



# **RECOMENDACIONES SOBRE LA PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS**

**Vidal Ortega**

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN  
APROXIMACIÓN A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS  
VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO EN UN CONDUCTOR  
EL EFECTO PIEL APLICADO AL CABLE DE TIERRA  
CONCLUSIONES  
ANEXO

## INTRODUCCIÓN

Con la introducción de la electrónica como parte fundamental de los equipos, y teniendo en cuenta los fenómenos transitorios que aparecen en las subestaciones, y en general en los ambientes industriales, hay que dar la importancia que realmente tiene a las tomas de tierra de esos equipos, dado que como se va a demostrar mas adelante, las frecuencias que existen en estos ambientes pueden llegar a valores muy elevados y ser, por tanto, muy perjudiciales para los equipos electrónicos - digitales que puedan estar instalados en esos entornos.

## APROXIMACIÓN A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

En primer lugar, haremos algunas consideraciones en relación con los campos eléctricos y magnéticos, para así comprender mejor como se genera el Efecto Piel.

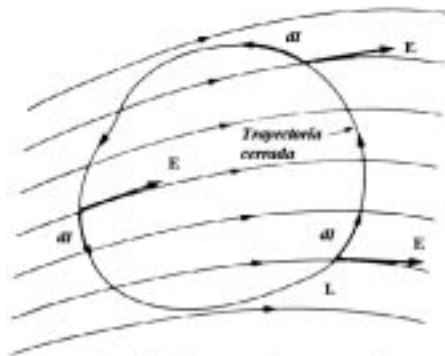


Fig. 1 Fuerza electromotriz

La fuerza electromotriz (fem), o circulación de un campo eléctrico es:

$$\int_L E \times dl = RI \quad (\text{eq. 1})$$

en donde L es el camino a lo largo del conductor y R es la resistencia eléctrica entre los puntos del conductor unidos por el camino L. Por tanto, la fuerza electromotriz aplicada a una trayectoria es igual al trabajo hecho al mover una unidad de carga a lo largo de la trayectoria L.

La circulación de un campo magnético a lo largo de una línea cerrada que enlaza una corriente  $I$  viene dada por la ecuación:

$$\oint B \times dl = \mu \oint H \times dl = \mu I \quad (\text{eq. 2})$$

siendo  $B = \mu H$ , y  $\mu$  la permeabilidad magnética del material.

Un ejemplo practico de esta ecuación es el cálculo del campo magnético producido por una corriente que pasa a lo largo de un cilindro recto de longitud infinita.

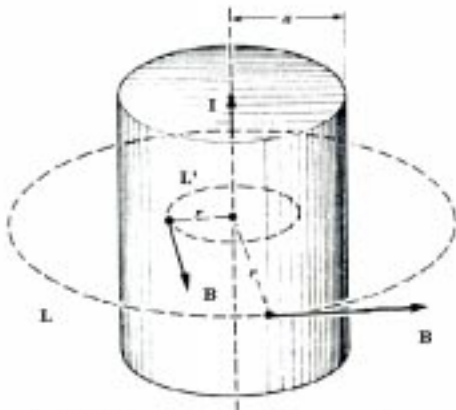


Fig. 2 Campo magnético creado en un conductor cilíndrico

La simetría de este caso induce a decir que las líneas de fuerza del campo magnético son circunferencias con sus centros situados en el eje del conductor, y que el módulo  $B$  del campo magnético en un punto depende solamente de la distancia al eje. Si tomamos una circunferencia de perímetro  $L$  tendríamos:

$$\oint B dl = BL = 2\pi r B$$

si el  $r$  es mayor que el radio del cilindro, la  $L$  queda en la parte interior de la circunferencia, y por lo tanto tendremos:

$$2\pi r B = \mu I \quad \text{ó} \quad B = \mu I / 2\pi r$$

Por lo tanto, para puntos fuera de una corriente cilíndrica, el campo magnético es el mismo que si la corriente estuviera a lo largo del eje.

Ahora bien, si el  $r$  es menor que el radio "a" del cilindro y suponemos que la corriente fluye de forma uniforme en toda la sección transversal del conductor, la corriente que comprende un circunferencia  $L'$  de radio  $r$  inferior a "a" será:

$$I' = \frac{I}{\pi a^2} \times \pi r^2 = \frac{I r^2}{a^2}$$

y por tanto, obtendremos que el campo magnético viene dado por:

$$B = \frac{\mu I r}{2\pi r a^2}$$

es decir, el campo magnético en un punto interior de un cilindro que transporta una corriente uniformemente distribuida a través de su sección transversal es proporcional a la distancia del punto al eje del cilindro.

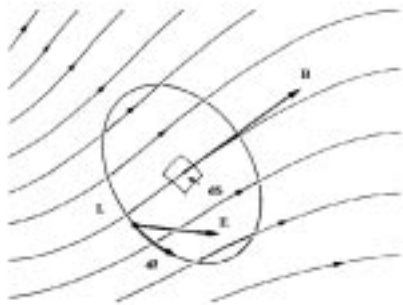


Fig. 3 Relación campo magnético-eléctrico

Ahora bien, hasta ahora lo que hemos visto nos permite conocer el campo magnético B y eléctrico E si se conocen las cargas y las corrientes, de este modo parece como si ambos fuesen independientes entre sí, sin embargo esto no es cierto ya que si tenemos en cuenta su variación con el tiempo existe una interrelación entre ambas, es decir que un campo magnético variable exige la presencia de un campo eléctrico y viceversa.

La Ley de Faraday - Henry de la inducción magnética dice que en un campo magnético variable se induce una fuerza electromotriz en cualquier circuito cerrado, la cual es igual a menos la derivada con respecto al tiempo del flujo magnético a través del circuito.

Si se coloca un conductor en forma de circuito dentro de una región en la que hay un campo magnético, se observa una corriente en el mismo mientras el flujo está variando, esta presencia de corriente eléctrica indica la existencia o inducción de una fuerza electromotriz actuando sobre el circuito, midiendo esta fuerza se encuentra que depende de la velocidad de la variación de ese flujo magnético. Cuando el flujo magnético aumenta la fuerza electromotriz inducida actúa en sentido contrario.

$$\oint_L E dl = - \frac{d}{dt} \int_S B ds = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{eq. 3})$$

## VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO EN UN CONDUCTOR

En el ejemplo de la [figura 2](#) se ha considerado que el campo magnético dentro de un conductor es uniforme a lo largo de la sección transversal del mismo, ahora bien esto no es así, ya que la

fuerza electromotriz inducida tiende a oponerse al flujo magnético, y esto es lo que vamos a demostrar. Para ello vamos a considerar un plano semi infinito, tal como se representa en la Fig. 4, en el cual supongamos que la parte derecha de AB es conductora y la izquierda es espacio libre, además supongamos que en el lado izquierdo existe un campo eléctrico que fluye con una frecuencia  $f=\omega/2\pi$ , y de forma que produce un campo magnético  $\mathbf{B}$  en esa región que es paralelo al plano, presumiblemente ese campo se extenderá dentro del conductor, induciendo una fem que originará una corriente eléctrica, cuya densidad designamos como  $\mathbf{J}$ .

De acuerdo con la Ley de Faraday-Henry el campo magnético variable induce un corriente en sentido antihorario alrededor de un campo magnético creciente, y esta corriente inducida es perpendicular al campo magnético y por lo tanto al plano.

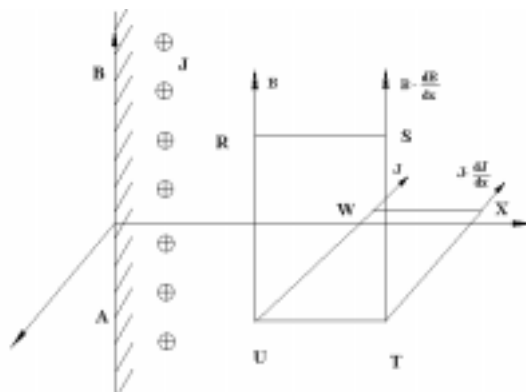


Fig. 4 Flujo y corriente inducida en conductor semi-infinito

Si consideramos una porción del semiplano RSTU en donde  $RS=TU=\Delta x$  y  $UR=TS=l$ , la integral de  $\mathbf{B}$  al rededor del camino RSTU será:

$$\oint_{RSTU} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu\mu_0 I$$

$$\oint_{RSTU} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \int_{RS} + \int_{ST} + \int_{TU} + \int_{UR}$$

$$\text{como } \int_{RS} = \int_{TU} = 0 \text{ y } l = \mathbf{J} \Delta x$$

$$\left( Bl - \left( Bl + \frac{dB}{dx} \Delta x l \right) \right) \frac{1}{\mu_r \mu_0} = J l \Delta x$$

$$\frac{dB}{dx} = -J \mu_r \mu_0 \quad (\text{eq. 4})$$

Si consideramos ahora un circuito WXTU perpendicular al anterior y aplicando al mismo la ecuación de la ley de Faraday, en donde  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico:

$$\int_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{eq. 5})$$

Como el flujo magnético  $\Phi$  varía con la misma frecuencia que  $B$ :

$$\frac{d\Phi}{dt} = \omega\Phi \quad (\text{eq. 6})$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones 2 y 3 y teniendo en cuenta que  $E=rJ$ , donde  $r$  es la resistividad del material se puede desarrollar que:

$$\int_{wx} + \int_{xt} + \int_{tu} + \int_{uw} = -\omega\Phi = -\omega Bl\Delta x$$

como

$$\int_{wx} = \int_{tu} = 0$$

queda

$$-\rho J l + \left(J + \frac{dJ}{dx} \Delta x\right) l = -\omega Bl\Delta x$$

$$\rho \frac{dJ}{dx} = -\omega B \quad (\text{eq. 7})$$

teniendo en cuenta las ecuaciones 4 y 7 obtenemos una ecuación diferencial de la densidad de corriente:

$$\frac{\rho d^2 J}{\omega dx^2} = -\mu_r \mu_o \frac{dJ}{dx}$$

$$\frac{d^2 J}{dx^2} + \frac{dJ}{dx} \frac{\mu_r \mu_o \omega}{\rho} = 0 \quad (\text{eq. 8})$$

Si sobre esta ecuación hacemos la siguiente substitución:

$$\left(\frac{\rho}{\mu_r \mu_o \omega}\right)^{1/2} = d \quad (\text{eq. 9})$$

Queda la ecuación de la forma:

$$\frac{d^2 J}{dx^2} + \frac{J}{d^2} = 0$$

Si se resuelve esta ecuación nos quedaría una expresión en la cual  $J$  varía exponencialmente de la siguiente forma:

$$J = J_o \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{2}d}\right) \quad (\text{eq. 10})$$

siendo  $J_o$  la densidad de corriente en la superficie del conductor, por lo tanto se demuestra que la densidad de corriente decrece exponencialmente según aumenta  $x$ , es decir la profundidad dentro del conductor.

## EL EFECTO PIEL APLICADO AL CABLE DE TIERRA

Vamos a llevar la demostración anterior a un caso concreto, como es el de los cables utilizados en el cableado de celdas y cabinas.

Como se ha podido observar la distribución uniforme de la corriente en la sección del conductor solamente se presenta con corriente continua. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente, se hace más pronunciada la diferencia entre las densidades de corriente de las distintas zonas de la sección transversal de un conductor. Este fenómeno se denomina **Efecto Piel**, siendo el causante de pérdidas en los cables y de serios problemas en ciertas circunstancias.

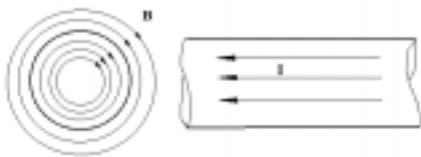


Fig. 5 Circulación de intensidad por un conductor a baja frecuencia.

En la figura 5 se representa la distribución de la corriente a bajas frecuencias y del flujo magnético  $B$  generado como consecuencia de esa intensidad. Con frecuencias bajas el efecto piel es prácticamente despreciable, excepto para conductores largos, como pudieran ser líneas de potencia de gran longitud.

Cuando la corriente cambia de forma rápida, como es el caso de las corrientes que tienen que circular por un cable de tierra, a una frecuencia alta, el flujo  $B$  dentro y fuera del conductor cambia también rápidamente, generando unas corrientes de Eddy, o lazo de tensión, que son las representadas en la figura 6. Cuanto más cerca se esté del centro del conductor existirán más líneas de flujo magnético que encierran esa porción del conductor, por lo tanto en la parte central del conductor se inducirá una mayor fuerza electromotriz que en la parte superficial del conductor, en el cual será prácticamente nulo.



Fig. 6 Circulación de intensidad por un conductor a alta frecuencia

Esta fuerza electromotriz inducida se opone al cambio de corriente producido, por lo tanto la tensión producida sobre las partes internas causa una mayor densidad de corriente en las partes cercanas a la superficie.

De lo expuesto anteriormente se deduce que para altas frecuencias, la densidad de corriente en un conductor es mayor en la superficie y esta densidad va disminuyendo según se va acercando al centro, en donde es nula. Esta variación es exponencial como ya se vio en la ecuación 10, la representación gráfica de la misma se refleja en la figura 7. Por tanto, la porción del conductor que realmente transmite la intensidad es reducido. Una aproximación es considerar una distribución de la densidad de corriente concentrada prácticamente en la superficie.

La penetración o parte del conductor que se considera activo para altas frecuencias viene dado por la ecuación, obtenida partiendo de las ecuaciones 9 y 10:

$$X_s = [2/w\sigma\mu]^{1/2} = [\rho/\pi f\mu]^{1/2}$$

$$X_s = \left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2} \frac{10^3 \times \sqrt{10}}{2\pi} \text{ metros}$$

siendo

$$\rho = 1/\sigma \quad \omega = 2\pi f \quad \mu = \mu_0\mu_r = 4\pi \times 10^{-7}$$

Si aplicamos estas ecuaciones a un caso práctico veremos claramente las diferencias en la utilización de un tipo de cable a otro.

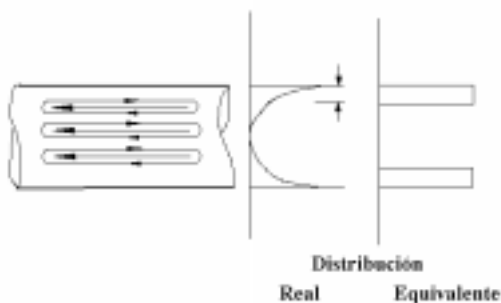


Fig. 7 Distribución de la corriente en un conductor para alta frecuencia

Para ello consideremos la resistividad del cobre para una temperatura de 25° que es la siguiente:

$$\rho = 2,3 \times 10^{-8} \Omega$$



Consideremos un cable unifilar de  $2,5\text{mm}^2$  de sección para frecuencias de 1, 10 y 100MHz, obteniéndose los resultados que se indican en la tabla 1, para la penetración y sección útil.

Tabla 1

Frecuencia Aplicada	Cable unifilar $2,5\text{mm}^2$	
	Penetración	Sección útil
1MHz	0,076mm	$0,409\text{mm}^2$
10MHz	0,024mm	$0,132\text{mm}^2$
100MHz	0,0076mm	$0,042\text{mm}^2$

Ahora si realizamos el cálculo para un cable multifilar de 12 hilos y sección total igual al caso anterior, se obtienen los valores reflejados en la tabla 2, suponiendo que los hilos están totalmente separados.

Tabla 2

Frecuencia Aplicada	Cable multif.(12) $2,5\text{mm}^2$	
	Penetración	Sección útil
1MHz	0,076mm	$1,232\text{mm}^2$
10MHz	0,024mm	$0,434\text{mm}^2$
100MHz	0,0076mm	$0,142\text{mm}^2$

Aunque los cálculos de esta tabla 2 no son totalmente correctos, dado que los hilos están agrupados, y se podría de alguna forma asimilar al cable unifilar, si se puede decir que la sección útil mejora considerablemente.

Si comparamos dos cables de igual sección ( $10\text{mm}^2$ ) uno de sección circular y otro rectangular (1x10), se puede observar que la sección útil del cable de sección rectangular es mayor para una frecuencia de 100MHz, como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3

Sección útil	
Sección circular	Secc. cuadrangular
0,0853mm <sup>2</sup>	0.1526mm <sup>2</sup>

Con lo que se demuestra que es mas eficaz una sección rectangular.

Por lo tanto si quisiéramos tener una sección útil suficientemente buena para frecuencias altas se debería ir a un tipo de hilo trenzado de 10mm<sup>2</sup>, con sección rectangular y formado por unos 575 hilos, con lo cual nos estamos acogiendo a los dos ventajas indicadas anteriormente, como son el tipo de sección y el n° de hilos que la forman.

## CONCLUSIONES

En las puestas a tierra lo que se trata siempre es de establecer un camino de descarga con la menor resistencia posible para evitar que las intensidades de descargas circulen por otros caminos que puedan afectar al normal funcionamiento de los equipos, evitando de esta forma la circulación de intensidades originadas por perturbaciones externas dentro del equipo.

Por lo cual se aconseja la utilización de cable multifilar trenzado , dado que de esta forma la sección útil es mucho mayor consiguiendo una menor resistencia en el camino.

En un principio las perturbaciones que se tenían en cuenta para el diseño de un equipo eran de 10KHz o 1Mhz dado que los componentes utilizados eran básicamente electromecánicos, al considerar equipos electrónicos hay que tener en cuenta que las frecuencias originadas por las ondas electromagnéticas en el campo de los relés de protección pueden llegar a ser de hasta 1000MHz.

## ANEXO

En los equipos diseñados y fabricados por ZIV la puesta a tierra de los mismos se realiza, por una parte poniendo a tierra la caja o chasis del equipo, y por otra parte la electrónica interna del equipo, estando ambas separadas, por lo que la unión hay que realizarla externamente entre la toma de tierra de la caja (tornillo señalado con el símbolo de tierra) y la borna correspondiente a la electrónica interna, que se representa en los esquemas de conexiones externas de cada equipo. El motivo de que ambos estén separados, y por tanto que haya que realizar la unión externamente, es para evitar que cuando se realiza la prueba de aislamiento entre grupos y tierra se aplique la misma directamente a los condensadores de desacoplo C1 y C2 correspondientes a la entrada de tensión auxiliar, como se representa en la figura 8, así como otros que puedan existir.

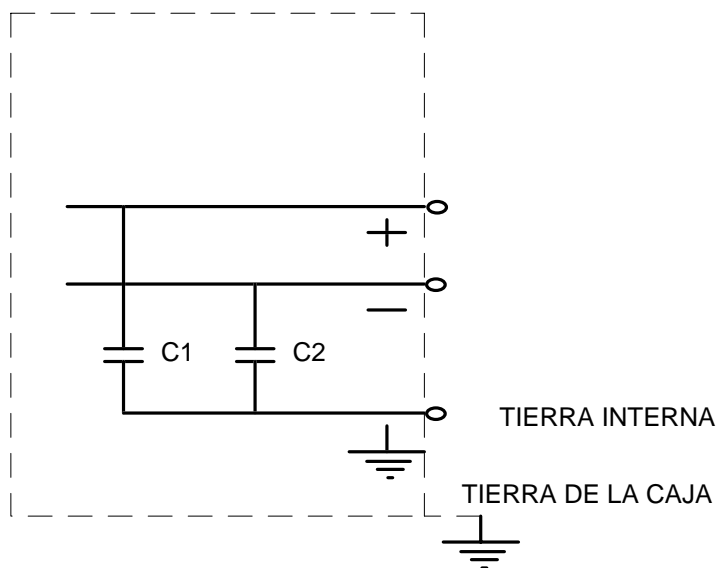


Fig. 8 Puesta a tierra de equipos

A modo de ejemplo, en el reverso de esta página se representa un esquema de conexiones de una terminal de protección para líneas de MT (Mod. 3IRD-A, Funciones: 3×50/51, 50N/51N, 79, etc.), con una configuración de entradas y salidas digitales realizada por una compañía eléctrica para una aplicación específica, en donde quedan representadas las bornas concretas que corresponden a la conexión que ha de realizarse a tierra.

