

Camp elèctric generat per les línies elèctriques d'alta tensió. Càlcul i simulació

Jordi-Roger Riba Ruiz* i Xavier Alabern Morera†

Introducció

Els camps elèctrics i magnètics de baixa freqüència (50 Hz i harmònics) van associats amb la generació, el transport i la utilització de l'energia elèctrica. Per tant, on hi hagi energia elèctrica ben segur que trobarem camps elèctrics i magnètics. L'augment constant del consum d'energia elèctrica en les societats industrialitzades fa que periòdicament es construeixin noves centrals elèctriques i que s'ampliïn les xarxes elèctriques de transport i de distribució de l'energia per poder donar subministrament als consumidors domèstics i als sectors industrial i de serveis.

D'altra banda, per part de la societat, hi ha un augment de la sensibilitat sobre els problemes mediambientals, els riscos potencials i els efectes secundaris que pot provocar la tecnologia. En conseqüència, és important conèixer els possibles efectes dels camps elèctrics i magnètics i disposar d'eines que permetin calcular els valors dels camps que generen les línies elèctriques. Cal tenir present que, en el nostre país, hi ha línies elèctriques d'alta tensió molt properes a nuclis habitats i, per tant, hi ha molts ciutadans que s'hi veuen exposats. Com que els humans no disposem de cap sentit que ens avisi de la presència dels camps elèctrics i magnètics, és molt important conèixer els valors als quals els ciutadans estan exposats, moltes vegades sense saber-ho.

A la Terra hi ha camps elèctrics i magnètics naturals. Aquests camps, a diferència dels generats per les línies elèctriques, són totalment estàtics, és a dir, no varien amb el temps. Per tant, els camps elèctrics i magnètics naturals no poden induir corrents en objectes conductors o parcialment conductors sense moviment que es trobin en el seu radi d'acció. Normalment, els valors dels camps elèctrics naturals es troben per sota dels 200 V/m. En canvi, els camps elèctrics i magnètics generats per les línies elèctriques són alterns sinusoïdals amb una freqüència de 50 Hz i, per tant, sí que poden induir corrents en cossos conductors situats a prop.

* **Jordi-Roger Riba Ruiz** (Igualada, 1966) és doctor en Ciències Físiques per la UB i actualment és professor de l'E-UNETI d'Igualada i de l'ETSEI de Terrassa, adscrites a la UPC. (jordi@euetii.upc.es).

† **Xavier Alabern Morera** (Vic, 1948) és doctor en Enginyeria Industrial per la UPC i actualment és professor titular del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la UPC.

Per determinar els camps que generen les línies elèctriques hi ha dues possibilitats: la primera consisteix en la mesura directa d'aquests camps mitjançant aparells adequats, mentre que la segona consisteix a simular-los mitjançant programes informàtics especialment dissenyats per a aquesta tasca.

Aquesta segona possibilitat és la que es tractarà en aquest treball i té una sèrie d'avantatges, com ara la possibilitat de simular els camps creats sigui quina sigui la geometria de la línia elèctrica, el fet de no haver-se de desplaçar per realitzar les mesures, la possibilitat de redissenyar les línies tenint en compte criteris de minimització dels camps elèctrics i magnètics, etc.

En aquest treball s'explica un mètode matemàtic que permet calcular el camp elèctric que generen les línies d'alta tensió de transport de l'energia elèctrica. A partir del mètode matemàtic explicat es dissenya un programa informàtic que permet simular el camp elèctric en qualsevol punt de l'espai i es calculen els camps elèctrics que generen les línies d'alta tensió. Els valors d'aquests camps elèctrics es comparen amb els límits proposats per diferents normatives.

Dedució del camp elèctric generat per una línia aèria

Abans de deduir l'expressió del camp elèctric que generen les línies aèries de transport d'energia elèctrica, caldrà trobar l'expressió del camp elèctric que genera un sol conductor rectilini, aeri i molt llarg.

També s'ha de tenir en compte que el camp elèctric que creen les línies depèn de la diferència de potencial entre els conductors i el terra, i és pràcticament independent de les intensitats dels corrents elèctrics que circulen per aquests conductors. Sempre se suposarà que el potencial (tensió) del terra és nul. La tensió dels conductors de la línia és una magnitud fasorial; això significa que es caracteritza per un valor eficaç, una freqüència i un angle de fase. Com que les línies d'alta tensió utilitzen el sistema trifàsic per transportar l'energia elèctrica, es tindrà un mínim de tres conductors amb tensions alternes sinusoïdals de 50 Hz amb valors eficaços iguals però desfasades entre elles un angle de 120° (els angles de fase són molt importants en el càlcul del camp elèctric). Normalment, les línies d'alta tensió porten un o

més conductors de protecció que van directament connectats a terra, i per tant la seva tensió és nul·la. Aquests conductors són els que estan més allunyats del terra.

Deducció del camp elèctric creat per un conductor rectilini, infinit i aïllat

Com que el potencial elèctric a nivell de terra ha de ser nul, és convenient aplicar el mètode de les imatges. Aquest mètode, tal com s'aplicarà en aquest cas concret, consisteix a suposar que, a més del conductor real, hi ha un altre conductor situat simètricament respecte del pla de terra. A més, el mètode de les imatges suposa que els fasors que donen el potencial elèctric en la superfície d'aquests dos conductors (conductor real i conductor imatge) són idèntics, però desfasats 180° (tenen signes oposats).

Les condicions de contorn que cal aplicar en aquest problema són que el potencial elèctric és zero en el terra, que en la superfície del conductor real val U_i (és una magnitud fasorial i correspon a la tensió simple o tensió entre fase i neutre) i que en la superfície del conductor imatge val $-U_i$.

La figura 1 mostra un conductor rectilini molt llarg. Com que s'aplica el mètode de les imatges, tot conductor real tindrà associat un conductor imatge situat a la mateixa distància respecte del pla de terra i per sota d'aquest. El conductor real es troba en la posició (1) i el conductor imatge es troba en la posició (2). Mentre que el conductor real té una tensió respecte del terra U_i , el conductor imatge té la mateixa tensió respecte del terra, però canviada de signe. Aquesta disposició genera un camp elèctric E_i en un punt qualsevol de l'espai (x, y) . Sabem que el camp elèctric que genera un

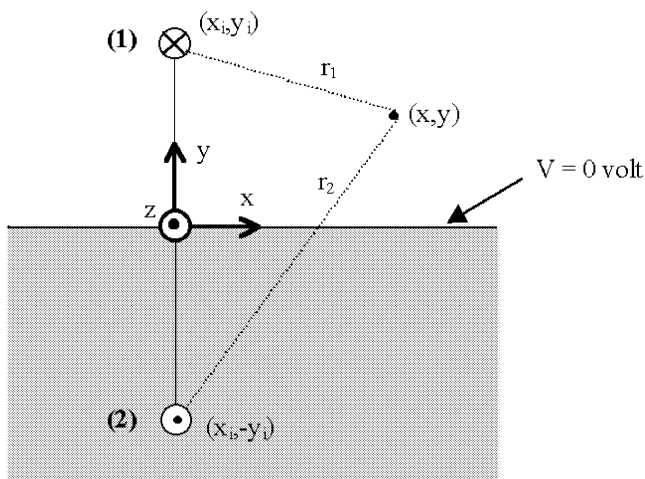


Figura 1: Conductor real i conductor imatge

conductor molt llarg és radial i, per tant, es compleix que $E_z = 0$. A més, com que és un problema amb molta simetria, per calcular el camp elèctric en un punt qual-

sevol de l'espai, es pot aplicar el teorema de Gauss:

$$\int \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}.$$

La figura 2 mostra la superfície gaussiana utilitzada per al càlcul del camp elèctric

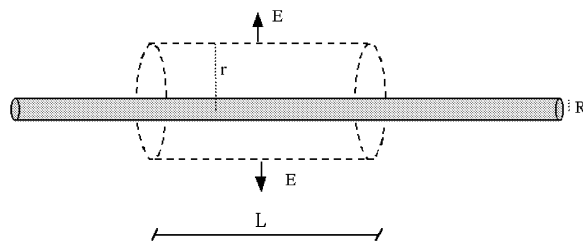


Figura 2: Vector camp elèctric creat per un conductor únic

El radi del conductor és R_i , el radi de la superfície gaussiana, utilitzada per deduir l'expressió del camp elèctric, és r i la seva longitud val L . Aplicant la llei de Gauss al conductor real, resulta:

$$E_{1i} 2\pi r_1 L = \frac{2\pi R_i L \sigma_i}{\epsilon_0} \Rightarrow$$

$$E_{1i} = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \frac{1}{r_1} = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}, \quad (1)$$

on σ_i és la densitat superficial de càrrega en el conductor.

Aplicant el mateix procés anterior al conductor imatge, resulta:

$$E_{2i} = \frac{-\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \frac{1}{r_2} \Rightarrow$$

$$E_{2i} = \frac{-\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2}}. \quad (2)$$

Com que $\vec{E}_i = -\vec{\nabla} V_i$, i V_i és el potencial elèctric en un punt qualsevol de l'espai, resulta:

$$V_i = V_{i1} + V_{i2} = - \int \vec{E}_{1i} d\vec{r}_1 - \int \vec{E}_{2i} d\vec{r}_2 + C,$$

on C és una constant d'integració el valor de la qual depèn de les condicions de contorn. Substituint en les expressions anteriors els valors de les expressions (1) i (2), resulta:

$$V_i = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} + C$$

$$V_i = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \ln \sqrt{\frac{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} + C$$

En la superfície del terra el potencial ha de ser nul. Per tant, cal imposar la restricció següent:

$$V_i(0,0) = 0 \Rightarrow 0 = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_i} \ln \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2}{x_i^2 - y_i^2}} + C \Rightarrow C = 0.$$

Com que el potencial a la superfície del conductor ha de ser U_i (diferència de potencial entre el conductor i el terra), imposen la condició de contorn següent:

$$V_i(x_i, y_i - R_i) = U_i = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \ln \sqrt{\frac{(2y_i - R_i)^2}{R_i^2}}.$$

Fent l'aproximació que $y_i \gg R_i$, resulta:

$$U_i = \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{R_i} \Rightarrow \frac{\sigma_i R_i}{\epsilon_0} = U_i / \ln \frac{2y_i}{R_i}.$$

Per tant, s'obté:

$$V_i = \frac{U_i}{\ln \frac{2y_i}{R_i}} \ln \sqrt{\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} = U_i \frac{n_i}{A_i},$$

on els paràmetres n_i i A_i valen, respectivament:

$$n_i = \ln \sqrt{\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}, \quad A_i = \ln \frac{2y_i}{R_i}.$$

A partir de l'expressió anterior es pot obtenir el camp elèctric:

$$\vec{E}_i = -\left(\frac{\partial V_i}{\partial x}, \frac{\partial V_i}{\partial y}, 0\right).$$

Deducció del camp elèctric creat per n conductors rectilinis i infinits

Una vegada conegut el camp elèctric creat per un conductor, no es pot aplicar directament el principi de superposició per calcular el camp total creat per tots els n conductors, ja que el camp d'un conductor provoca una variació de la densitat de càrrega superficial en els altres conductors. Per similitud al resultat obtingut en el cas d'un conductor únic, se suposa que cada conductor genera un potencial elèctric donat per l'expressió següent:

$$V_i = U'_i \frac{n_i}{A_i},$$

on V_i és el potencial elèctric que provoca el conductor i -èsim en el punt de l'espai on es calcula el potencial i U'_i és un factor potencial desconegut que s'ha de calcular (en aquest cas $U'_i \neq U_i$ perquè hi ha la influència dels altres conductors), mentre que n_i i A_i es calculen igual que en l'apartat anterior.

El potencial elèctric generat pel sistema de n conductors i les seves imatges respectives en un punt qualsevol de l'espai, (x, y) , vindrà donat per:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n U'_i \frac{n_i}{A_i}$$

Ara cal aplicar les condicions de contorn a cada un dels conductors. Donat un conductor qualsevol, el potencial elèctric U_j a la seva superfície ha de ser igual a la suma

dels potencials generats per tots els conductors en aquest punt, de manera que resulta:

$$U_j = V(x_j, y_j - R_j) = \sum_{i=1}^n U'_i \frac{n_i(x_j, y_j - R_j)}{A_i}.$$

L'expressió anterior es pot expressar en forma matricial, i s'obté:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n_1(x_1, y_1 - R_1)}{A_1} & \dots & \frac{n_n(x_1, y_1 - R_1)}{A_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{n_1(x_n, y_n - R_n)}{A_1} & \dots & \frac{n_n(x_n, y_n - R_n)}{A_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U'_1 \\ \vdots \\ U'_m \end{pmatrix}.$$

L'expressió anterior, de forma simplificada, resulta:

$$U_{(n,1)} = N_{(n,n)} U'_{(n,1)}.$$

Per determinar la matriu de potencials complexos desconeguts U' cal fer:

$$U'_{(n,1)} = N_{(n,n)}^{-1} U_{(n,1)}$$

Encara que les matrius U i U' pertanyin al camp dels nombres complexos la matriu N és, afortunadament, quadrada i real i, per tant, és fàcilment invertible. Ara ja s'està en condicions de calcular el potencial elèctric en qualsevol punt de l'espai:

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i(x, y) = \sum_{i=1}^n U'_i \frac{n_i(x, y)}{A_i}.$$

Com que tant les tensions U'_i com els paràmetres A_i són constants, el camp elèctric total es pot calcular com:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, 0\right) = -\left(\sum_{i=1}^n \frac{U'_i}{A_i} \frac{\partial n_i}{\partial x}, \sum_{i=1}^n \frac{U'_i}{A_i} \frac{\partial n_i}{\partial y}, 0\right),$$

on:

$$\frac{\partial n_i}{\partial x} = \frac{-4yy_i(x - x_i)}{((x - x_i)^2 + (y + y_i)^2)((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2)},$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial y} = \frac{2y_i((x - x_i)^2 + y_i^2 - y^2)}{((x - x_i)^2 + (y + y_i)^2)((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2)}.$$

En la deducció de les expressions anteriors, per calcular el camp elèctric s'han efectuat les aproximacions següents:

- S'ha negligit l'efecte de les estructures de suport dels conductors.
- S'han ignorat els efectes d'arbres, de vegetació i d'altres elements propers als conductors que actuen de forma similar a la manera com ho fan els elèctrodes de

terra.

- S'ha suposat que els conductors de la línia eren horitzontals, per tant sense curvatura.
- S'ha suposat que el terreny era llis i horitzontal.

Línies elèctriques estudiades

En aquest treball es vol simular el camp elèctric que generen dos tipus diferents de línies aèries de transport d'energia elèctrica que es troben a la xarxa elèctrica espanyola. La tensió composta de les línies estudiades és de 220 kV; això significa que entre dos conductors actius hi ha una diferència de potencial de 220 kV mentre que la diferència de potencial entre un conductor actiu i el terra serà aproximadament de 127 kV. A partir del mètode desenvolupat en l'apartat anterior s'ha creat una aplicació informàtica que permet calcular el camp en qualsevol punt de l'espai proper a la línia elèctrica. A aquesta aplicació informàtica cal entrar-li les coordenades i els radis de cada un dels conductors de la línia (tant els actius com els de protecció) així com la seva tensió (en mòdul i fase) respecte de la tensió del terra (aquesta última se suposa nul·la). La figura 3 mostra les línies estudiades: s'observa que la línia 1 és d'un

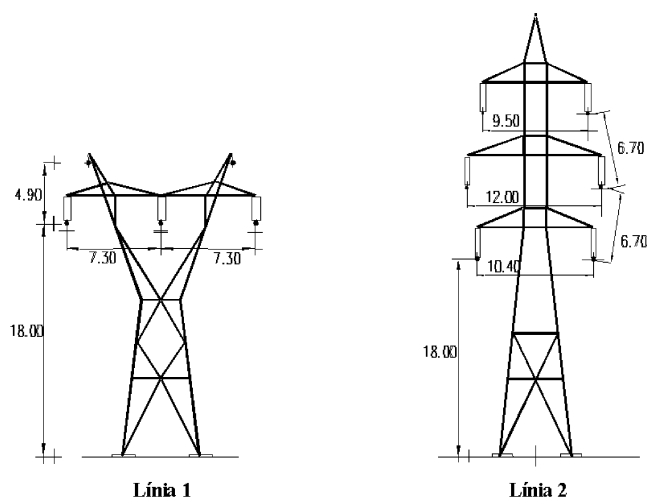


Figura 3: Suports de les línies elèctriques estudiades

sol circuit (només té tres conductors actius) mentre que la línia 2 és de dos circuits (té sis conductors actius). En igualtat de tensió nominal i triant adequadament la distribució dels conductors actius de les línies de doble circuit, generalment aquestes línies creen camps elèctrics més reduïts que les línies de circuit únic.

Les taules 1 i 2 mostren les coordenades, el mòdul i la fase de les tensions dels conductors actius mesurades respecte del terra i el radi dels conductors, per a les dues línies estudiades. Entre torre i torre els conductors es corben a causa del seu propi pes. Per tant, cal tenir en compte que, entre torre i torre, la distància dels conductors respecte del terra és mínima (y_{min}) i que en la

posició de les torres la distància és màxima (y_{max}). Segons el Reglament de línies aèries d'alta tensió (RAT), per a una línia de 220 kV, la distància mínima a la qual es pot trobar un conductor respecte del terreny és de 6,8 m. Aquesta és la distància mínima (y_{min}) que s'ha pres en la simulació.

$x(m)$	$y_{max}(m)$	$y_{min}(m)$	Radi (cm)	V (kV)	Fase
- 7,3	18,0	6,8	1,09	127	0°
0,0	18,0	6,8	1,09	127	120°
7,3	18,0	6,8	1,09	127	240°
- 4,8	22,9	11,7	1,09	0	0°
4,8	22,9	11,7	1,09	0	0°

Taula 1: Dades corresponents a la línia 1

$x(m)$	$y_{max}(m)$	$y_{min}(m)$	Radi (cm)	V (kV)	Fase
- 4,75	31,0	19,8	1,09	127	0°
4,75	31,0	19,8	1,09	127	120°
- 6,00	24,5	13,3	1,09	127	240°
6,00	24,5	13,3	1,09	127	240°
- 5,2	18,0	6,8	1,09	127	120°
5,2	18,0	6,8	1,09	127	0°
0	39,5	28,3	1,09	0	0°

Taula 2: Dades corresponents a la línia 2

Resultats de la simulació

En aquest apartat se simula la distribució dels camps elèctrics generats per les línies 1 i 2 sota les condicions exposades en l'apartat anterior, per als casos de distància mínima i màxima dels conductors respecte del terreny. La figura 4 mostra el perfil del camp elèctric en una recta horitzontal imaginària situada a una distància vertical $y = 1$ m per sobre de la superfície del terreny, entre els punts $x = -100$ i $x = 100$ m per al cas de distància màxima entre els conductors i el terreny. Les distàncies x estan mesurades horitzontalment respecte del centre geomètric de la línia.

De la figura 4 es dedueix que la línia 2 (de dos circuits) genera a 1 m del terra una distribució de camp elèctric menys intensa que la que crea la línia 1 (de circuit únic). Els perfils dels camps elèctrics de les dues línies són simètrics perquè els conductors de les línies estan situats amb una disposició geomètrica de simetria. També s'aprecia que, per als dos casos, la intensitat del camp elèctric decau molt ràpidament amb la distància a la línia.

La figura 5 mostra les intensitats del camp elèctric que resulten de la simulació a 1 m per sobre de la superfície del terra entre $x = -100$ i $x = 100$ m, per al supòsit que els conductors estiguin el màxim de propers del terra que permet el reglament.

Comparant les figures 4 i 5 s'aprecia que en aquesta última els valors dels camps elèctrics són força més elevats perquè els conductors estan més a prop del terra.

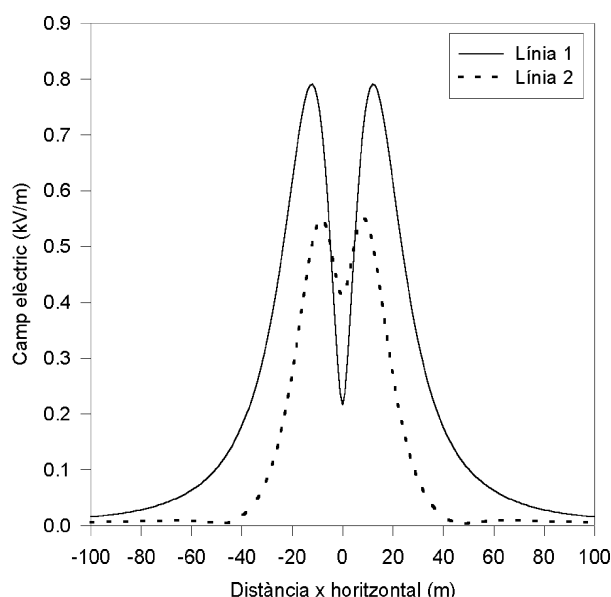


Figura 4: Camp elèctric generat per les línies 1 i 2 per al cas de distància màxima dels conductors respecte del terreny

Línia	Camp màxim (kV/m)		Posició x (m)	
	Dist. màx.	Dist. mín.	Dist. màx.	Dist. mín.
1	0,79	4,12	± 12	± 8
2	0,55	3,58	± 8	± 6

Taula 3: Camp elèctric màxim a 1 m del terra i posició x on es produeix les distàncies entre els conductors i el terra

A grans trets, les observacions per al supòsit que els conductors estiguin a una distància màxima del terra segueixen sent vàlides també en aquest cas en què els conductors hi estan situats a una distància mínima. La taula 3 mostra el valor numèric del camp elèctric màxim que generen les dues línies a 1 m del terra i també informa de la posició x , on el camp és màxim. D'aquesta taula es dedueix que, en augmentar la distància dels conductors respecte del terra, el camp elèctric a una altura $y = 1$ m disminueix molt.

Normatives

A l'Estat espanyol hi ha la norma experimental UNE-ENV 50166-1 (UNE96) que no és de compliment obligat. Aquesta norma proporciona valors de referència dels camps elèctrics i magnètics des de 0 fins a 10 kHz. També hi ha la norma UNE-ENV 50166-2 que va des de 10 kHz fins a 300 GHz, que és d'interès per a les telecomunicacions.

Pel que fa als organismes internacionals, s'han inclòs els nivells de referència ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICN98, 1998) i la recomanació del Consell Europeu (RCE99, 1999). Cal advertir que en aquest moment cap d'aques-

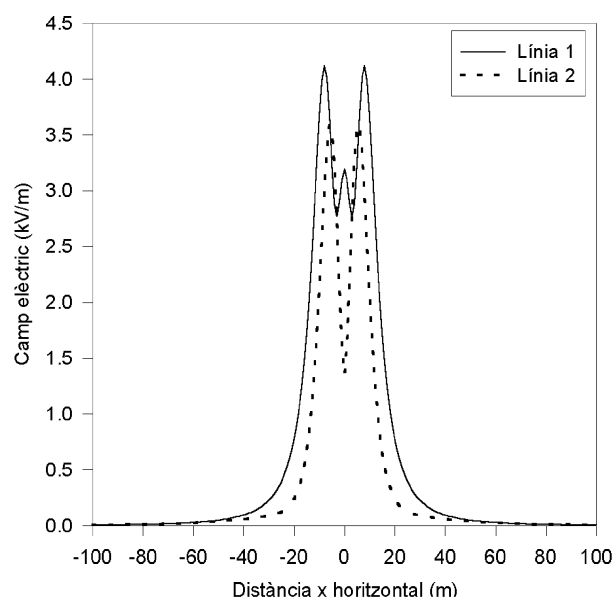


Figura 5: Camp elèctric generat per les línies 1 i 2 per al cas de distància mínima dels conductors respecte del terreny

Normativa	Camp E (kV/m)
UNE-ENV 50166-1	10
ICNIRP	5
Consell Europeu	5

Taula 4: Límits de les diferents normatives

tes normes és de compliment obligat a l'Estat espanyol.

En la taula 4 es mostra un resum dels valors màxims dels camps elèctrics establerts per les diferents normatives estudiades: l'exposició del públic en general a camps electromagnètics i a una freqüència de 50 Hz. En la taula 4 es pot apreciar que la normativa que proposa uns límits més elevats i, per tant, la menys restrictiva és la UNE-ENV 50166-1.

Conclusions

En aquest article s'ha presentat un mètode matemàtic aproximat, però força acurat, que permet calcular la distribució del camp elèctric que generen les línies elèctriques d'alta tensió. A partir de les expressions proposades, s'ha dissenyat un programa informàtic que serveix per simular el camp elèctric creat per qualsevol línia elèctrica d'alta tensió, sigui quina sigui la seva geometria (distribució en l'espai dels conductors). Aquest mètode té una sèrie d'avantatges: permet estudiar qualsevol geometria de línia sigui quina sigui la seva tensió nominal, no s'han de fer lectures directament sota la línia, sinó que des d'un mateix despatx es poden simular la majoria de línies, es pot calcular la distribució del camp elèctric que generaran línies que estan en fase de projecte, etc.

El model matemàtic proposat només serveix quan

es compleixen a la vegada totes les hipòtesis apuntades en el subapartat on se dedueix el camp elèctric creat per n conductors rectilinis i infinits. Al contrari, per calcular la distribució del camp elèctric en un cas qualsevol, s'ha de recórrer a altres tècniques, com poden ser les diferències finites o els elements finits. Aquestes tècniques, però, són aproximades, més complexes i consumeixen molta més memòria i requereixen molt més temps de computació. Els valors numèrics que proporciona aquest programa s'han contrastat amb els resultats d'altres mètodes de càlcul més complexos, extrets de revistes internacionals i s'ha comprovat que proporcionen valors pràcticament idèntics.

El camp elèctric que generen les línies estudiades a 1 m del terra és inferior als límits imposats per la norma experimental espanyola UNE-ENV 5066-1 que a 50 Hz és de 10 kV/m, però en alguna situació s'han calculat valors màxims propers als 5 kV/m, que és el límit imposat per les recomanacions del Consell Europeu. Però, probablement, si es repetís aquest estudi en línies de 380 kV, en algun punt es podrien sobrepassar els 5 kV/m.

És important destacar que el camp elèctric que creen les línies elèctriques no depèn del valor de la intensitat dels corrents que circulen pels conductors, sinó que depèn del valor de la tensió dels conductors. Per tant, és d'esperar que per a línies de tensió molt elevada els camps elèctrics generats siguin intensos.

Les línies de dos circuits normalment generen una distribució de camp elèctric amb intensitats inferiors a

les de les d'un circuit únic. Això és cert sempre que es colloquin adequadament els conductors de fase, és a dir, que és molt important l'angle de fase de cada conductor. Per tant, en el cas de línies de dos circuits, si es permuta la posició dels conductors de fase, la distribució del camp elèctric es pot veure alterada i, per algunes configuracions, el camp elèctric generat per una línia de dos circuits pot arribar a ser superior a la generada per una línia d'un circuit únic. Per a una línia de dos circuits, l'organització de conductors de fase que genera un camp elèctric més baix correspon a la indicada en la taula 2.

En el cas de línies de més d'un circuit, si se seleccionen adequadament les fases de cada conductor, les geometries que proporcionen un camp elèctric més baix corresponen a les hexagonals (els conductors de fase se situen en els vèrtexs d'un hexàgon regular). En el cas de línies de només un circuit es minimitza el camp elèctric quan els conductors formen un triangle equilàter.

Els resultats obtinguts mostren clarament que la millor protecció contra els possibles efectes dels camps elèctrics que generen les línies elèctriques consisteix a determinar unes distàncies de seguretat al voltant de la línia, fora de les quals es pugui assegurar que el valor del camp elèctric està per sota d'un nivell determinat. Aquestes distàncies de seguretat s'han de calcular en funció de la tensió nominal de la línia i de la distància dels conductors respecte del terreny.

Referències

- CHECA, L. M., *Líneas de transporte de energía*, 3a ed., Marcombo Boixareu Editores (Barcelona-México, 1988).
- ICNIRP Guidelines, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, **74**, 494-522 (1998).
- RAS OLIVA, E., *Teoría de líneas eléctricas: de potencia, de comunicación, para transmisión en continua*, 2a ed., Universidad Politécnica de Catalunya, ETS Ingenieros Industriales, Marcombo, DL (Barcelona, 1985).
- REITZ, J. R., MILFORD, F. J. i CHRISTY, R. W., *Fundamentos de la teoría electromagnética*, 3a ed., Ed. Fondo Educativo Interamericano (México DF, 1984).
- RIBA RUIZ, J. R. i ALABERN, X., Simulació del camp magnètic generat per les línies aèries d'alta tensió, *Revista de Física*, **3(1)**, 38-42, 2n semestre 2001 Societat Catalana de Física, Institut d'Estudis Catalans.
- RIBA RUIZ, J. R. i ALABERN, X., *Simulación de los campos creados por una línea aérea de 380 kV con dos circuitos dúplex acoplados en paralelo*, XI Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica (Badajoz, 2001).
- Recomanació del Consell Europeu del 12 de juliol de 1999. Exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz). *Diari Oficial de les Comunitats Europees* L 199/59 a L199/70, 30/7/1999.
- Norma experimental UNE-ENV 50166-1. Exposición humana a los campos electromagnéticos de baja frecuencia (0 Hz a 10 kHz). AENOR 1996.
- YOU GANG, G. i LIFANG, Y., Determination of Dangerous Region of the Electromagnetic Pollution Caused by the Electric Fields around Power Lines, *International Conference on Communication Technology (ICCT 98)*, **S26-01-1 - S26-01-4**, 22-24 (Xina, Beijing, 1998).