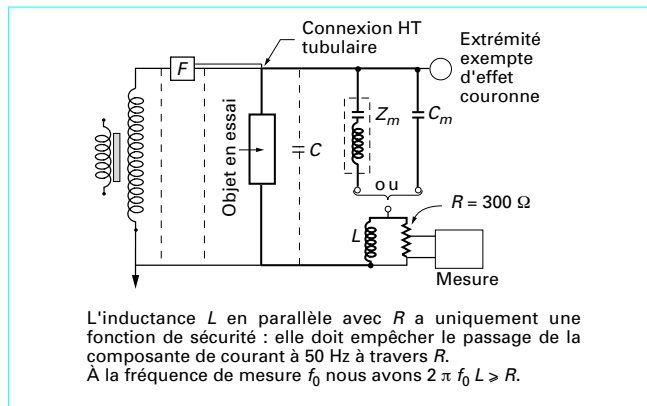


Figure 18 – Schéma recommandé par la CISPR pour la mesure en laboratoire du niveau perturbateur d'un appareillage de poste ou d'une chaîne d'isolateurs

## 5. Perturbations radioélectriques dues à l'appareillage de poste et aux chaînes d'isolateurs

### 5.1 Montage de mesure en laboratoire : schéma CISPR

À l'inverse des conducteurs d'une ligne, l'appareillage de poste et les chaînes d'isolateurs doivent être considérés comme des générateurs de perturbations ponctuels. Il est alors possible de mesurer et d'étudier leur niveau perturbateur par un montage de laboratoire, dont le schéma de principe est recommandé par la CISPR. Ce schéma est représenté sur la figure 18 et s'inspire des considérations suivantes : lorsqu'un appareil ou une chaîne d'isolateurs sont raccordés à une ligne, ils injectent dans celle-ci un courant perturbateur qui va s'y propager. La ligne est donc vue par le générateur de perturbations sensiblement comme une résistance, égale à son impédance caractéristique  $Z$  dans le cas d'un appareillage de poste ou à sa demi-impédance  $Z/2$  dans le cas d'une chaîne d'isolateurs.

L'impédance de ligne est représentée dans le schéma CISPR par la résistance  $R$ . Les courants à haute fréquence engendrés par l'appareil en essai empruntent la partie du circuit de mesure tracé en gras, qui reproduit assez bien les conditions réelles.

La principale différence réside dans la présence du condensateur  $C_m$  ou du circuit accordé  $Z_m$ , qui ont pour rôle de bloquer la tension d'alimentation dans la branche de dérivation à la terre. Le filtre  $F$  a par ailleurs un rôle de découplage en haute fréquence entre la source d'alimentation et le circuit de mesure principal.

On peut montrer qu'un appareillage ou une chaîne d'isolateurs se comportent sensiblement comme un générateur d'intensité. Soit alors  $I(\omega)$  le courant (CISPR) engendré à la fréquence  $f = \omega/2\pi$ .

D'après le schéma de la figure 18, on voit immédiatement que, si l'on néglige l'influence de  $C_m$  ou  $Z_m$ , le courant  $I(\omega)$  se partage entre la capacité parasite  $C$  et la résistance de mesure  $R$ . Cette dernière sera parcourue par un courant de mesure  $I_m$  tel que :

$$I_m = \frac{I(\omega)}{1 + jRC\omega} \quad (35)$$

Cette expression met en évidence l'existence d'une certaine fréquence de coupure, définie par  $RC\omega = 1$ . Au-dessous de cette fréquence, le courant de mesure est indépendant de la valeur de  $R$ . Or, en pratique, qu'il s'agisse du montage de laboratoire ou d'une ligne réelle, la valeur de  $RC\omega$  (ou  $ZC\omega$ ) est telle que la fréquence de coupure est de l'ordre de 5 MHz. On voit donc que, si l'on effectue la mesure à 0,5 MHz, la valeur choisie pour  $R$ , en vue de représenter  $Z$ , n'est pas critique. Les spécifications CISPR recommandent la valeur 300  $\Omega$  ; le niveau perturbateur d'un appareil mesuré en laboratoire à l'aide du schéma CISPR, est alors exprimé, par convention, par la tension à haute fréquence existant aux bornes de ces 300  $\Omega$ , soit :

$$V(\text{CISPR}) = I_m \times 300$$

Cette tension est généralement exprimée en  $\mu\text{V}$ , ou en dB/1  $\mu\text{V}$ .

### 5.2 Niveau perturbateur d'une chaîne d'isolateurs ou d'un appareillage de poste

On a observé que les perturbations engendrées par les isolateurs de type capot-tige (cf dans ce traité, articles sur les *Lignes aériennes*) étaient dues à des petites étincelles de surface se formant entre le capot et le corps isolant ou entre la tige et le corps isolant ; les premières apparaissent plus tôt en fonction de la tension, mais les secondes sont plus intenses. Lorsque la chaîne est très longue, la répartition de la tension s'effectue très mal entre les éléments successifs, de sorte que les éléments les plus contraints peuvent supporter jusqu'à 15 % de la tension totale et engendrent des perturbations importantes.

On améliore la répartition du potentiel et on réduit beaucoup ces perturbations en disposant autour de la chaîne un **anneau de garde** convenablement dimensionné.

Mais il faut bien entendu que cet anneau soit lui-même exempt d'aigrettes. C'est ainsi que des chaînes d'isolateurs pour réseaux 225 kV voient leur niveau fortement augmenter lorsqu'elles sont équipées d'électrodes de garde en forme de cornes (pointes), alors que leur niveau serait réduit par une électrode convenablement conçue.

Les accessoires tels que pinces, palonniers, entretoises engendrent des perturbations, lorsqu'ils présentent des angles vifs, des gouppilles ou vis constituant des pointes. Une étude convenable de ces éléments permet de réduire leur effet perturbateur. On peut également protéger les pinces et palonniers des chaînes par des électrodes de garde spéciales.

Nous illustrerons cette influence des électrodes de garde sur le niveau perturbateur d'une chaîne, par la figure 19.

Cette figure représente des courbes de variation du niveau perturbateur en fonction de la tension, relevées à l'occasion de l'étude de chaînes d'isolateurs pour lignes à 750 kV. On voit nettement l'amélioration apportée par la mise en place de divers anneaux de garde.

Les perturbations dues à l'appareillage de poste sont en général essentiellement engendrées par les aspérités des pièces métalliques sous tension, beaucoup plus que par les supports isolants. Les remèdes sont assez évidents : arrondir tous les angles vifs, éviter les pointes, ou protéger celles-ci, lorsqu'elles sont fonctionnellement nécessaires, par des anneaux pare-effluves.

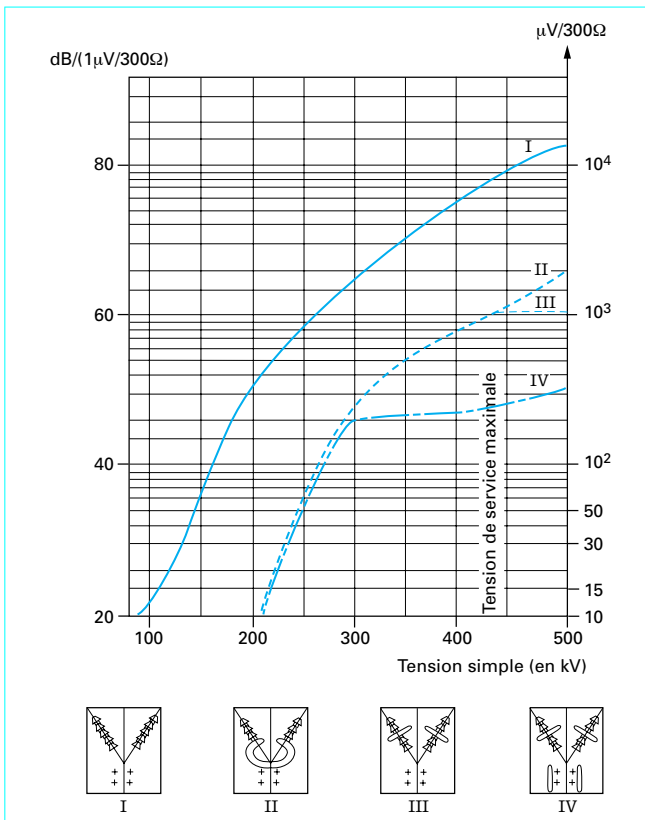


Figure 19 – Niveau perturbateur, en fonction de la tension, d'une chaîne d'isolateurs en V pour ligne à 750 kV

### 5.3 Valeurs admissibles du niveau perturbateur

#### 5.3.1 Cas des chaînes d'isolateurs pour lignes à haute tension

On peut se demander quelle est la valeur limite admissible, pour que le niveau perturbateur dû aux chaînes d'isolateurs ne soit pas gênant.

Dans le cas des lignes à haute tension, le critère sera le suivant : la contribution des chaînes d'isolateurs au champ perturbateur d'une ligne devra être négligeable devant celui qui est engendré par l'effet couronne des conducteurs, même dans les conditions où celui-ci est le plus faible.

Le calcul aboutit à fixer les limites suivantes, pour des chaînes à l'état sec :

Tension nominale de la ligne $U$ (en kV)	150	225	400	750
Tension perturbatrice (en $\mu V$ )	180	1 000	1 800	3 200
Limite d'une chaîne aux bornes de 300 $\Omega$ (en dB/1 $\mu V$ )	45	60	65	70

#### 5.3.2 Cas de l'appareillage de poste placé au départ d'une ligne

On raisonne, dans ce cas également, en considérant l'appareillage comme un générateur de courant perturbateur, puisque le courant injecté dans la ligne est largement indépendant des impédances extérieures.

S'il y a  $N$  appareils par départ, produisant chacun le même courant perturbateur  $I$ , le courant total sera  $I\sqrt{N}$ .

Si un poste donné comporte  $n$  départs de lignes, les courants injectés se partageront entre ces diverses lignes, chacune recevant  $1/n$  du courant total. En supposant alors que chaque départ possède un même nombre  $N$  d'appareils, et que tous ces appareils présentent le même niveau, on calcule facilement le courant  $i$  injecté par ligne :

$$i = I\sqrt{N/n} \quad (36)$$

Le cas du poste en antenne, où  $n = 1$ , est donc le plus défavorable. En se basant sur ces diverses considérations, Électricité de France a été conduit à proposer les valeurs suivantes des courants perturbateurs de l'appareillage de poste :

Tension nominale $U$ en kV	15	20-30	45-63	$\geq 90$
Tension perturbatrice en $\mu V$	250	600	1 200	2 500
Limite de l'appareillage en dB/1 $\mu V$	48	58	62	68

Nota : la limite n'a pas encore été fixée pour l'appareillage des futurs réseaux à 750 kV.

Pour se donner une marge, et pour tenir compte dans une certaine mesure d'une éventuelle dégradation dans le temps de l'appareillage, on retient le niveau relevé à une tension légèrement supérieure à la tension de fonctionnement normale : on prend  $(U/\sqrt{3}) \times 1,2$ . Par ailleurs, on trace toujours la courbe complète de variation du niveau, cela afin de vérifier qu'il n'existe pas de croissance brusque de ce niveau au voisinage de la tension de fonctionnement.

#### 5.3.3 Cas des lignes à moyenne tension ( $\leq 30$ kV)

Les conducteurs des lignes de tension  $\leq 30$  kV sont soumis à un gradient suffisamment faible (de l'ordre de 3 à 6 kV/cm) pour n'engendrer aucun effet couronne, même sous pluie. Les perturbations que l'on peut observer sont uniquement dues aux isolateurs.

Comme les conducteurs de phase de ces lignes sont relativement rapprochés, le champ perturbateur au sol est dû au seul mode homopolaire, les autres modes pouvant être négligés. La relation entre courant perturbateur  $I_c$ , mesuré en laboratoire sur une chaîne, et champ sous la ligne est alors beaucoup plus facile à établir. À l'aplomb de la ligne, on a pratiquement, entre 0,5 et 1 MHz, la relation suivante :

$$E \text{ (dB)} = I_c \text{ (dB)} + 34 \quad (37)$$

Cette relation est valable pour une distance entre poteaux de 64 m et une hauteur au-dessus du sol de 8 m. Un doublement de la portée entraîne une réduction théorique de champ de 3 dB.

Le courant perturbateur injecté à chaque poteau dépend du type d'isolateurs utilisés.

Dans le cas d'isolateurs rigides, l'effet perturbateur est dû à des petites étincelles se formant entre le conducteur et le corps de l'isolateur au niveau de l'attache : une attache desserrée peut nettement accroître les perturbations. Sous pluie, les gouttes d'eau court-circuitent les petits intervalles d'air, et les perturbations disparaissent presque totalement. Le niveau perturbateur est le plus élevé par

ambiance sèche et chaude et atteint alors, à la tension nominale de l'isolateur, 500 à 1 000  $\mu\text{V}/300 \Omega$ , soit 1,7 à 3,3  $\mu\text{A}$  ou 5 à 10 dB.

Dans le cas des *isolateurs suspendus*, capot-tige ou isoblocs, le niveau perturbateur normal est négligeable par temps sec ; il croît un peu sous pluie, mais reste néanmoins extrêmement faible.

## 6. Perturbations radioélectriques aux fréquences télévision

### 6.1 Perturbations actives

■ Par temps très chaud et très sec, on constate que certaines lignes à moyenne tension équipées d'isolateurs suspendus, produisent de violentes perturbations.

Celles-ci sont inexplicables à partir des considérations exposées au paragraphe précédent, n'apparaissent normalement pas en laboratoire et présentent un spectre anormal suffisamment étendu vers les fréquences élevées pour gêner les réceptions de télévision.

Une analyse détaillée des mécanismes qui ont lieu lorsque ces phénomènes se manifestent a montré que ceux-ci étaient dus à de **mauvais contacts** aux articulations de pièces métalliques appartenant à des éléments différents : articulation des pièces de suspension des conducteurs et des *ball-sockets* entre deux isolateurs capot-tige (cf., dans ce traité, articles sur les *Lignes aériennes*). L'**oxydation**, l'introduction de **petites poussières** peuvent être suffisantes pour créer une barrière isolante dont la rigidité diélectrique est de plusieurs centaines de volts. À chaque alternance de la tension, cette barrière est le siège de claquages, qui chargent brutalement la capacité formée par les isolateurs. On peut donc parler ici de perturbations par *microarcs en série*.

Cette interprétation des phénomènes explique alors un certain nombre d'observations : les lignes dont les conducteurs ont une petite section (faible portance des isolateurs) sont les plus sujettes à ces perturbations, qui n'apparaissent au contraire jamais sur les lignes à haute tension ; le vent déclenche souvent une *gerbe* de parasites, de même qu'un choc mécanique sur un poteau. Enfin, c'est un type de perturbation qui diminue progressivement avec l'augmentation de l'humidité, pour disparaître totalement sous pluie.

Les remèdes à appliquer pour supprimer les perturbations par claquage série sont aisés : on peut, soit shunter les articulations par une petite tresse métallique, soit injecter dans ces articulations une graisse conductrice spéciale qui assure un contact suffisant pour supprimer la barrière isolante.

■ On citera pour mémoire un phénomène perturbateur récemment mis en évidence à l'Université de Toronto. Lorsque, sous pluie, une **goutte d'eau** tombe à proximité immédiate d'un conducteur sous haute tension, sans toutefois le toucher, il se produit entre la goutte et le conducteur une **microdécharge** (microarc) par couplage capacitif ; il en est de même lorsque la goutte va tomber sur le conducteur, une fraction de millimètre avant le contact. Dans les deux cas, la microdécharge génère une onde électromagnétique, dont le spectre s'étend jusque vers le gigahertz, et est donc capable de perturber une réception en télévision. Mais il faut noter que cette perturbation n'affecte que les signaux utiles très faibles, et n'a pas d'incidences en Europe, où la couverture du territoire en émetteurs est toujours bien assurée.

### 6.2 Perturbations passives

Les perturbations produites par une ligne sont dites *passives*, si elles résultent de la seule présence de la ligne, indépendamment du fait qu'elle soit sous tension ou non. Elles sont alors dues aux réflexions des ondes sur les conducteurs et sur les pylônes métalliques.

D'une façon générale, les ondes réfléchies sont la cause de l'apparition d'images fantômes sur l'écran d'un récepteur de télévision. Dans des conditions extrêmes, où le niveau des réflexions est très important, la synchronisation du récepteur peut être perturbée. La présence et la gravité de ces phénomènes dépendent :

— du rapport entre le champ électromagnétique incident et le champ réfléchi ;

— du retard entre la modulation portée par l'onde réfléchie par rapport à la modulation portée par l'onde directe.

Plus le retard entre l'onde réfléchie et l'onde incidente est grand, plus le taux de réflexion exigé par une bonne réception de TV doit être faible.

On admet que, pour que l'onde réfléchie ne produise que des images fantômes non gênantes, un rapport entre champ direct et champ réfléchi de 32 dB au minimum doit être respecté. Cette valeur s'applique lorsque la séparation temporelle entre image principale et image fantôme est égale ou supérieure à 2  $\mu\text{s}$ .

### 6.3 Remèdes

Jusqu'à présent, on n'a pas réussi à trouver une solution efficace pour prévenir les réflexions produites par les lignes à haute tension. Pour une réception de télévision satisfaisante dans un champ composé d'ondes réfléchies, une antenne extérieure est une condition nécessaire.

Cette antenne doit avoir une caractéristique directionnelle suffisamment marquée permettant, dans un secteur assez vaste, l'atténuation des ondes réfléchies par rapport à l'onde incidente. L'antenne doit être placée le plus haut possible, loin d'objets réfléchissants. Un autre objet placé devant (telle qu'une autre antenne) peut réfléchir l'onde réfléchie, annulant ainsi les caractéristiques directionnelles de l'antenne.

Plus la fréquence est élevée, plus les caractéristiques directionnelles d'antennes qui se trouvent dans le commerce sont bonnes et plus les réflexions de la ligne tendent à décroître. Pour ces raisons, les problèmes concernant la réception de TV se produisent en général dans la bande de fréquence la plus basse, c'est-à-dire la bande T (41 à 68 MHz), jusqu'à des distances d'environ 600 m de la ligne.

## 7. Effet couronne sur les lignes à courant continu

Pour les caractéristiques générales des liaisons à courant continu, on se reportera dans ce traité à l'article D 4760 *Transport d'énergie en courant continu à haute tension*. En ce qui concerne le problème particulier de l'effet couronne des lignes à courant continu, il suffit de savoir que les tensions de fonctionnement de ces liaisons sont comprises entre  $\pm 100 \text{ kV}$ , pour les liaisons les plus anciennes, à  $\pm 1 000 \text{ kV}$ , pour les projets les plus récents. Les lignes à courant continu peuvent fonctionner soit en monopolaire (positif ou négatif)



avec retour par le sol, soit en bipolaire. Comme en courant alternatif, on est conduit à utiliser, à tension de service croissante, des faisceaux de conducteurs pour réduire le champ superficiel.

## 7.1 Aspect physique de l'effet couronne en tension continue

Lorsque l'on porte un conducteur à une tension continue et que l'on fait croître celle-ci, on voit apparaître tous les modes d'émission de charges qui ont été décrits en courant alternatif (cf. § 1.1.3) : en particulier, les petites aigrettes ou impulsions de Trichel en polarité négative, les grandes aigrettes ou *streamers* en polarité positive. L'émission d'Hermstein, qui est un régime d'émission continue de charges sans impulsions, est également présente.

Mais, la différence avec l'effet couronne en tension alternative, où les émissions de charges sont concentrées au voisinage de la crête de la sinusoïde de tension, est que l'émission de charge est ici permanente, et injecte, dans l'espace environnant le conducteur, des ions unipolaires. Il en résulte qu'une charge d'espace se constitue, remplissant tout l'espace entre le conducteur et le sol, ainsi qu'entre conducteurs lorsque le système est bipolaire.

Au voisinage immédiat du conducteur, la densité de charge d'espace est suffisamment élevée pour agir comme écran et pour modifier le champ électrique superficiel, de sorte que le champ superficiel effectif diffère notablement du champ statique calculé sans charges d'espace.

Sur les lignes à courant continu, le champ superficiel statique est de l'ordre de 20 à 35 kV/cm (ce qui correspondrait, en tension alternative à des champs de 14 à 25 kV/cm, exprimés en valeur efficace).

Comme en tension alternative, ce champ sert de valeur de référence pour la prédétermination des pertes et des perturbations radioélectriques.

## 7.2 Pertes par effet couronne

Sous l'effet du champ électrique local, les charges d'espace dérivent, en migrant du conducteur vers le sol (et vers le conducteur de polarité opposée dans le cas d'une ligne bipolaire).

Au mouvement de charges correspond une densité de courant électrique diffusé dans l'espace, mais dont on peut mesurer les valeurs à la surface des électrodes.

Pour la mesure des pertes, il apparaît généralement plus simple de mesurer le courant  $I_c$  émis par le conducteur.  $U$  étant la tension de ce dernier par rapport à la terre, les pertes s'écrivent simplement

$$P_m = UI_c$$

Lorsque la ligne est bipolaire avec un conducteur positif (+) et un conducteur négatif (-), les pertes valent :

$$P_b = U^+ I_c^+ + U^- I_c^-$$

avec  $U^+$  et  $U^-$  tensions par rapport à la terre.

Bien que le mécanisme de formation des pertes soit assez différent en continu et en alternatif, on observe expérimentalement que l'ordre de grandeur des pertes reste le même, à géométrie de conducteur (ou de faisceau) donnée, et à champ superficiel égal, exprimé en valeur de crête. En particulier, les pertes sont très sensibles à l'état de surface des conducteurs, et augmentent notablement

sous brouillard et sous pluie. Elles sont sensiblement les mêmes, quelle que soit la polarité du conducteur.

## 7.3 Perturbations radioélectriques

■ L'expérience montre qu'il existe de très grandes analogies entre le champ perturbateur des lignes à courant continu et celui des lignes à courant alternatif.

En particulier, le spectre de fréquence est sensiblement le même, ce qui n'est pas surprenant, puisque des modes d'émission de charges par impulsions sont également les mêmes.

Le profil latéral d'une ligne bipolaire est à peu près symétrique par rapport au conducteur positif. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que le conducteur négatif produit un moindre niveau perturbateur que le positif, en raison des mécanismes d'ionisation différents dont nous avons parlé plus haut. Avec le même gradient de tension pour les deux conducteurs, la différence entre leurs contributions au niveau perturbateur est d'au moins 6 dB. On peut donc considérer que la contribution d'un conducteur négatif au niveau perturbateur global d'une ligne bipolaire est négligeable. Pour une ligne monopolaire négative, le niveau perturbateur peut même être inférieur de 20 dB à celui d'une même ligne à polarité positive.

■ Le calcul des profils des lignes à courant continu s'effectue comme pour les lignes à courant alternatif, puisque toutes les théories qui impliquent la fonction excitatrice et la propagation modale (§ 4.4.2) restent applicables.

■ Mais une différence très importante apparaît lorsque l'on considère l'influence des conditions atmosphériques. Alors que, pour les lignes à courant alternatif, le niveau perturbateur augmente d'une vingtaine de décibels entre les conditions de beau temps et de pluie, on observe l'inverse pour les lignes à courant continu.

Ainsi, les niveaux perturbateurs les plus élevés d'une ligne à courant continu apparaissent normalement dans les conditions de beau temps. Au début d'une chute de pluie ou pendant une précipitation de neige sèche, le niveau peut temporairement s'élever mais, lorsque les conducteurs sont complètement mouillés, il retombe au moins de 10 dB. Le niveau peut également être influencé par la configuration de la ligne.

Pour tenter d'expliquer ces différences de comportement par rapport aux lignes à courant alternatif, de nombreuses hypothèses ont été formulées, mais aucune n'a reçu confirmation et des travaux doivent encore être entrepris.

Un domaine dans lequel le comportement des lignes à courant continu diffère de celui des lignes à courant alternatif est l'influence du vent. Certains travaux ont indiqué que, pour un vent se dirigeant du conducteur négatif vers le positif, le niveau perturbateur s'élève avec la vitesse du vent à partir de 3 m/s d'environ 0,3 à 0,5 dB par mètre par seconde supplémentaire. Pour un vent inverse l'effet est nettement moindre.

■ Une autre différence entre les perturbations produites par les deux types de lignes tient à leur effet subjectif. Le bruit, produit par une ligne à courant continu n'étant pas découpé par les alternances de la tension, apparaît à l'oreille moins heurté, plus fluide si l'on peut dire, que celui d'une ligne à courant alternatif.

■ Enfin, dans le cas des liaisons à courant continu, il convient de mentionner les perturbations ayant pour origine les trains d'onde de tension d'allumage des redresseurs. En fonction du type de redresseurs (thyristors ou vapeur de mercure), des dispositifs d'amortissement, employés pour d'autres fins, peuvent aider à limiter cette perturbation.

Des écrans additionnels pour ces groupes redresseurs ou un aménagement spécial sont nécessaires pour réduire cette interférence en plus des dispositifs tels que réactance de lissage et condensa-

teurs placés du côté continu. L'utilisation des filtres inductifs conventionnels prévient la propagation de l'interférence radioélectrique au-delà de 10 km du poste sur le réseau à courant continu.

Le côté alternatif est habituellement équipé de filtres d'harmoniques et de circuits bouchons pour les hautes fréquences.

Le rayonnement direct émis par le poste décroît avec la distance  $D$  proportionnellement à  $1/D^2$  au voisinage du poste et proportionnellement à  $1/D$  pour de plus grandes distances. Le point de transition entre ces deux fonctions ( $1/D^2$  et  $1/D$ ) se déplace vers le poste lorsque la fréquence augmente ; par exemple, à la fréquence de 1 MHz, le point de transition se trouve à 200 m du poste.

## 8. Règles d'établissement de valeurs limites des perturbations

### 8.1 Critères techniques

Alors qu'il est facile et peu onéreux de fixer une limite aux perturbations d'appareils tels que les appareils électrodomestiques, le choix de limites, dans le cas des lignes de transport d'énergie, déborde du cadre purement technique et dépend largement de conditions économiques.

Dans cet article, il a été clairement montré que les perturbations dues aux conducteurs des lignes à haute et très haute tensions sont pratiquement imposées par la tension et la section des conducteurs, de sorte que, une fois ce choix fait, l'ingénieur n'a qu'une très faible emprise sur l'amplitude du phénomène ; il ne peut guère que remédier à d'éventuelles anomalies. Or ce choix est fortement conditionné par des considérations économiques ; en particulier, au début de l'exploitation d'un nouvel échelon de tension, l'optimum économique incite plutôt à une section assez faible, fût-ce au prix d'un effet couronne non négligeable. Il est alors évident que, au voisinage d'une ligne, il n'est pas possible de protéger l'écoute de tous les émetteurs de radiodiffusion, quelle que soit leur implantation (émetteurs hors du territoire national notamment) et quel que soit le signal utile reçu.

En France, par exemple, TDF (Télédiffusion de France) délimite la **zone de service** d'un émetteur par la condition que le champ utile soit supérieur ou égal à 3 mV/m (soit, d'après le § 4.1 70 dB) pour la bande de fréquence 150 à 225 kHz (grandes ondes ou ondes kilométriques) et à 2 mV/m (66 dB) pour la bande 0,5 à 1,6 MHz (ondes moyennes ou ondes hectométriques). Dans la mesure où tout le territoire est couvert, et en acceptant comme raisonnable un rapport signal sur bruit de 30 dB, une plainte ne saurait alors être recevable tant que le champ perturbateur reste inférieur à 40 dB à 500 kHz.

Même si les niveaux limites auxquels on aboutit par cette méthode ne sont pas techniquement ou économiquement réalisables, ils fournissent une valeur de référence en cas de litige avec un riverain plaignant.

Par ailleurs, il convient d'introduire une définition probabiliste de la notion de gêne, compte tenu de la distribution temporelle des niveaux perturbateurs d'une ligne (§ 8.2).

Supposons qu'une ligne ait été techniquement définie (section et éventuellement nombre de conducteurs s'il s'agit de faisceaux) fixant une valeur, ou mieux une distribution de niveaux perturbateurs, convenue d'un commun accord entre l'exploitant ou le cons-

tructeur de la ligne et les autorités chargées de la protection des réceptions radioélectriques.

Il reste à indiquer les **précautions** à prendre, lors de la construction de la ligne, pour que les valeurs convenues soient effectivement respectées. Pour cela, deux conditions sont nécessaires :

- les **niveaux d'effet couronne** doivent être conformes aux niveaux contractuels, tels qu'ils ont été calculés ;
- les **chaînes d'isolateurs** et les accessoires de ligne doivent produire un **niveau perturbateur négligeable** devant celui des conducteurs.

■ Le respect de la **première condition** est essentiellement lié à l'état de surface des conducteurs. Rappelons en effet que la distribution annuelle des **niveaux** pourra être très différente selon que les conducteurs seront propres ou sales, ou encore que leur surface sera lisse ou égratignée, avec microaspérités. Il en résulte que la pose des conducteurs devra se faire avec le plus grand soin, sans les traîner sur le sol, afin d'éviter la formation d'éraflures ou d'adhérences de terre.

La graisse superficielle, retenant des impuretés ou même des insectes et formant elle-même des aspérités, devra être autant que possible prohibée ; si des circonstances particulières, comme par exemple le risque de corrosion, conduisent l'exploitant à demander un graissage des brins, ce graissage devra se limiter aux couches internes du câble ; de plus, une graisse très visqueuse et à haut point de goutte sera exigée afin d'éviter qu'elle ne migre vers la surface du câble.

Enfin, l'estimation du niveau perturbateur de la ligne par temps sec devra prendre en compte le degré de pollution de la région traversée : s'il s'agit d'une région industrielle, où des fumées et des poussières sont produites, il sera prudent de s'attendre à une majoration du niveau perturbateur par rapport au niveau moyen calculé en moyenne, on mettra sur une majoration de 5 à 10 dB par rapport au niveau le plus probable à sec.

■ En ce qui concerne les **chaînes d'isolateurs**, il est indispensable de vérifier leur niveau perturbateur par un essai de laboratoire ; cet essai montrera s'il y a lieu de corriger le niveau d'origine par une modification des anneaux de garde ou même en choisissant un autre type d'isolateurs. On tiendra également compte du degré de pollution locale pour s'assurer que les niveaux restent contractuels, même sous brouillard ou pluie.

### 8.2 Définition des limites du niveau perturbateur

Cette définition, selon le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR), Sous-Comité C (SC/C), fait intervenir quatre paramètres :

- le niveau minimal du signal à protéger ;
- la valeur minimale du rapport signal sur bruit ;
- le niveau de bruit à 20 m de la ligne, dans des conditions atmosphériques spécifiées ;
- la distance protégée, c'est-à-dire la valeur minimale de la distance à l'axe de la ligne, à partir de laquelle le signal pourra être reçu de manière satisfaisante.

L'un quelconque de ces paramètres peut être déduit de la donnée des trois autres.

### 8.2.1 Niveau minimal du signal à protéger

Il appartient à chaque nation de fixer le niveau minimal du signal qui doit être protégé du bruit des lignes électriques. À titre d'information, on pourra se fonder sur les recommandations de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), qui donne les valeurs de *champ nominal utilisable* en ondes kilométriques et hectométriques. Ces valeurs sont comprises entre 80 dB pour les premières et 63 dB pour les secondes.

### 8.2.2 Valeur minimale du rapport signal sur bruit

Aucune recommandation exacte définissant un rapport acceptable n'a encore été fixée, en ce qui concerne les lignes électriques. À partir de mesures et de tests effectués par plusieurs chercheurs, on peut cependant établir le tableau 1.

Tableau 1 – Qualité d'écoute en fonction du rapport signal/bruit	
Rapport signal/bruit dB	Qualité d'écoute
40	Entièrement satisfaisante
32	Satisfaisante pour qualité courante
26	Bruit discret
20	Bruit évident
15	Bruit gênant
3	Compréhension de la parole avec effort
0	Parole inintelligible

### 8.2.3 Niveau de bruit à 20 m de la ligne

Le niveau de bruit, mesuré à une distance directe de 20 m du conducteur le plus extérieur de la ligne, est le niveau de référence CISPR qui caractérise la ligne, du point de vue de son effet perturbateur. Cependant, on a vu que le champ perturbateur d'une ligne était essentiellement fluctuant, et que sa définition ne pouvait être que statistique (§ 8.1).

Par analogie avec la règle dite des 80 %-80 % (c'est-à-dire 80 % de probabilité de non-dépassement avec un intervalle de confiance de 80 %), utilisée par les autres sous-comités du CISPR, et par souci d'harmonisation avec eux, le SC/C a proposé de définir comme niveau de référence d'une ligne le niveau à 80 %, c'est-à-dire le niveau de champ tel qu'il n'est excédé par la ligne que pendant 20 % du temps. Dans les conditions climatiques de nos régions tempérées, le niveau 80 % ne sera dépassé que sous forte humidité, brouillard ou pluie.

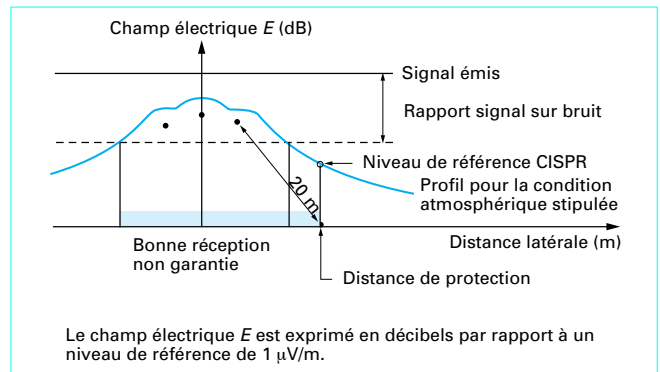


Figure 20 – Schéma définissant le couloir perturbé d'une ligne

Mais, tout en définissant ce niveau de référence, le SC/C laisse la liberté de choisir une autre valeur de référence, comme par exemple le niveau 50 % tout temps, ou le niveau 50 % par temps sec.

### 8.2.4 Distance protégée

La distance de protection, à l'intérieur de laquelle se trouve le couloir perturbé par la ligne, se définit aisément à l'aide du schéma de la figure 20.

Si l'on prend pour données de base une ligne dont les caractéristiques sont fixées par les conditions économiques du transport de l'énergie (tension, section des conducteurs, type de faisceau, géométrie du pylône), et si l'on connaît les conditions atmosphériques prévalant le long du trajet de cette ligne, on pourra établir le profil transversal du champ perturbateur, et en particulier le niveau de référence 80 % à 20 m du conducteur extrême de la ligne. Par la suite, la mesure de ce niveau permettra de vérifier le calcul ; elle pourra d'ailleurs, le cas échéant, mettre des anomalies techniques de la ligne en évidence.

Ayant par ailleurs fixé le niveau du signal utile à protéger (par exemple 70 dB) et le rapport signal sur bruit accepté (par exemple 30 dB), la largeur du couloir perturbé apparaît comme une conséquence du choix des caractéristiques de la ligne.

Mais on pourrait aussi procéder en sens inverse : on peut se fixer a priori un couloir perturbé (ou, ce qui revient au même, une distance de protection minimale), et ce sont alors les caractéristiques techniques de la ligne qui apparaîtront comme conséquence du choix.

Il va sans dire que cette deuxième approche risque d'être peu économique sur le plan du transport d'énergie, ce qui montre clairement que la question des limites du champ perturbateur d'une ligne se traitera avantagement par concertation.

# Effet couronne sur les réseaux électriques aériens

par **Claude GARY**

Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité  
Conseiller Scientifique Honoraire

Direction des Études et Recherches d'Électricité de France

## Bibliographie

### Ouvrages généraux sur l'Effet Couronne

GARY (C.) et MOREAU (M.). – *L'effet de Couronne en tension alternative*. Collection des Études et Recherches d'EDF. n° 24 Éditions Eyrolles - 1976.

Groupe de Travail 36-01 de la CIGRE. – *Perturbations engendrées par l'Effet de Couronne des réseaux de Transports*. Document n° 20 1974.

Groupe de Travail 36-01 de la CIGRE. – *ADDENDUM to CIGRE*. Document n° 20. Interferences produced by Corona Effect to Electric Systems.

### Phénomènes fondamentaux

PEEK (F. W.). – *Phénomènes diélectriques dans la technique des hautes tensions*. (Traduction de R. ACKERMANN) 1924 Delagrave.

TRICHEL (G. W.). – *The mechanism of negative point-to-plane corona near onset*. Physical Rev. 1938 p. 1978.

TRICHEL (G. W.). – *The mechanism of the positive point-to-plane corona in air at atmospheric pressure*. Physical Rev. 55 p. 382 fév. 1939.

LOEB (L. B.). – *Recent developments in analysis of the mechanism of positive and negative coronas in air*. J. Applied Physics 19 oct. 1943 p. 882-97.

CARSON (J. R.). – *Wave propagation in overhead wires with earth return*. Bell System technical journal oct. 1926 n° 5 p. 539-554.

POLLACZEK (F.). – Traduit par POMEY (J. B.). – *Sur le champ produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif*. Rev. Gén. Elec. 30 mai 1931 p. 851-67.

### Pertes couronne

RYAN (J. J.) et HENLINE (H. H.). – *The hysteresis character of corona formation*. Trans. A.I.E.E. 43 1924 p. 1118.

HESELMEYER (C. T.) et KOSTKO (J. K.). – *On the nature of corona loss*. Trans. A.I.E.E. 44 sept. 1925 p. 1016-24.

HOLM (R.). – *Die Theorie der Wechselstromkorona an Hochspannungsleitungen*. Archiv für Electrotechnik 18 1927 p. 567-82.

POTTHOFF (K.). – *Messung von Koronaverlusten an einer Drehstromleitung*. Elektrotechnische Z. (E.T.Z.) 1933 p. 169.

PAUTHENIER (M.), DEMON (I.) et DUHAUT (G.). – *Les pertes de puissance dans les lignes à haute tension continue, par l'effet des gouttes d'eau pendantes*. Bull. S.F.E. juin 1948 p. 301.

CAHEN (F.) et PELISSIER (R.). – *L'emploi de conducteurs en faisceaux pour l'armement des lignes à très haute tension. Résultats d'essais de la station expérimentale à 500 kV de Chevilly*. Bull. S.F.E. mars 1948 p. 111.

PELISSIER (R.) et RENAUDIN (D.). – *Mécanisme de l'effet de couronne sur les lignes de transport d'énergie à courant alternatif*. Bull. S.F.E. fév. 1949 p. 53.

CAHEN (F.) et PELISSIER (R.). – *Influence sur l'effet de couronne du diamètre et du profil des câbles des lignes aériennes à très haute tension*. Rev. Gén. Électr. juil. 1949 p. 279.

CLADÉ (J.), GARY (C.) et LEFEVRE (C.). – *Calcul des pertes par effet couronne au-delà du gradient critique en tension alternative*. Bull. Direction Études Recherches Électricité de France Série B n° 3, 1967 ou *Calculation of corona losses beyond the critical gradient (in alternative voltage)*. I.E.E.E. Trans PAS 88 n° 5 mai 1969.

CLADÉ (J.) et GARY (C.). – *Predetermination of corona losses under rain. Experimental interpreting and checking of a method to calculate corona losses*. I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 5 mai-juin 1970.

CLADÉ (J.) et GARY (C.). – *Predetermination of corona losses under rain: influence of rain intensity and utilization of an Universal Chart*. I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 6 juil.-août 1970.

CLADÉ (J.), GARY (C.) et MOREAU (M.). – *Résultats des études sur l'effet couronne menées à la Station Expérimentale des Renardières*. C.I.G.R.E. Session 1970 Rapport n° 31.08.

CHARTIER (V. L.), SHANKLE (D. F.) et KOLCIO (N.). – *The Apple-Grove 750 kV Project: statistical analysis of radio influence and corona loss performance of conductors et 775 kV*. I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 5 mai-juin 1970.

JUETTE (G. W.) et ZAFFANELLA (L. E.). – *Radio noise, audible noise and corona loss of EHV and UHV-transmission lines under rain: predetermination based on cage tests*. I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 6 juill.-août 1970.

### Perturbations radioélectriques

ADAMS (G. E.). – *The calculation of the radio interference level of transmission lines caused by corona discharges*. A.I.E.E. Transactions, Part III (Power Apparatus and Systems) 75 juin 1956 p. 411-9.

GARY (C.). – *Théorie de la fonction excitatrice*. Bull. Direc. Etudes Rech. E.D.F. Série N n° 4 1969 ou

*The theory of excitation functions: a demonstration of its physical meaning* I.E.E.E. Trans. PAS. 91 n° 1 jan-fév. 1972.

ABBOUSHI (A. K.) et BARTHOLD (L. O.). – *Digital calculation of radio noise levels*. A.I.E.E. Trans. Part III (Power Apparatus and Systems) 80 déc. 1961 p. 841-6.

NIGOL (O.). – *Analysis of radio noise from high voltage lines*. I.E.E.E. Trans. Parts I and II Power Apparatus and Systems 83 n° 5 mai 1964 p. 524-41.

WEDEPOHL (L. M.) et coll. – *Radio interference fields in multiconductor overhead transmission lines*. Proc. I.E.E.E. 116 n° 11 nov. 1969 p. 1 875-84.

PELISSIER (R.). – *Propagation des ondes électromagnétiques guidées par une ligne multipolaire*. R.G.E. avr.-mai 1969 p. 78.

PFALER (C. E. von). – *Die Vorausberechnung der von Hochspannungsleitungen verursachten Hochfrequenzen Störungen*. E.T.Z.-A. 85 n° 9 1964 p. 261-6.

PAKALA (W. E.) et TAYLOR (E. R.). – *A method for analysis of radio noise on high-voltage transmission lines*. I.E.E.E. Trans PAS. 87 n° 2 fév. 1968 p. 334-45.

HEDMAN (D. E.). – *Propagation on overhead lines. Part I: Theory of model analysis. Part II: Earther conduction effects*. I.E.E.E. Trans. PAS. 84 mars 1965 p. 200-5 et p. 205-11.

HEDMAN (D. E.). – *Attenuation of travelling waves on three-phase lines*. I.E.E.E. Trans. PAS. 90 n° 3 mai-juin 1971 p. 1312-5.

PERZ (M. C.). – *Method of evaluating corona noise generation from measurements on short test lines*. I.E.E.E. PAS. 82 déc. 1963 p. 833-44.

PARIS (L.) et SFORZINI (M.). – *Rf problems in EHV-line design*. I.E.E.E. Trans. PAS. 87 n° 4 avr. 1968 p. 940-6.

BARTENSTEIN (R.). – *Prédetermination du niveau de perturbations à haute fréquence des lignes de transport à haute tension*. C.I.G.R.E. 1960 Rapport 409.

BARTENSTEIN (R. E.), HIRSCH (F.) et SCHAEFFER (E.). – *Études statistiques des perturbations radiophoniques*. Rapport d'Activité du Comité d'Études n° 9 Rapport n° 42 01 C.I.G.R.E. 1968.

CLADÉ (J.) et GARY (C.). – *Les perturbations radioélectriques engendrées par les lignes de transport d'énergie*. R.G.E. 75 n° 5 mai 1966.

- GARY (C. H.) et MOREAU (M. R.). – *Predetermination of the radio-noise level under rain of an extra-high voltage line.* I.E.E.E. PAS. 88 n° 5 mai 1969 p. 653-9.
- EHV transmission line reference book. Project EHV. New York 1968 Edison Electric Institute.
- KOLCIO (N.), CALECA (V.), MARMAROFF (S. J.) et GREGORY (W. L.). – *Radio-influence and corona-loss aspects of AEP 765 kV lines.* I.E.E.E. PAS. 88 n° 9 sept. 1969 p. 1 343-55.
- TAYLOR Jr. (E. R.), KOLCIO (N.) et PAKALA (W. E.). – *The Apple Grove 750 kV project. 775 kV radio influence and corona loss investigation.* I.E.E.E. Trans. PAS. 84 n° 7 juill. 1965 p. 573-9.
- GARY (C.) et MOREAU (M.). – *Predetermination of the RI level of high-voltage transmission lines. Part I : Predetermination of the excitation function.* I.E.E.E. Paper n° 71 TP 661 presented at the Summer Meeting Portland Oregon 1971 Trans. I.E.E.E. PAS. 91 n° 1 janv.-fév. 1972 p. 284-91.
- Part II : Field calculating method.* I.E.E.E. Paper n° 71 TP 662 presented at the Summer Meeting Portland Oregon 1971 Trans. I.E.E.E. PAS. 91 n° 1 jan.-fév. 1972 p. 292-304.
- MOREAU (M.). – *Prédétermination du niveau perturbateur des lignes de transport d'énergie.* R.G.E. n° 9 sept. 1971 p. 80.
- CARTER (G. K.), JUETTE (G. W.) et PRIEST (K. W.). – *Calculation of the radio interference statistics of transmission lines.* I.E.E.E. PICA Conference Proc. 1971 p. 143.
- JUETTE (G. W.) et ZAFFANELLA (L. E.). – *Radio noise currents and audible noise on short sections of UHV bundle conductors.* I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 5 mai-juin 1970 p. 902-13.
- SAWADA (Y.). – *Calculating method of radio noise level and its applications to design of AC power transmission line.* I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 5 mai-juin 1970 p. 844-53.
- PARIS (L.). – *Criteri per la predeterminazione delle radio-interferenze prodotte dalle linee ad AT.* déc. 1964 Graviche A. Nova Milano.
- SFORZINI (M.). – *Formulas for predetermination of the radio-interference from electric power lines.* C.I.G.R.E. Paper n° 428 Appendice II 1966.
- LACROIX (R.) et CHARBONEAU (H.). – *Radio-interference from the first 735 kV line of the Hydro Quebec.* I.E.E.E. Trans. PAS. 87 n° 4 avr. 1968 p. 932-9.
- BARNES (H. C.). – *Preliminary experience of extensive switching surge testing of american electric power's first 765 kV line and stations.* I.E.E.E. Trans. PAS. 90 n° 2 mars-avr. 1971 p. 785-98.
- YAMADA (T.) et KONDO (H.). – *EHV corona noise in Japan.* C.I.G.R.E. Rapport n° 402 1960.
- PAKALA (W. E.) et CHARTIER (V. L.). – *Radio noise measurements on overhead power lines from 2.4 to 800 kV.* I.E.E.E. Trans. PAS. 90 n° 3 mai-juin 1971 p. 1155-65.
- CHARTIER (V. L.) et BANKOSKA (J. W.). – *Waltz Mill 1100 kV stations : conductor selection and laboratory verification.* I.E.E.E. Trans. PAS. 88 n° 6 juin 1969 p. 825-33.
- HAVELKA (J.), KOHOUTOVA (D.) et VOKALEK (J.). – *Calculation of the radio interference level caused by EHV power lines at frequencies from 0.15 to 30 MHz.* C.I.G.R.E. Rapport n° 304 1966.
- Isolateurs et appareillage**
- CLARKE (C. H. W.). – (Perturbations radiophoniques produites par les isolateurs H.T.). Elect. Rev. 65 oct. 1959.
- GARY (C.) et MOREAU (M.). – *Contribution à l'étude des perturbations radiophoniques engendrées par les lignes à moyenne tension.* R.G.E. oct. 1963.
- CORTINA (R.), MICHELIS (F. de), SFORZINI (M.) et ZAFFANELLA. – *Contributo allo studio dei metodi di laboratorio per la misura delle radio-interferenze prodotte alle catene di isolatori per linee ad alta ed ad altissima tensione.* Rend. A.E.I. Alghero n° 1-53 1966.
- HEAD-RAPSON (W.) et coll. – *The relationship between the radio interference characteristics of overhead line insulators units and strings, and the influence of pollution on RI performance.* I.E.E. Conference on Progress in Overhead Lines and Cables for 220 kV and above. sept. 1968.
- BERNADELLI (P. D.), CORTINA (R.) et SFORZINI (M.). – *Laboratory investigation on the radio interference performance of insulations in different ambient conditions.* I.E.E.E. Paper T 72-193-6.
- SAWADA (Y.), FUKUSHIMA (M.), YASNI (M.), KIMOTO (I.) et NAITO (K.). – *A laboratory study on RI, TUI and AN of insulator strings under contaminated conditions.* I.E.E.E. Paper T 73 415-7.
- GARY (C.), MOREAU (M.), KOHOUTOVA (D.), VOKALEK (J.), RIVIERE (D.) et PARRAT (R.). – *Influence des conditions d'ambiance sur le niveau perturbateur des chaînes d'isolateurs.* C.I.G.R.E. Session 1972 Rapport n° 3 604.
- GARY (C.). – *Perturbations en télévision engendrées par les lignes à moyenne tension.* R.G.E. nov. 1965 74 n° 11.
- DELEBASSEE (J.). – *Perturbations en télévision engendrées par les lignes à moyenne tension. Résultats expérimentaux de l'antiparasitage.* R.G.E. 77 n° 3 mars 1968.
- WEDEPOHL (L. M.) et SAHA (H. N.). – *Radio interference from isolated noise sources on overhead transmission lines.* I.E.E.E. Trans. PAS. 90 n° 5 sept.-oct. 1971.
- LOFTNESS (M. O.). – *The location of power line TVI. Some reduction considerations.* I.E.E.E. Trans. PAS. 89 n° 5 mai-juin 1970.

## Normalisation

*Spécifications de l'appareillage de mesure CISPR pour les fréquences comprises entre 0,15 et 30 MHz.* (Annexe A). Publication n° 1 et Publication 1 A. du CISPR Commission Electrotechnique Internationale. Union Technique de l'Électricité.

*Specifications for radio noise and field strength meters 0.015 to 30 megacycles/second.* A.N.S.I. C 63.2-1963 Reaffirmed in 1969 (American National Standards Institute).

*Perturbations Radioélectriques engendrées par les réseaux de Transport.* Publications 18-1, 18-2, 18-3 du CISPR. Commission Electrotechnique Internationale.