Com apantallar els camps magnètics generats per les línies elèctriques soterrades

Jordi-Roger Riba Ruiz*

Introducció

És coneguda la preocupació que hi ha actualment sobre els possibles efectes nocius dels camps elèctrics i magnètics que generen les línies elèctriques d'alta tensió sobre la salut de les persones que hi estan exposades. Se sospita que és més perillós el camp magnètic que el camp elèctric; en part, perquè el cos humà és pràcticament transparent al camp magnètic. A més, a baixes freqüències és més complicat d'apantallar el camp magnètic que no pas el camp elèctric.

En les societats industrialitzades el consum energètic augmenta cada any i, per tant, tot fa preveure que l'exposició humana als camps elèctrics i magnètics de baixa freqüència (50 Hz) s'incrementarà encara més en un futur immediat.

D'una banda, hi ha estudis mèdics i informes d'agències nacionals i internacionals que conclouen que, mentre no se superin els valors de les intensitats dels camps elèctrics i magnètics imposats per les normatives actuals, no es pot afirmar que aquests camps tinguin efectes adversos sobre la salut (Informe, MSC). En canvi, hi ha altres estudis que troben evidències estadístiques de la relació entre els camps de baixa freqüència i determinats tipus de càncer (Iarc, 2001).

Els camps elèctrics i magnètics generats per les línies elèctriques presenten altres problemes. Sovint provoquen interferències electromagnètiques i altres efectes no desitjats, com ara escalfaments sobre elements metàl·lics o sobre instal·lacions elèctriques situades a prop.

En aquest treball s'estudia com apantallar el camp magnètic generat per una línia soterrada de mitjana tensió que transporta una intensitat de corrent coneguda. En el cas de les línies soterrades el camp elèctric no presenta cap problema ja que normalment porten una coberta metàl·lica que es connecta a terra. Aquesta coberta actua com una gàbia de Faraday, de manera que el camp elèctric a l'exterior de la línia és nul.

La figura 1 mostra l'estructura d'un cable de mitjana tensió.

***Jordi-Roger Riba Ruiz** (Igualada,1966) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona i actualment és professor de l'EUETI d'Igualada i de l'ETSEI (UPC) de Terrassa (jordi@euetti.upc.es).

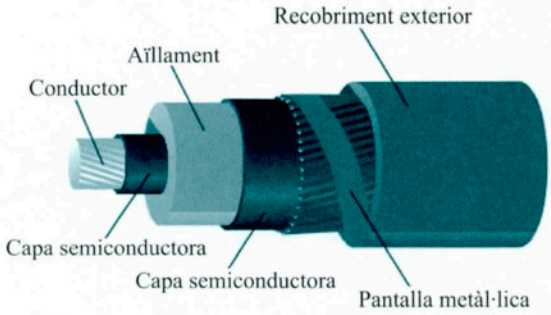

Figura 1: *Conductor soterrat de mitjana tensió*

El sistema d'apantallament utilitzat consisteix en una capa cilíndrica de material ferromagnètic que envolta els tres conductors de línia. És molt important elegir un material ferromagnètic adequat, és a dir, que tingui una permeabilitat relativa com més alta millor per a les intensitats del camp magnètic de treball i al mateix temps que presenti una conductivitat elèctrica elevada. Cal tenir en compte que la permeabilitat magnètica de tot material ferromagnètic no és una constant, sinó que depèn de la intensitat del camp magnètic a què estigui exposat. En general, la permeabilitat decreix molt per a camps molt febles així com per a camps elevats (zona de saturació magnètica).

La línia elèctrica estudiada

La línia soterrada de mitjana tensió que s'estudia té una tensió nominal de 25 kV. Aquesta línia té tres conductors actius que transporten corrents elèctrics d'una intensitat de 100 A cada un, desfasats 120° entre ells. Aquests conductors estan alineats a una fondària aproximada d'1 m per sota del nivell del terreny.

La rasa on es troben els conductors té una amplada aproximada d'uns 70 cm. Els conductors són paral·lels i els eixos dels conductors estan separats uns 10 cm. La figura 2 mostra la disposició dels conductors en el forat.

La pantalla ferromagnètica proposada

La pantalla del camp magnètic proposada té forma de capa cilíndrica i està esquematitzada en la figura 3. Té un radi interior de 30 cm i un gruix e. En les diferents simulacions realitzades s'ha variat el gruix e de la pan-

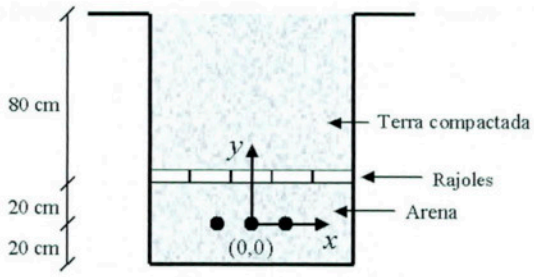

Figura 2: *Situació dels conductors en una línia soterrada*

talla des d'1 mm fins a 5 mm.

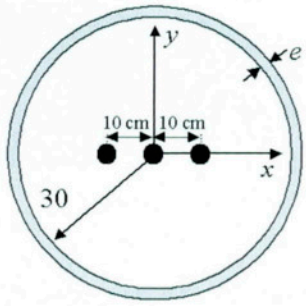

Figura 3: *Pantalla del camp magnètic*

El material elegit per fer la pantalla és el ferro purificat (99,95 %) perquè, a més de presentar una permeabilitat magnètica relativa elevada per a baixes intensitats del camp magnètic (en els càlculs s'ha suposat $\mu_r = 500$), té una conductivitat elèctrica alta i unes pèrdues per histèresi reduïdes.

La taula 1 mostra les propietats elèctriques i magnètiques del ferro purificat (70th Ed., CRC, 1990).

Material	Ferro purificat
Conductivitat elèctrica	$\sigma = 10^7$ S/m
Permeabilitat relativa a 2 mT	$\mu_r = 5.000$
Permeabilitat relativa màxima	$\mu_r = 180.000$
Permeabilitat relativa de càlcul	$\mu_r = 500$
Profunditat de penetració	$\delta = 1{,}01$ mm
Pèrdues per histèresi	30 J/m^3
Densitat	7.880 kg/m^3

Taula 1: *Característiques elèctriques i magnètiques del ferro purificat*

Relació entre la profunditat de penetració i el grau de reducció del camp magnètic

De la llei d'inducció de Faraday es dedueix que en la pantalla s'induirà un sistema de corrents, la resultant del qual és nul·la. Això és degut al fet que també és nul·la la suma dels tres corrents que circulen pels conductors de la línia. A l'interior de la pantalla el camp magnètic generat pels corrents induïts té sentit oposat al camp magnètic generat pels conductors de la línia, de manera que el camp magnètic resultant en aquesta zona té tendència a anul·lar-se. A causa de l'efecte pel·licular [Plonus, 1982), en la regió 2 (vegeu la figura 4) el camp magnètic s'anirà esmorteint. Si la pantalla té un gruix suficient, el camp magnètic resultant serà pràcticament nul en la superfície de separació de les regions 2 i 3 i, per tant, també serà pràcticament nul en la regió 3.

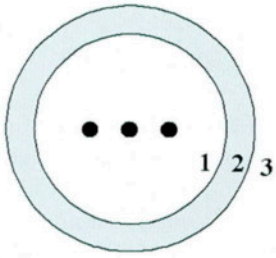

Figura 4: *Regions d'interès per a l'estudi del camp magnètic*

Cal recordar que, a causa de l'efecte pel·licular, un camp magnètic exterior B_o, en penetrar una distància d a l'interior d'un medi conductor, s'esmorteeix segons la relació:

$$B = B_o \cdot e^{-d/\delta},$$

on δ és la profunditat de penetració, la qual es pot calcular a partir de l'expressió següent:

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}.$$

En l'expressió anterior, f és la freqüència de la tensió (50 Hz); μ, la permeabilitat absoluta del material i σ, la seva conductivitat elèctrica.

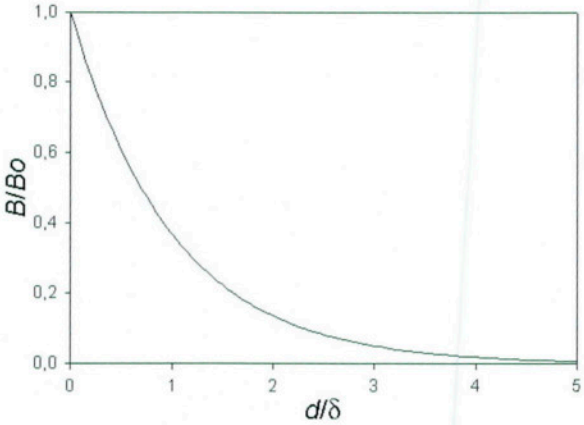

Figura 5: *Esmorteïment del camp magnètic en penetrar en el medi conductor*

Com que el camp magnètic variable amb el temps que penetra a l'interior del material conductor indueix en el seu interior corrents paràsits de Foucault, d'una banda el medi conductor s'escalfarà i, de l'altra, la intensitat

d'aquests corrents també decreixerà com ho fa el camp magnètic, segons la relació $e^{-d/\delta}$.

De l'expressió de la profunditat de penetració es desprèn que, un cop fixada la freqüència, per obtenir un bon apantallament del camp magnètic cal que el producte $\mu \cdot \sigma$ sigui com més elevat millor.

El grau de reducció del camp magnètic a una freqüència donada depèn molt de la profunditat de penetració, que és un dels factors més importants que cal tenir en compte en el disseny d'una pantalla del camp magnètic.

Per tant, per obtenir una bona pantalla del camp magnètic amb un gruix el més prim possible, és necessari utilitzar un material ferromagnètic amb una permeabilitat magnètica el més elevada possible i que a la vegada tingui una conductivitat elèctrica també elevada. Com més prima sigui la pantalla, més econòmica serà i alhora presentarà menys pèrdues energètiques degudes a escalfaments. Com es veurà a continuació, si es pretenen factors de reducció del camp magnètic elevats, cal que el gruix de la pantalla sigui com a mínim tres vegades la profunditat de penetració.

De fet també seria possible utilitzar pantalles de coure o alumini. Aquests materials tenen una conductivitat elèctrica millor que la del ferro purificat, però tenen una permeabilitat relativa unitat. Això fa que, per aconseguir graus de reducció del camp magnètic similars als aconseguits amb una pantalla de ferro purificat, siguin necessaris gruixos de pantalla força superiors quan es treballa a 50 Hz.

Les simulacions

Les simulacions s'han realitzat mitjançant el programa *FEMM* versió 3.2 (Mekker, 2001). S'han creat aproximadament un total de 80.000 nodes i 170.000 elements per cada una de les simulacions.

Per avaluar l'efectivitat de la pantalla en cada punt de l'espai es defineix el factor de reducció del camp magnètic ($FR\%$) com:

$$FR_{\%} = 100 \cdot \frac{B_o - B}{B_o},$$

on B_0 és el camp magnètic en un punt determinat de l'espai quan no hi ha la pantalla ferromagnètica, mentre que B és el camp magnètic en el mateix punt quan hi ha la pantalla. Si, a causa de l'efecte de la pantalla, hi ha reducció del camp magnètic, els valors del factor de reducció seran positius, mentre que si no hi ha cap tipus de reducció el factor de reducció serà nul. En cas que hi hagi un increment del camp magnètic resultaran valors negatius del factor de reducció.

La figura 6 mostra les regions on s'ha calculat el camp magnètic i el factor de reducció degut a la pantalla.

En els càlculs s'ha suposat un terreny pla i de característiques uniformes, amb una resistivitat elèctrica constant de valor 100 $\Omega \cdot$ m.

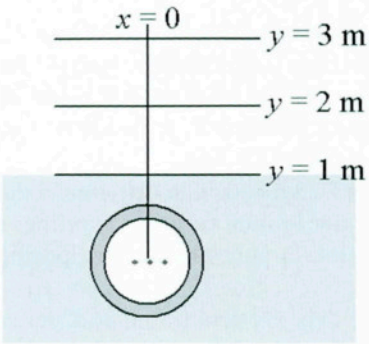

Figura 6: *Eixos de càlcul del camp magnètic*

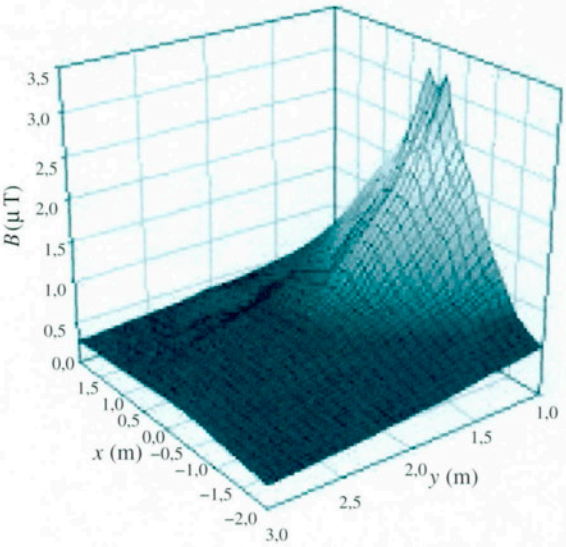

Figura 7: *Camp magnètic generat per la línia*

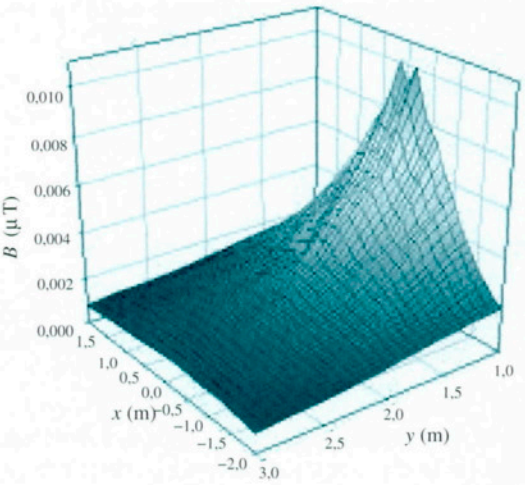

Figura 8: *Camp magnètic amb una pantalla de 5 mm*

Resultats de les simulacions

En totes les simulacions s'ha suposat la pantalla de ferro purificat amb una permeabilitat magnètica relativa $\mu_r = 500$. S'han fet cinc simulacions, cada una tenint en compte un gruix diferent de la pantalla: valors d'1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm i 5 mm.

Les figures 7 i 8 mostren la distribució del camp magnètic generat per la línia estudiada, primer sense pantalla i després amb la pantalla de ferro purificat de 5 mm de gruix.

Observant l'eix vertical (intensitat del camp magnètic) de les figures 7 i 8, es comprova que en les zones on el camp magnètic és més intens, utilitzant una pantalla de 5 mm s'obtenen intensitats del camp magnètic unes 30 vegades inferiors a quan la pantalla no hi és.

La figura 9 mostra les distribucions del factor de reducció del camp magnètic en el pla vertical xy corresponents a les pantalles de gruixos extrems, d'1 mm i 5 mm.

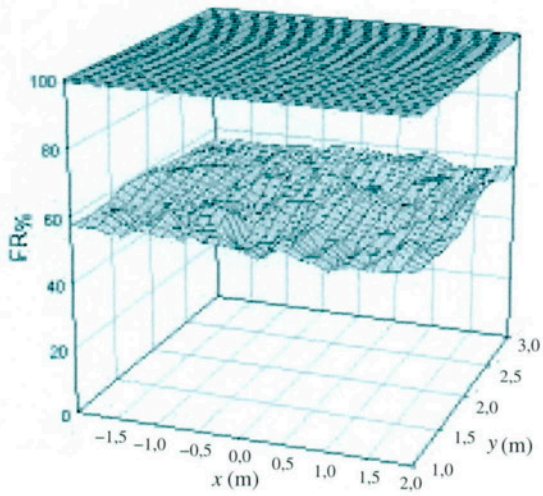

Figura 9: *Factor de reducció del camp magnètic per als gruixos extrems*

Les figures 10 i 11 mostren, respectivament, l'atenuació del camp magnètic a una altura d'1 m sobre el nivell del terreny i en la vertical de $x = 0$ m (des de la superfície del terreny, $y = 1$ m, fins a 2 m més amunt, $y = 3$ m).

Dels resultats anteriors es desprèn que, tenint en compte la configuració estudiada, per obtenir un factor de reducció del camp magnètic superior al 90 % es necessita un gruix de material de com a mínim 3 mm.

Pèrdues de potència en la pantalla

Com que la pantalla és bona conductora de l'electricitat, en la línia hi haurà unes pèrdues de potència degudes a un escalfament no desitjat de la pantalla a causa dels corrents paràsits induïts i del fenomen de la histèresi magnètica.

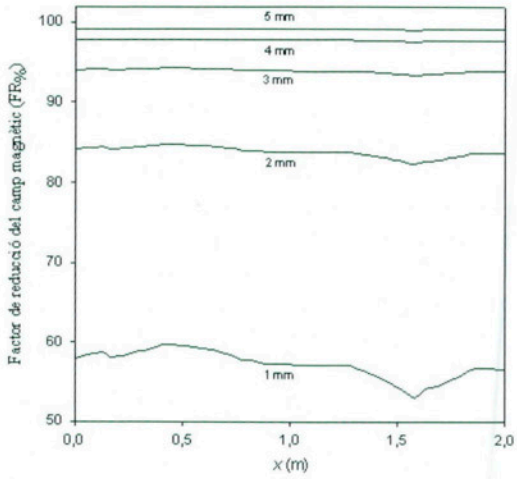

Figura 10: *Factor de reducció del camp magnètic a 1 m sobre el terreny*

Les pèrdues resistives degudes als corrents paràsits, les calcula directament el programa de simulació.

Las pèrdues per histèresi es calcularan de manera aproximada. Suposant que el material ferromagnètic no està saturat (hipòtesi certa a causa de les baixes intensitats del camp magnètic amb què es treballa), es poden estimar les pèrdues per histèresi a partir de les expressions següents:

$$P_{Hist.}(W/m^3) = f \cdot \int H \cdot dB \approx 2 \cdot f \cdot \hat{B} \cdot H = \frac{2 \cdot f \cdot \hat{B}^2}{\mu_0 \mu_r}$$

$$P_{Hist.}(W/m) \approx \frac{2 \cdot f \cdot \hat{B}^2}{\mu_0 \mu_r} \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) =$$

$$= \frac{2 \cdot 50 B^2}{2\pi 10^{-4}} \cdot \pi (r_2^2 - 0,30^2) = 5 \cdot 10^5 B^2 \cdot (r_2^2 - 0,09),$$

on $\hat{B}$ és el valor mitjà del camp magnètic màxim a l'interior de la pantalla.

La taula 2 mostra les pèrdues resistives, les pèrdues per histèresi i les pèrdues totals en les diferents pantalles estudiades en funció del gruix de la pantalla.

Gruix pantalla	P. resistives (10^{-2} W/m)	P. histèresi (10^{-4} W/m)	P. totals (10^{-2} W/m)
1 mm	4,4	8,2	5,2
2 mm	4,4	7,0	5,1
3 mm	4,4	5,0	4,9
4 mm	4,4	3,6	4,8
5 mm	4,4	2,8	4,7

Taula 2: *Pèrdues de potència en les pantalles cilíndriques*

De la taula s'observa que, en les pantalles utilitzades, les pèrdues resistives degudes als corrents paràsits són molt més importants que les pèrdues degudes al fenomen de la histèresi.

A continuació es calcula la quantitat de matèria primera que necessiten aquestes pantalles:

$$V = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot L = \pi \cdot (r_2^2 - 0,30^2) \cdot L \ \mathrm{m}^3,$$

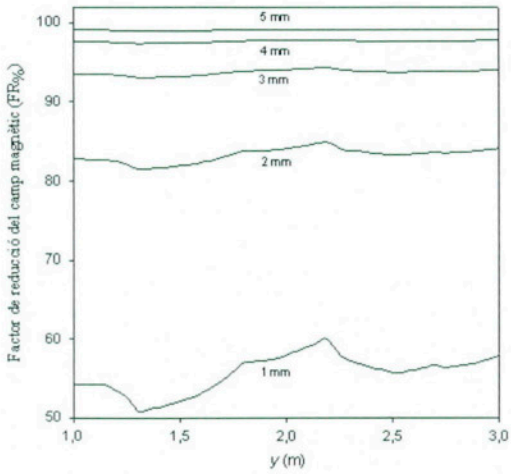

Figura 11: *Factor de reducció del camp magnètic en la vertical del conductor central*

on L és la longitud de la pantalla.

Com que la densitat del ferro és $d = 7.880$ kg/m^3, de l'expressió anterior resulta:

$$m = d \cdot V = 7880 \cdot \pi \cdot (r_2^2 - 0,30^2) \cdot L \text{ kg.}$$

En la taula 3 es mostra la massa de cada metre de pantalla en funció del gruix.

Gruix e	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
Pes per metre de de pantalla (kg/m)	14,88	29,81	44,78	59,81	74,89

Taula 3: *Material necessari per a la construcció d'1 m de pantalla*

Normativa vigent

La normativa vigent a Espanya referent als valors límit dels camps magnètics es troba al RD 1066/2001, de 28 de setembre, que dóna uns valors límit dels camps elèctric i magnètic des de 0 fins a 300 GHz. Per a una freqüència de 50 Hz limita el valor del camp magnètic a 100 μT. Els valors límit del RD 1066/2001 són una adaptació de la Recomanació del Consell Europeu. Pel que fa als organismes internacionals, l'ICNIRP (*International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection*) suggereix a una freqüència de 50 Hz el mateix valor límit del camp magnètic que les referències anteriors. Cap de les normatives esmentades posa restriccions per a les distàncies de seguretat d'exposició de les persones a les línies de mitjana i alta tensió.

Conclusions

A partir de les dades obtingudes en aquest estudi es pot arribar a les conclusions següents:

• Els camps magnètics que generen les línies elèctriques soterrades en punts pròxims tenen valors que estan molt per sota dels límits que proposen les normatives. En la vertical dels conductors de la línia estudiada és on el camp magnètic té una intensitat més gran.

• En situacions en les quals és molt difícil obtenir expressions matemàtiques analítiques per calcular els valors del camp magnètic, el mètode dels elements finits permet simular amb un bon grau d'aproximació els valors d'aquest camp així com calcular les pèrdues energètiques en la pantalla. Aquest mètode possibilita el càlcul de pantalles amb geometries més complexes que l'estudiada. Quan es treballa amb el mètode dels elements finits és aconsellable disposar d'algun mètode per validar els resultats obtinguts.

• Amb la geometria i el material de pantalla proposats s'ha comprovat que per a gruixos d'aproximadament tres vegades la profunditat de penetració (3 mm per al cas estudiat), el factor de reducció del camp magnètic en les zones estudiades (les que poden afectar les persones) és superior al 90 %.

• En cas d'utilitzar una pantalla de radi lleugerament inferior, però amb el mateix gruix, s'obtindria el mateix grau d'apantallament. D'aquesta manera es pot reduir el pes de ferro necessari a costa d'augmentar lleugerament les pèrdues de potència en la pantalla.

• Les pèrdues de potència totals en les pantalles ferromagnètiques estudiades són de l'ordre de 5 W per cada 100 m de línia apantallada. Per tant, són pèrdues moderades. Aquest sistema pot ser viable per a trams de línia relativament curts (proximitat de la línia soterrada a zones habitades, encreuaments amb zones per on puguin circular persones, etc.).

• Per obtenir factors de reducció del camp magnètic elevats no és estrictament necessari que les pantalles siguin de material ferromagnètic; cal que el gruix de la pantalla sigui unes tres vegades la profunditat de penetració.

Bibliografia

Campos electromagnéticos y salud pública. Informe técnico elaborado por el comité de expertos. Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral. Dirección General de Salud Pública y Consumo. Ministerio de Sanidad y Consumo.

IARC. IARC finds limited evidence that residential magnetic fields increase risk of childhood leukaemia [en línia]. <http://www.iarc.fr>. [Consulta: juny de 2001]. *Handbook of Chemistry and Physics, 70th.* Ed. CRC Press, pàg. E-128, 1989-90.

PLONUS, M. A., *Electromagnetismo aplicado*, Ed. Reverté, 1982. Traducció de l'obra original *Applied Electromagnetics* de l'editorial Mc Graw Hill.

MEKKER, D., *Finite Element Method Magnetics (FEMM 3.2). User's Manual*, [en línia]. < http://members.aol.com/dcm3c.>. [Consulta: 25 d'octubre de 2001].