

Transmissió aèria d'energia elèctrica en corrent continu a molt alta tensió (HVDC, *High Voltage Direct Current*)

Jordi-Roger Riba Ruiz*

Introducció

L'energia elèctrica es genera i es transmet majoritàriament en forma de corrent altern, a unes tensions diferents a les de consum. La transmissió de l'energia elèctrica des de la generació fins al consum es fa mitjançant línies elèctriques, a un voltatge molt elevat. La utilització de transformadors possibilita el fet d'aconseguir tensions extraordinàriament elevades (EHVAC, *Extremely High Voltage Altern Current*).

Les pèrdues conjuntes de transmissió i distribució d'energia elèctrica s'estimen entre el 7 % i el 8 %. Aproximadament un 60 % d'aquestes pèrdues són degudes a les línies elèctriques i el 40 % restant, als transformadors. És molt important reduir al màxim les pèrdues en la transmissió de l'energia elèctrica, ja que d'aquesta manera s'augmenta l'eficiència del sistema elèctric i es redueixen les emissions de CO₂. La transmissió d'energia elèctrica en HVDC (*High Voltage Direct Current*) presenta avantatges en el cas de transportar potències elèctriques molt elevades a grans distàncies. Cal tenir en compte que l'energia elèctrica es genera i es consumeix en forma AC (*Altern Current*) i, per tant, a ambdós extrems d'una línia HVDC cal instal·lar estacions convertidores AC-DC. En les línies de transmissió HVDC que transmeten potències molt elevades a grans distàncies, les pèrdues de potència més petites sumades als costos de construcció de la línia més baixos poden justificar els costos addicionals de les estacions convertidores (AC-DC), més cares que les estacions terminals de les línies AC.

Avantatges de la transmissió HVDC davant la transmissió EHVAC

Tal com s'ha explicat anteriorment, les línies aèries de transmissió HVDC tenen sentit en dos casos, en transmissions de molta potència a distàncies molt grans (generalment més de 500 MW a més de 500 km) i en transmissions submarines (la transmissió submarina en AC té moltes limitacions a causa de l'elevada reactància capacitativa dels cables com a conseqüència del seu aïlla-

ment). Els països on hi ha línies de transmissió aèries en HVDC són, entre d'altres, els Estats Units, el Canadà, el Brasil, l'Índia i la Xina. Hi ha transmissions submarines en HVDC en illes del Japó, entre Suècia i Alemanya, entre França i Anglaterra, etc.

La figura 1 mostra una comparació entre les pèrdues de potència en dues línies elèctriques aèries, una de corrent altern a 400 kV i una altra de corrent continu a ± 400 kV en funció de la longitud de la línia. De la figura 1 es pot comprovar que per a distàncies molt grans les línies HVDC presenten un nivell de pèrdues força inferior a línies equivalents d'altern.

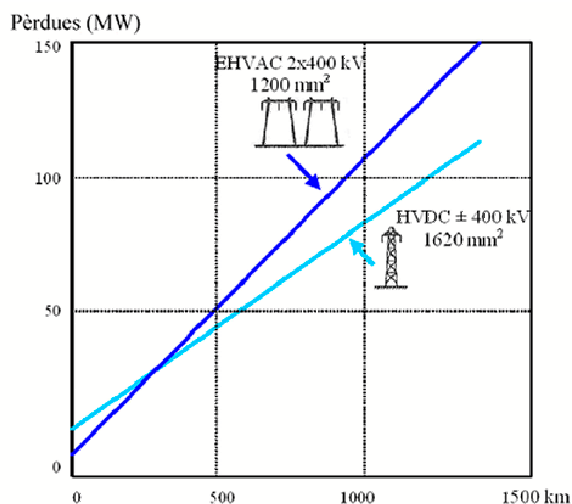


Figura 1: Comparació de les pèrdues entre una línia aèria DC i una AC de 1200 MW. Font: ABB

A continuació s'exposen alguns dels avantatges de la transmissió en corrent continu a molt alta tensió:

- A tensions AC elevades, hi ha pèrdues importants a causa de la capacitància entre fases en les línies aèries, en el cas de línies subterrànies entre fases i el terra i en el cas de línies submarines entre les fases i l'aigua, totes degudes a l'aïllament. Per a línies de transmissió curtes aquestes pèrdues no són significants, però resulten molt pronunciades en el cas de

*Jordi-Roger Riba Ruiz (Igalada, 1966) és doctor en Ciències Físiques per la UB i és professor de l'EUETI d'Igalada (UPC) i de l'ETSEIA de Terrassa (jordi@euetii.upc.edu).

línies molt llargues. El corrent capacitatiu provoca pèrdues en la resistència elèctrica dels conductors i disminueix la capacitat de transport de potència de la línia. La transmissió DC no presenta aquest corrent capacitatiu i, per tant, les pèrdues són més reduïdes que en AC.

- Les línies DC necessiten conductors de secció menor ja que s'aprofita la totalitat de la secció del conductor perquè no pateix l'efecte pel·licular (*skin effect*). Això, a més de disminuir el corrent de curtcircuit (perquè una menor secció de conductor implica una major resistència elèctrica d'aquest, amb la qual cosa disminueix el corrent de curtcircuit), suposa un estalvi de material i de pes. També permet aprofitar millor els conductors i transportar més potència en un mateix conductor.
- Les línies de transmissió AC, com que són trifàsiques, necessiten un mínim de tres conductors actius. Contràriament, les línies DC només necessiten dos conductors actius (positiu i negatiu) i són les estructures de suport més senzilles (en les transmissions DC) per la mateixa potència transmesa. Això suposa un estalvi molt considerable.
- Una línia de transmissió DC pot tenir un impacte visual més reduït que una línia AC equivalent, a causa del fet que les estructures de suport són més petites amb igualtat de potència.
- Les línies DC possibiliten la interconnexió de dues xarxes elèctriques que operen a freqüències diferents (connexió asíncrona), com per exemple països que operen a 50 Hz i que voldrien connectar-se amb països veïns que operen a 60 Hz. En aquest cas cal fer un pas previ a DC.
- Per a transmissions AC submarines o mitjançant cables enterrats, no és pràctic considerar distàncies de més de 100 km a causa dels corrents capacitatius. En canvi, en DC aquest problema es redueix moltíssim, i hi ha projectes de cables DC de fins 600 km de longitud.
- Les línies DC generen camps elèctrics i magnètics estàtics. En canvi, els camps que generen les línies AC oscil·len a la freqüència de la xarxa i provoquen fenòmens d'inducció en elements conductors veïns.
- L'efecte corona és més pronunciat per a transmissions en corrent altern. En el cas de corrent continu es necessita un camp elèctric de 3 MV/m per ionitzar l'aire, mentre que en el cas de corrent altern es requereix un camp elèctric de 2,12 MV/m (valor eficaç). En transmissions a molt alta tensió en corrent altern s'utilitzen conductors de feix (tenen bastants subconductors) per fase per disminuir l'efecte corona.

En resum, amb igualtat de potència transportada, les línies HVDC presenten més capacitat de transmissió de potència i requereixen menor secció de conductors que les línies EHVAC. Això provoca una disminució de costos de transmissió a elevades potències per comparació a les línies EHVAC. Aquest avantatge encara s'incrementa més a mesura que les potències i tensions de transmissió es fan més i més elevades.

La figura 2 mostra una línia HVDC bipolar de 2000 MW. Els conductors més propers al terra corresponen als conductors actius (els que transporten la potència elèctrica), mentre que els conductors més alts són de protecció (estan connectats a terra i protegeixen la línia contra llamps i descàrregues atmosfèriques).



Figura 2: Línia HVDC de 2000 MW

Efecte corona

L'efecte corona consisteix en la ionització de l'aire que envolta els conductors d'alta tensió. Aquest fenomen ocorre quan el camp elèctric al voltant de la línia (generat pels conductors d'aquesta) supera la rigidesa dielèctrica de l'aire i es manifesta en forma de petites guspines o descàrregues a pocs centímetres dels conductors. Aquest fenomen produeix pèrdues de potència, ionització de l'aire, soroll audible (el brunzit que se sent sota les línies de molt alta tensió), interferències de radiofreqüència, ozó, òxids de nitrogen i altres compostos químics.

En línies AC l'efecte corona és més intens en períodes de pluges intenses perquè les gotes d'aigua concentren la intensitat del camp elèctric.

En el cas de línies DC, el soroll audible i les interferències de radiofreqüència disminueixen en dies plujosos, perquè la concentració d'ions en la zona de càrrega espacial tendeix a reduir els corrents de fuga deguts a l'efecte corona. Pel que fa al soroll de radiofreqüència, el conductor positiu és la font més important. El nivell de soroll audible que generen les línies HVDC és inferior al que generen línies comparables AC, però, mentre que

en les línies HVDC el soroll és essencialment continu, en les línies AC es nota més en cas de mal temps.

La figura 3 mostra l'efecte corona que es genera a prop d'un conductor d'una línia d'alta tensió.



Figura 3: Efecte corona en un conductor d'una línia d'alta tensió

Ionització deguda a l'efecte corona

Els ions de l'aire són components naturals de l'atmosfera. Els ions són àtoms o grups d'àtoms amb un excés d'electrons (ions negatius) o amb electrons de menys (ions positius). Els ions es formen a causa de col·lisions entre partícules. Entre les fonts naturals d'ions es poden citar les tempestes elèctriques, les cascades d'aigua, els materials radioactius, les radiacions electromagnètiques, les tempestes de sorra, etc.

L'aire net conté de 500 a 2000 ions/cm³ mentre que prop de cascades pot tenir concentracions de 35.000 ions/cm³. Aquestes concentracions són molt petites per comparació al nombre de molècules que hi ha en un cm³ d'aire, que és de l'ordre de 10¹⁹ molècules/cm³.

Les línies elèctriques aèries, a causa de l'efecte corona, ionitzen les molècules d'aire que es troben en la superfície dels conductors. En el cas de línies AC, els ions formats per l'efecte corona són alternativament atrets i repel·lits pel canvi de polaritat de la tensió dels conductors (a raó de 50 cicles per segon). Aquest fenomen provoca que hi hagi poca circulació d'ions lluny de la línia. Contràriament, en el cas de línies DC no hi ha canvi de polaritat de la tensió dels conductors. Per tant, els ions positius s'allunyen dels conductors positius, mentre que els ions negatius són atrets pels conductors positius. D'una banda, una fracció dels ions negatius recombina amb ions positius i, de l'altra, alguns dels ions generats per l'efecte corona no assoleixen el conductor de polaritat oposada i s'allunyen de la línia. Globalment augmenta la densitat d'ions al voltant del conductor elèctric. A més, els ions que es concentren al voltant d'un conductor tenen el mateix signe que la tensió d'aquest respecte al terra. Aquesta concentració d'ions al voltant d'una línia DC provoca una zona de càrrega espacial que contribueix significativament al camp elèctric total creat per la línia.

La figura 4 mostra la circulació dels ions de l'aire al voltant d'una línia elèctrica HVDC. Aquesta circulació d'ions és deguda al camp magnètic generat pels conductors de la línia.

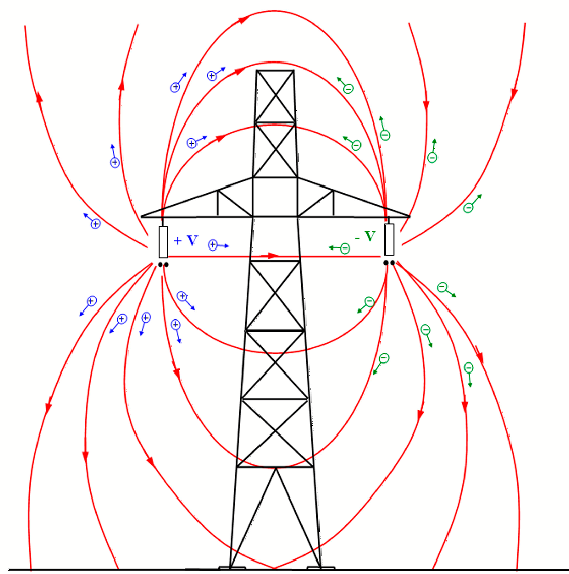


Figura 4: Circulació dels ions generats per l'efecte corona

Camps elèctrics generats per les línies HVDC

Les línies HVDC generen un camp elèctric que té dues components: el camp electrostàtic (tal com el generaria si es trobés situada en el buit, únicament degut a la tensió dels conductors) i el camp degut a la càrrega espacial. A més, a nivell del terra es constata que aquests dos camps se sumen, de manera que el camp resultant és superior al camp electrostàtic.

Però hi ha una tercera component del camp elèctric, el camp elèctric propi o local de la Terra, que depèn de les condicions meteorològiques, i que en el cas de bon temps acostuma a valdre de 0,1 a 0,5 kV/m. El camp elèctric d'una línia de transmissió HVDC presenta valors similars als que es poden mesurar sota d'un núvol en cas de tempesta.

Aquests fenòmens provoquen que l'entorn elèctric d'una línia DC sigui més complex i variable que el d'una línia AC, i el pronòstic és molt més complicat. El camp degut a la zona de càrrega espacial depèn molt del vent i d'altres variables climatològiques instantànies (pressió, temperatura, humitat relativa, altura, neu, boira, etc.).

Els ions es poden adherir a l'aigua o a les partícules de pols, formant aerosols amb càrrega elèctrica. El vent pot arrossegar aquests aerosols a distàncies considerables de la línia elèctrica. Hi ha estudis que verifiquen que s'han trobat restes d'aquests aerosols a 1,6 km

de distància de les línies de ± 400 kV. Es desconeix si aquests ions poden provocar malalties en el cos humà.

La figura 5 mostra un llamp, que no és res més que els efectes d'un camp elèctric natural de molt alta intensitat.



Figura 5: Efectes del camp elèctric terrestre local

Camps magnètics generats per les línies HVDC

Cal tenir en compte que la Terra té un camp magnètic propi, que és continu i local (és el que orienta una brúixola i generalment val entre $20 \mu\text{T}$ en l'equador i $70 \mu\text{T}$ en els pols i està representat en la figura 6). Per tant, el camp magnètic al voltant d'una línia és la suma del camp magnètic que genera la línia i el camp magnètic local de la Terra. El camp magnètic estàtic que crea la línia té un valor semblant o inferior al camp magnètic terrestre (generalment inferior a $10\text{-}20 \mu\text{T}$ en les condicions més adverses). Per tant, sembla lògic que no suposi un risc per a la salut.

Impactes ambientals de les línies aèries HVDC

Les línies HVDC, com tot producte de la tecnologia humana, presenten una sèrie d'impactes ambientals que es resumeixen a continuació.

- Emissió de sorolls audibles deguts a l'efecte corona. Aquest brunzit és continu i persistent fins i tot en condicions de bon temps.
- Presenten impactes visuals, generalment inferiors a les línies AC equivalents ja que les estructures de les línies DC normalment són més petites. La figura 7 compara dues línies HVDC de 3000 MW i ± 500 kV amb cinc línies AC de 500 kV AC que serien necessàries per transmetre la mateixa potència. Les línies HVDC també ocupen menys superfície.

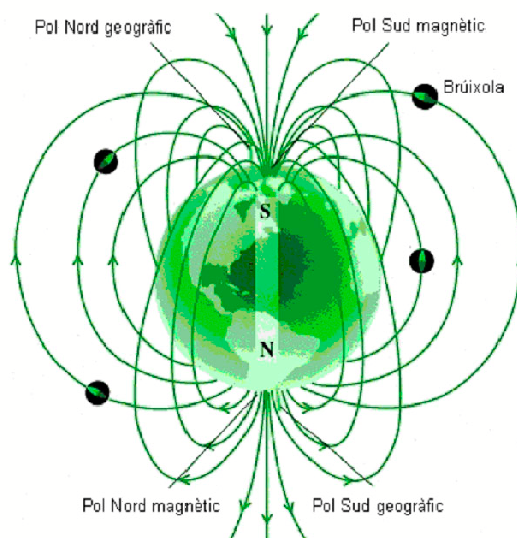


Figura 6: Camp magnètic terrestre

- Les línies aèries ocupen el terreny del traçat i imposen una servitud. A més s'han de desforestar les àrees contigües a la línia.
- Les línies HVDC, igual que les línies EHVAC, generen ozó i òxids de nitrogen a causa de la ionització produïda per l'efecte corona.
- Tant les línies HVDC com les línies EHVAC produeixen interferències electromagnètiques.
- Les línies elèctriques aèries generen problemes de seguretat i confort provocats pels camps elèctrics i magnètics.



Figura 7: Línia de transmissió de 3000 MW en HVDC o en EHVAC. Font: ABB

Estudi d'una línia HVDC de ± 300 kV i 2500 MW

En aquest apartat se simula el camp electrostàtic i el camp magnètic generat per una línia HVDC de ± 300 kV. La figura 8 mostra la geometria de la línia

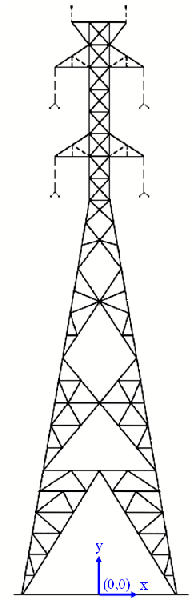


Figura 8: La línia estudiada

Tensió nominal	± 300 kV
Potència nominal	2500 MW
Intensitat nominal	2×1040 A
Conductors	± 1351 kmil, ACSR
Diàmetre dels conductors	36,2 mm

Taula 1: Característiques de la línia estudiada

estudiada. Les principals característiques de la línia es detallen en la taula 1.

En el càlcul s'han suposat els 4 conductors actius inferiors de la línia mostrada en la figura 8 a uns 16 metres del terra i els 4 conductors actius superiors a uns 21 metres.

S'han suposat dues configuracions, DC1 i DC2, per a la línia HVDC estudiada (veure Figura 9).

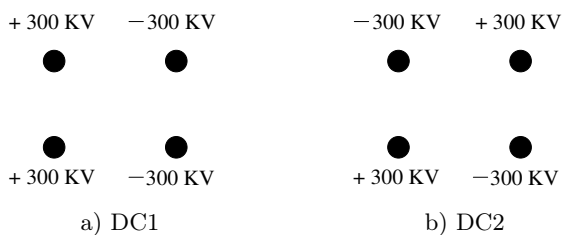


Figura 9: Configuracions de línia HVDC estudiades

Per calcular els perfils del camp magnètic i del camp elèctric generats per la línia estudiada s'ha utilitzat un programa de simulació fet per l'autor d'aquest article i basat en els principis físics detallats en les dues primeres referències bibliogràfiques.

La figura 10 mostra el perfil del camp magnètic calcu-

lat a un metre per sobre del terra (generalment es donen els resultats a aquesta altura perquè és on es troben les persones) a distàncies que oscil·len entre 100 metres a l'esquerra i a la dreta de la vertical del centre geomètric de la línia.

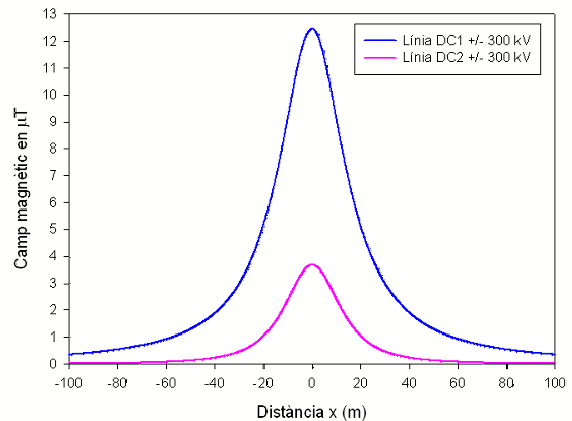


Figura 10: Perfil del camp magnètic generat per dues configuracions de la línia estudiada

La figura 11 mostra el perfil del camp electrostàtic calculat a un metre per sobre del terra a distàncies que oscil·len entre 100 metres a l'esquerra i a la dreta de la vertical del centre geomètric de la línia.

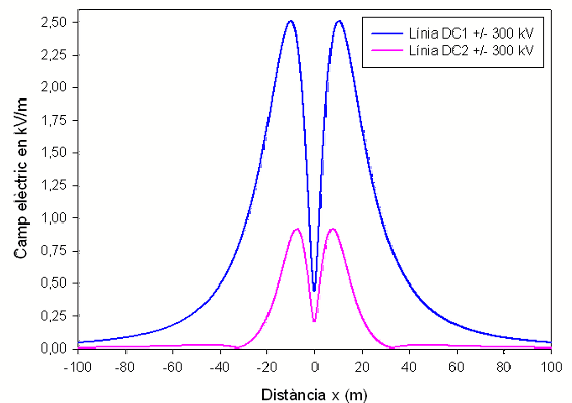


Figura 11: Perfil del camp electrostàtic generat per dues configuracions de la línia estudiada

De les figures 10 i 11 es comprova la importància de la distribució de les tensions en els conductors pel que fa a l'entorn electromagnètic de la línia.

Valors límit dels camps elèctric i magnètic

La taula 2 mostra els valors de referència per a camps elèctrics i magnètics estàtics imposats pel Reial Decret 1066/2001 i aconsellats per la ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*):

	Elèctric	Magnètic
Ocupacional	—	$2.10^5 \mu\text{T}$
Públic en general	—	$4.10^4 \mu\text{T}$

Taula 2: Valors de referència per als camps elèctric i magnètic

Com s'aprecia en la taula 2, les dues normatives estudiades no ofereixen cap valor de referència per al camp elèctric estàtic. A més, el valor límit del camp magnètic estàtic és molt superior als camps magnètics generats per les línies aèries HVDC.

Conclusions

Com a resum d'aquest article es pot arribar a les conclusions següents:

- Les pèrdues conjuntes de transmissió i distribució d'energia elèctrica s'estimen entre el 7 % i el 8 %. Aproximadament un 60 % d'aquestes pèrdues són degudes a les línies elèctriques (el 40 % restant és degut als transformadors). Per tant, és molt important reduir les pèrdues en les línies, sobretot quan es transporta molta potència a distàncies molt grans.
- Les línies aèries de transmissió HVDC tenen sentit en dos casos, en transmissions de molta potència a distàncies molt grans (generalment més de 500 MW a més de 500 km) i en transmissions submarines (la transmissió submarina en AC té moltes limitacions a causa de l'elevada reactància capacitativa dels cables com a conseqüència del seu aïllament).
- Les línies elèctriques HVDC generen camps elèctrics i magnètics, que, pel fet de ser estàtics, no induïxen corrents en cossos conductors propers (a diferència de les línies elèctriques de corrent altern).
- Els camps elèctrics generats per les línies HVDC presenten valors màxims de l'ordre d'uns quants kV/m. Aquests camps elèctrics tenen dues components: el camp electrostàtic (tal com el generaria si es trobés situada en el buit, únicament degut a la tensió dels conductors) i el camp degut a la càrrega espacial. A més hi ha una tercera component deguda al camp elèctric terrestre. El camp degut a la zona de càrrega espacial depèn molt del vent i d'altres variables climatològiques instantànies (pressió, temperatura, humitat relativa, altura, neu, boira, etc.). Aquests fenòmens provoquen que l'entorn elèctric d'una línia DC sigui més complex i variable que el d'una línia AC, i és molt més complicat el pronòstic.
- Els camps magnètics que generen les línies HVDC generalment no superen els $10\text{-}20 \mu\text{T}$ (valors inferiors als del camp magnètic terrestre). Les norma-

tives actuals fixen valors màxims dels camps magnètics estàtics de l'ordre de $10^4\text{-}10^5 \mu\text{T}$. Per tant, sembla que aquests camps no suposen riscos per a la salut humana.

- Dels resultats obtinguts es constata que per una mateixa línia, prenent configuracions diferents (simplement permutant les posicions dels conductors), s'obtenen perfils molt diferents tant del camp magnètic com del camp elèctric.

Bibliografia

- RIBA J.R. I ALABERN X., Simulació del camp magnètic generat per les línies aèries d'alta tensió, *Revista de Física*, **3(1)**, 38–42 (2001).
- RIBA J.R. I ALABERN X., Camp elèctric generat per les línies aèries d'alta tensió, *Revista de Física*, **3(2)**, 47–52 (2002).
- QIN B.L., SHENG J.N., YAN Z. I GELA G., Bulk power transmission at extra high voltages, a comparison between transmission lines for HVDC at voltages above 600 kV DC and 800 kV AC, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **3(1)**, 368–376 (1988).
- WEIMERS L., *Accurate calculation of ion flow field under HVDC bipolar transmission lines*, ABB Power Technologies, (2006).
- WOODFORD D.A., *HVDC Transmission*, Manitoba HVDC Research Centre, Canada (1998).
- Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre. Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitarias frente a emisiones radioeléctricas, BOE, 2234, 36217-36227 (dissabte 29 de setembre de 2001).
- ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, **74(4)**, 494-522 (1998).