Simulació del camp magnètic generat per les línies aèries d'alta tensió

Jordi-Roger Riba Ruiz* **i Xavier Alabern Morera**†

Introducció

Les línies aèries de transport d'energia elèctrica generen camps elèctrics i magnètics de 50 Hz que poden afectar les persones que es troben a la vora. Des de mitjan anys setanta han aparegut diferents estudis que intenten relacionar aquests camps amb certes malalties, algunes greus. Mentre que alguns estudis han trobat una relació directa entre aquestes malalties i els camps elèctrics i magnètics, altres estudis no l'han trobada.

És conegut que a 50 Hz sempre estarem en condicions de camp proper, ja que la distància a què ens trobarem de la línia elèctrica sempre serà molt inferior a la longitud d'ona corresponent a una freqüència de 50 Hz, que és de 6.000 km. Segons es dedueix de les equacions de Maxwell que regeixen el comportament dels camps i les ones electromagnètiques, d'una banda, a 50 Hz pràcticament no hi haurà radiació en forma d'ones electromagnètiques i, de l'altra, el camp elèctric i el magnètic estaran desacoblats, és a dir, seran independents l'un de l'altre. Això ens indica que a partir de l'un no es pot deduir l'altre sinó que s'han de calcular separadament. També cal tenir en compte que el camp elèctric és degut a la diferència de tensió que hi ha entre la línia i el terreny, i que el camp magnètic és generat pel corrent transportat per la línia.

En aquest article ens centrarem en la deducció d'una fórmula que ens permeti calcular el camp magnètic que generen les línies d'alta tensió i, posteriorment, simularem el camp magnètic que generen diferents línies aèries reals existents al territori espanyol.

Deducció del camp magnètic generat per una línia aèria

Cal tenir en compte que les línies d'alta tensió utilitzen el sistema trifàsic per transportar l'energia elèctrica. Això significa que disposen de tres conductors amb tensions alternes sinusoïdals de 50 Hz amb iguals amplituds, però desfasades entre elles un angle de 120°. Per tant, s'haurà de tenir en compte aquest angle de fase en el càlcul del camp magnètic.

Càlcul del camp magnètic generat per un conductor rectilini infinit i aïllat

La figura 1 mostra un conductor rectilini molt llarg pel qual circula un corrent d'intensitat I_i, el qual genera un camp magnètic B_i en l'espai que l'envolta. En problemes amb un elevat grau de simetria es pot determinar el mòdul del camp magnètic aplicant la llei d'Ampère i resolent la integral de línia donada per l'expressió següent:

$$\oint_C B\,dl = \mu_0 I_i,$$

on C és una corba tancada. Després d'aplicar la llei d'Ampère a la corba C de la figura 1 resulta:

$$B = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_i},$$

on $r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ i $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ N/A^2

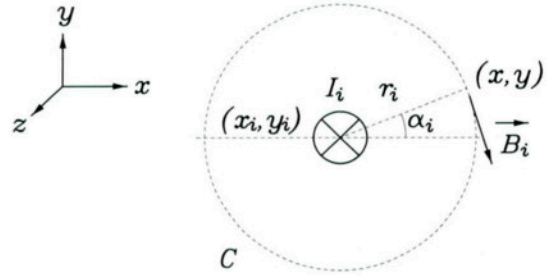

Figura 1: *Camp magnètic creat per un conductor únic*

és la permeabilitat magnètica del buit o de l'aire. A partir de la figura 1 també es pot deduir que l'expressió vectorial del camp magnètic ve donada per l'expressió següent:

$$\vec{B}_i = \frac{\mu_0 I_i^{\varphi}}{2\pi}\left(\frac{y-y_i}{r_i^2}, -\frac{x-x_i}{r_i^2}, 0\right),$$

on φ és l'angle de fase del corrent. Cal tenir present que I_i i $\vec{B}_i$ són variables físiques alternes sinusoïdals i

* **Jordi-Roger Riba Ruiz** (Igualada, 1966) és doctor en Ciències Físiques per la UB i actualment és professor de l'EUETI d'Igualada i de l'ETSEI de Terrassa (UPC). A/e: 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.

és convenient d'expressar les seves magnituds en valor eficaç.

L'expressió anterior és vàlida quan la distància del conductor al punt de mesura del camp és inferior a $\lambda/4$ (condició de camp proper), fet que sempre serà així perquè a una freqüència de 50 Hz la longitud d'ona és:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\,10^6 \text{ km/s}}{50 \text{ s}^{-1}} = 6.000 \text{ km}.$$

Presència del terra. Mètode de les imatges

El mètode de les imatges (Ras, 1985 i IEEE, 1988) serveix per tenir en compte els efectes de la presència d'un terreny conductor. El camp magnètic altern que genera la línia indueix corrents de retorn en el terreny i aquests a la vegada generen un camp magnètic que se superposa amb el que produeix la línia.

Si el terreny fos un conductor perfecte, el corrent de retorn circularia per la superfície i només hi hauria flux magnètic a l'aire, ja que no hi hauria penetració de flux magnètic a l'interior del terreny (això és degut a la llei d'inducció de Faraday: qualsevol flux pot ser apantallat pel corrent que s'indueix en el terreny si aquest és un conductor ideal). El camp originat per un conductor rectilini paral·lel a un pla conductor ideal resulta ser idèntic al camp creat pel conductor original i la seva imatge, que és un conductor amb igual intensitat però amb signe contrari.

Si el terreny no és un conductor perfecte, el corrent de retorn circularà a més profunditat; aquesta depèn de la resistivitat elèctrica del terreny, de tal manera que com més resistivitat tingui el terreny més gran serà la profunditat de circulació del corrent. Això és degut al fet que hi ha penetració del flux magnètic en el terreny i la seva profunditat de penetració augmenta en fer-ho la resistivitat elèctrica del terreny. Les resistivitats del terreny fluctuen entre $\rho < 20\ \Omega$m per a terrenys pantanosos fins a $\rho > 3.000\ \Omega$m per a terrenys molt pedregosos. Com a valor de càlcul de la resistivitat del terreny se sol agafar $\rho = 100\ \Omega$m.

Quan el camp magnètic penetra a l'interior d'un medi amb pèrdues la seva amplitud disminueix segons l'expressió:

$$B(y) = B_0 e^{-y/\delta}.$$

L'expressió anterior indica que la intensitat del camp magnètic decau exponencialment a mesura que es penetra a l'interior del material conductor. Es defineix la profunditat de penetració *skin depth* δ com la profunditat a la qual l'amplitud del camp magnètic decau en un factor $1/e$. En el cas d'un conductor ideal es dedueix que $B = 0$ a qualsevol punt de l'interior i, per tant, s'obté $\delta = 0$, mentre que per a un aïllant perfecte s'obté $\delta = \infty$.

Per calcular la profunditat de penetració es pot utilitzar l'expressió aproximada per al cas de baixes freqüències, donada per Reitz (Reitz, 1984, pàg. 404):

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}},$$

on ρ és la resistivitat del medi expressada en Ωm, μ és la permeabilitat magnètica del medi expressada en N/A^2 i f és la freqüència d'oscil·lació del camp magnètic en Hz.

Suposant que $f = 50$ Hz, $\rho = 100\ \Omega$m i $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}\ \text{N/A}^2$ resulta que $\delta \approx 711,76$ m. A 50 Hz la profunditat de penetració pren valors que normalment oscil·len entre 500 i 1.000 m, valors molt superiors a la distància entre les línies elèctriques i els punts de mesura del camp magnètic.

La distància a la qual s'ha de suposar el corrent de retorn per sota la superfície (IEEE, 1988) és $y_i + \alpha$, on α és una distància complexa de la forma:

$$\alpha = \sqrt{2}\delta^{-45^\circ}.$$

Per al cas d'un terreny perfectament conductor resulta $\delta = 0$ i, per tant, $\alpha = 0$. En canvi, per a terrenys de baixa conductivitat, resulta una profunditat de penetració δ molt gran i, per tant, una α també molt elevada. En el cas d'un aïllant perfecte resulta $\alpha = \infty$.

Càlcul del camp magnètic creat per un conductor rectilini, infinit i aïllat tenint en compte l'efecte d'un terreny conductor

Es treballarà amb la hipòtesi que el terreny és pla i homogeni, és a dir, que té una resistivitat elèctrica uniforme. En aquest cas se simula l'efecte del terreny conductor per un altre corrent en sentit contrari al corrent original i de la mateixa intensitat, que circula a una profunditat $y_i + \alpha$ per sota de la interfície aire-terreny. La figura 2 mostra aquesta situació. En aquest cas l'expressió vectorial del camp magnètic resultant és la següent:

$$\vec{B}_i = \frac{\mu_0 I_i^{\varphi}}{2\pi}\left(\underbrace{\frac{y-y_i}{r_i^2}}_{(1)} - \underbrace{\frac{y+y_i+\alpha}{(x-x_i)^2+(y+y_i+\alpha)^2}}_{(2)},\right.$$

$$\left.\underbrace{-\frac{x-x_i}{r_i^2}}_{(1)} + \underbrace{\frac{x-x_i}{(x-x_i)^2+(y+y_i+\alpha)^2}}_{(2)}, 0\right).$$

Els termes (1) de l'expressió anterior són deguts al corrent del conductor, mentre que els termes (2) són deguts al corrent de retorn pel terra (corrent imatge). Quan la distància entre el conductor i el punt de mesura del camp magnètic és molt inferior a la profunditat de penetració, els termes (2) es poden menysprear sense cometre cap error apreciable.

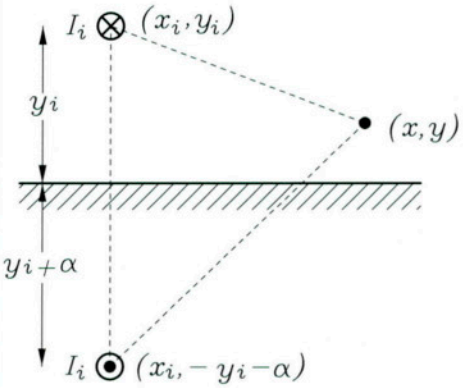

Figura 2: *Corrent real i corrent imatge*

En el cas d'haver-hi n conductors rectilinis paral·lels (cas de la majoria de les línies) el camp magnètic resultant es determinaria pel principi de superposició:

$$\vec{B}_{\text{res}} = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i.$$

En la deducció de les expressions matemàtiques del camp magnètic s'han suposat les hipòtesis següents:

- S'ha ignorat l'efecte de les estructures de suport dels conductors.
- S'han suposat els conductors horitzontals, molt prims i infinitament llargs.
- S'ha suposat el terreny llis, horitzontal i uniforme.
- S'ha suposat la resistivitat elèctrica del terreny uniforme i constant amb la profunditat.

Línies elèctriques aèries estudiades

Per elaborar aquest estudi s'ha fet un programa informàtic que calcula el camp magnètic generat per un nombre n qualsevol de conductors. Al programa se li han d'introduir les coordenades dels conductors de cada una de les fases de la línia, les intensitats dels corrents que hi circulen i els respectius angles de fase, així com la resistivitat mitjana del terreny. S'ha fet la suposició que la resistivitat elèctrica del terreny és uniforme i constant amb la profunditat, i de valor 100 Ωm. S'estudiarà la distribució del camp magnètic a les proximitats de tres tipus de línies aèries de 220 kV que es troben en servei a la xarxa de transport espanyola. En tots els casos s'ha suposat que els corrents que porten les línies estan equilibrats (tots tenen iguals amplituds i es troben desfasats 120°) i que totes les línies transporten la mateixa potència. La figura 3 mostra les línies estudiades (Checa, 1988). Mentre que les línies 1 i 2 només tenen tres conductors actius, la línia 3 en té sis. En aquesta

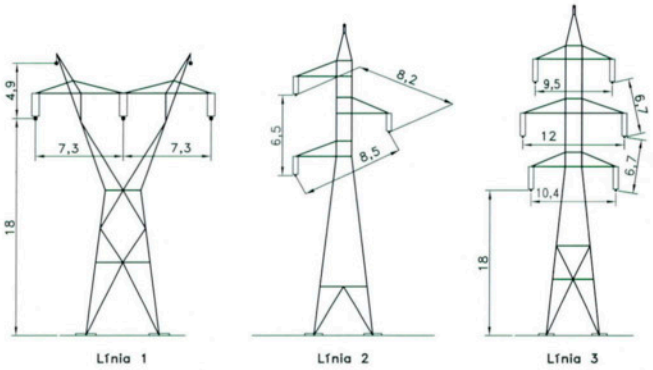

Figura 3: *Disposició geomètrica de les línies aèries de 220 kV estudiades*

línia s'estudiaran dues ordenacions possibles dels conductors actius en funció dels angles de fase de les intensitats.

Les taules següents mostren les coordenades, el mòdul i la fase dels corrents que circulen pels conductors de les diferents línies estudiades:

x (m)	y (m)		I (A)	Fase
-7,3	18	6,8	500	0°
0	18	6,8	500	120°
-7,3	18	6,8	500	240°

Taula 1: *Dades referents a la línia 1*

x(m)	y(m)		I (A)	Fase
-3,77	19	13,30	500	0°
3,77	15,75	10,05	500	120°
-4,08	12,5	6,80	500	240°

Taula 2: *Dades referents a la línia 2*

x(m)	y(m)		I (A)	Fase a	Fase b
-4,75	31	19,8	250	0°	0°
4,75	31	19,8	250	0°	120°
-6,00	24,5	13,3	250	120°	240°
6,00	24,5	13,3	250	120°	240°
-5,20	18	6,8	250	240°	120°
5,20	18	6,8	250	240°	0°

Taula 3: *Dades referents a la línia 3. Configuracions 3a i 3b*

Segons el Reglament de línies aéries d'alta tensió, per a una línia de 220 kV, la distància mínima a la qual es pot trobar un conductor del terreny és de 6,8 m. La taula anterior mostra dues coordenades verticals (y) per cada conductor; la primera correspon a la distància màxima del conductor respecte del terreny i la segona correspon a la distància mínima (cal tenir present que els conductors es corben entre torre i torre).

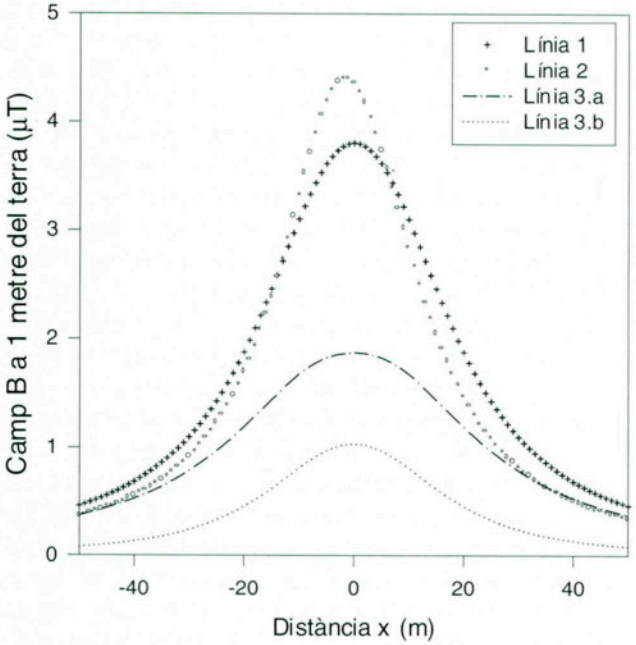

Figura 4: *Camp magnètic a 1 m del terreny creat per les diferents línies. Cas de distància màxima entre els conductors i el terreny*

Línia	**Camp magnètic en μT**	
	Dist. màxima	Dist. mínima
1	3,81	17,97
2	4,35	11,01
3a	1,87	4,01
3b	1,03	6,37

Taula 4: *Camp magnètic sota la vertical del centre de la línia a 1 m del terreny*

Resultats de la simulació

La figura 4 mostra les intensitats del camp magnètic resultants de la simulació a 1 m per sobre la superfície del terra entre $x = -50$ i $x = 50$ m quan es dóna la distància màxima entre els conductors i el terreny.

La figura anterior ens mostra que en els casos de les línies 1 i 3 el perfil del camp magnètic és simètric a causa de la perfecta simetria en la distribució geomètrica dels conductors de la línia. En canvi, la línia 2 presenta una lleugera asimetria de la distribució del camp magnètic a causa dels tres conductors actius que no estan situats simètricament.

La figura 5 mostra les intensitats del camp magnètic resultants de la simulació a 1 m per sobre la superfície del terra entre $x = -50$ i $x = 50$ m, quan els conductors es troben en la situació més próxima al terreny que permet el reglament.

A continuació es fa una comparació del camp magnètic generat per les 3 línies estudiades. La taula 4 mostra els valors del camp magnètic a 1 m per sobre del terreny just a sota la vertical del centre geomètric de la línia ($x = 0$) en els dos casos estudiats: distància màxima i mínima entre els conductors i el terreny. Normalment es dóna el valor del camp magnètic a 1 m del terra perquè així ho aconsellen els protocols de mesura (Alabern, 2000) (de fet aquesta és la distància a la qual es troben les persones). De les figures 4 i 5 i de la taula 4 es dedueix que, en disminuir la distància dels conductors al terreny, el camp magnètic generat per la línia augmenta molt.

Conclusions

S'ha exposat un mètode aproximat, però molt realista, per simular el camp magnètic que generen les línies de transport d'energia elèctrica. Aquest sistema permet simular el camp magnètic creat per la majoria de línies aèries. Aquest mètode té una sèrie d'avantatges com ara la facilitat per poder estudiar diferents tipus de línies, el fet de no haver de fer lectures a l'exterior, així com la possibilitat de calcular el camp magnètic que generaran línies que estan en fase de projecte.

Del treball es desprèn la conclusió que la millor protecció contra els possibles efectes dels camps magnètics que generen les línies elèctriques és la distància. Per les línies estudiades s'ha vist que el camp magnètic disminueix molt amb la distància i que cada línia, tot i transportar la mateixa potència elèctrica que les altres, genera una distribució de camp magnètic particular. S'ha comprovat que en els punts de mínima distància entre els conductors i el terreny el camp magnètic que genera la línia és molt més intens que en els punts de màxima distància entre els conductors i el terreny. D'altra banda, el soterrament de les línies d'alta tensió tampoc no és una bona solució per reduir el valor dels camps magnètics que generen, ja que per raons tècniques i econòmiques no es poden soterrar a gaire profunditat i, a més, la permeabilitat de la major part dels terrenys és pràcticament idèntica a la de l'aire (els terrenys no apantallen els camps magnètics).

La distància entre les fases és molt important per determinar la distribució del camp magnètic al qual poden estar sotmeses les persones. En disminuir la distància entre les fases, el camp magnètic generat per la línia disminueix, però aquesta no es pot fer arbitràriament petita, perquè les pèrdues i les interferències generades per l'efecte corona (per un valor crític del camp elèctric l'aire que envolta els conductors s'ionitza) augmenten molt en disminuir la distància entre les fases. El Reglament de línies aéries d'alta tensió limita el valor mínim de la separació entre les fases.

És important destacar que el camp magnètic generat per les línies elèctriques no depèn del valor de la tensió dels conductors, sinó que depèn de les intensitats dels

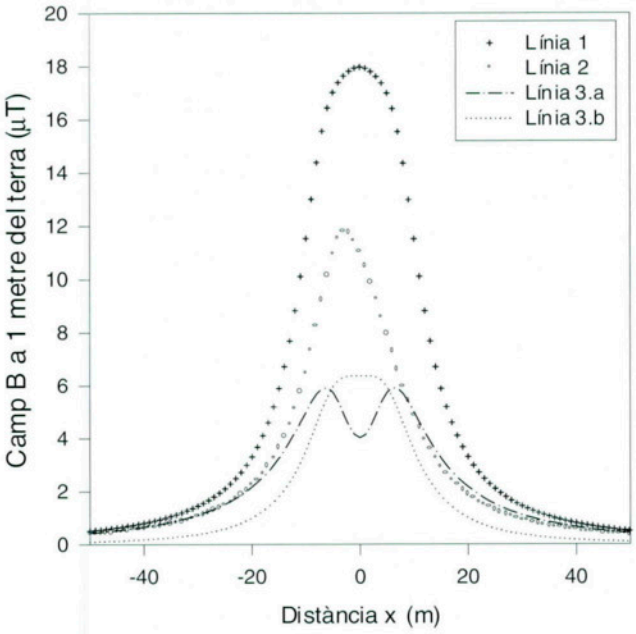

Figura 5: *Camp magnètic a 1 m del terreny creat per les diferents línies. Cas de distància mínima entre els conductors i el terreny*

corrents que transporten. Per tant, una línia de mitjana o de baixa tensió pot provocar intensitats del camp magnètic de valor similar a les que genera una línia d'alta tensió. En tots els casos estudiats el camp magnètic calculat és molt inferior als límits imposats per la norma experimental espanyola UNE-ENV 5066-1 que a 50 Hz és de 640 μT. Aquesta és una normativa que no és de compliment obligat, sinó que només dóna valors de referència. De totes maneres, aquests valors de referència són qüestionables, ja que hi ha estudis que conclouen que intensitats del camp magnètic d'unes dècimes de μT poden ser perjudicials per a la salut.

El mètode aplicat en aquest treball no permet simular els efectes de les torres metàl·liques (suports de la línia) sobre la distribució del camp magnètic; si es volguessin tenir en compte aquests efectes i d'altres s'hauria de recórrer a mètodes de simulació molt més refinats.

Totes les línies estudiades porten conductors que fan de parallamps, els quals estan connectats al terra (generalment aquesta connexió es fa a cada torre). Aquests conductors no són actius (no transporten potència elèctrica), però s'hi indueixen uns corrents que segons l'apartat 5.3.1 de la referència (IEEE, 1993) poden arribar a ser de 50 mA per cada km de línia (suposant que no hi ha connexió a terra entremig d'aquesta distància). Per tant, aquests corrents són molt febles i els camps magnètics que generaran els conductors que fan de parallamps seran menyspreables.

Bibliografia

ALABERN, X., RIBA, J. R. i ROSA, O., *Protocol for Measuring Low Frequency Electromagnetic Fields.* 1st. Internacional Conference on Occupational Risk Prevention, (Tenerife, 2000).

CHECA, L. M., *Líneas de transporte de energía*, 3a ed., Marcombo Boixareu Editores (Barcelona-México, 1988).

IEEE Magnetic Fields Task Force of the AC Fields Working Group of the Corona and Field Effects Subcommittee of the Transmission and Distribution Comittee, *Magnetic Fields From Electric Power Lines. Theory and Comparison to Measurements*, IEEE Transactions on Power Delibery, **3 (4)**, 2.127-2.136 (1988).

IEEE Standard 524a-1993, *IEEE Guide to Grounding During the Installation of Overhead Transmission Line Conductors*, Suplement to IEEE Std. 524-1992. Transmission and distribution Comitee of the IEEE Power Engineering Society.

RAS, 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, 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).