

# Las trenzas de cobre y la CEM

Artículo cedido por Cemdal



www.cemdal.com



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Systeme (AMS AG) para España y Portugal.  
www.cemdal.com  
fdaura@cemdal.com

Cuando en el diseño y construcción de máquinas, de instalaciones industriales en general o de armarios industriales, necesitamos asegurar la equipotencialidad entre diversos puntos de tierras, estructuras y chasis para evitar problemas debidos a excesivas diferencias de potencial. Estas diferencias de potencial pueden provocar problemas de interferencias electromagnéticas (EMI). En todo equipo electrónico conectado a la red eléctrica es conveniente tener una buena arquitectura de masas y tierras para evitar problemas de seguridad y de compatibilidad electromagnética (CEM). Las tierras y masas deben tener una baja impedancia en toda la gama de frecuencias de las corrientes circulantes para asegurar una buena equipotencialidad en todos sus puntos.

Para asegurar la equipotencialidad se usan trenzas flexibles de cobre entre los puntos que se desea tener una baja diferencia de potencial. En inglés se llaman "straps". También se usan barras rígidas de cobre (llamadas pletinas) cuando no hay movimiento entre los puntos del chasis o de la estructura de la máquina que se deben unir eléctricamente. Ambos tipos de uniones eléctricas se fabrican con muy diversas medidas de longitud, anchura y espesor. En cuanto a los materiales, las barras rígidas se fabri-

can en cobre, aluminio o acero. Las trenzas flexibles se ofrecen en cobre, cobre estañado, cobre niquelado o cobre plateado.

Como ejemplo muy común, vamos a analizar la aplicación usual de las trenzas flexibles de cobre en los armarios industriales para conectar eléctricamente la puerta y el cuerpo del armario. Al estar el cuerpo obligatoriamente conectado a la tierra de seguridad, la puerta también queda conectada a tierra. En armarios industriales de cuadros de maniobras es muy usual ver la conexión eléctrica entre la puerta y el cuerpo del armario con un simple cable típico de conexión de tierra, con una sección de 2,5 a 10 mm<sup>2</sup>. Desde el punto de vista de la CEM, la conexión realizada con un cable es incorrecta debido a su mayor inductancia, en comparación a una trenza flexible de cobre (figura 1). Ello implica tener una mayor impedancia y, en consecuencia una mayor caída de tensión si circulan corrientes indeseadas de alta frecuencia. El cable puede ser útil a baja frecuencia como conexión de tierra de seguridad de la puerta, al no poder confiar en el buen contacto eléctrico de las bisagras. A nivel industrial, cuando se deben usar equipos electrónicos como inversores de frecuencia para el control de velocidad de motores, autómatas programables (PLC) o cualquier equipo

electrónico digital, es conveniente usar trenzas en la conexión entre puerta y armario. En estos casos nunca se deben usar armarios de cuadros de maniobra de plástico. Siempre deben usarse armarios de hierro galvanizado o mejor de acero inoxidable. Los fabricantes de armarios ofrecen "armarios de CEM" en los que facilitan una buena unión eléctrica entre puerta y armario.

Vamos a realizar unos cálculos numéricos a efectos comparativos entre el cable y la trenza. Los valores calculados en base a las fórmulas básicas presentadas, proporcionan valores numéricos que ayudan a entender el problema, pero cuyas magnitudes reales pueden estar muy lejos en otra aplicación real de las trenzas, dependiendo de las circunstancias reales. Hay el riesgo de tomar los resultados como buenos y aplicarlos en circunstancias reales muy distintas de las que aquí se van exponer con sus limitaciones. Estas fórmulas sirven de guía para la comparación propuesta aquí como ejemplo, con las limitaciones expuestas. En una instalación industrial compleja en la que suceden fenómenos muy complejos, sólo una campaña sistemática de medidas en una gran cantidad de situaciones, es lo que puede dar el abanico de valores probables a tener en cuenta en un diseño, junto con unas recomendaciones genéricas de buenas prácticas.

## La impedancia

El comportamiento de cualquier conductor usado en las conexiones de equipotencialidad y de puesta a tierra de seguridad de los chasis de los equipos o máquinas debe ser conocido en todo el margen de frecuencias. Cada conductor de un sistema de conexión a tierra, ya sea para la puesta a tierra de la alimentación (red eléctrica), para la conexión a tierra o masa de las señales o para la protección contra rayos en las instalaciones, tiene propiedades intrínsecas de resistencia e inductancia.

En general se tiende a pensar que el conductor de conexión de equipotencialidad es más eficiente simple-

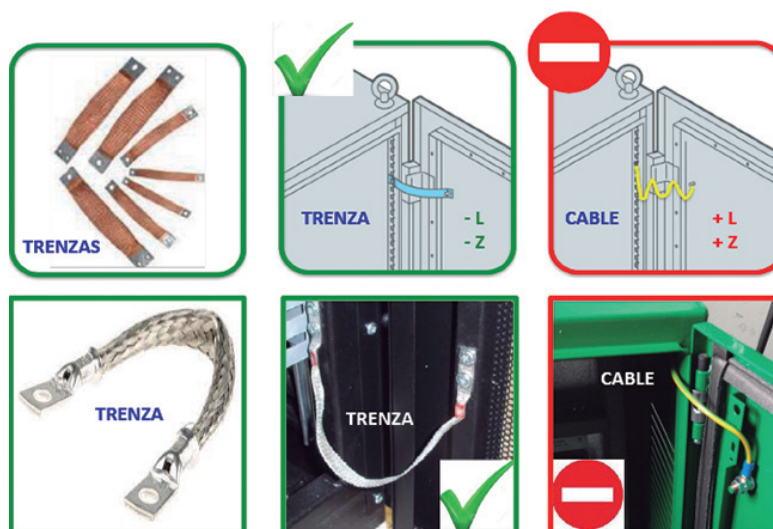


Figura 1. Conexión de la puerta y el cuerpo de un armario industrial a alta frecuencia. La trenza tiene menor inductancia (L) que el cable y por ello, tiene menor impedancia (Z).

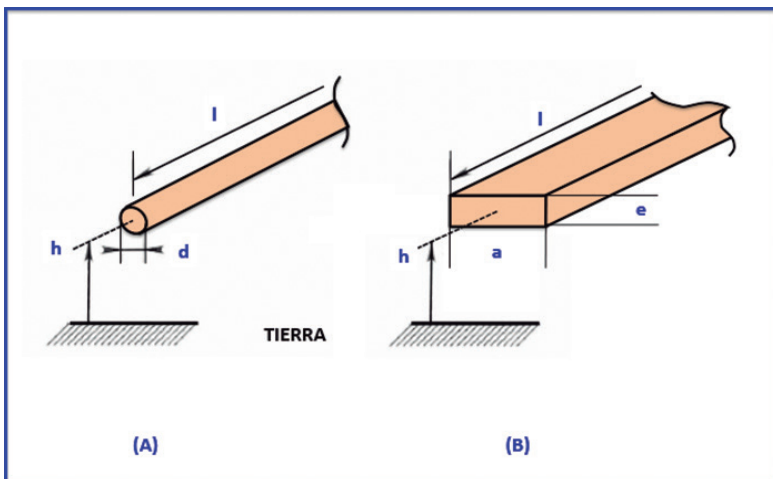


Figura 2. (A): cable redondo sobre el plano de masa o tierra. (B): trenza sobre el plano de masa o tierra

mente cuanto mayor es su sección transversal al paso de la corriente. Esto es cierto en corriente continua (CC) y para muy bajas frecuencias (50 Hz y armónicos). Pero no lo es conforme la frecuencia de la corriente alterna (CA) aumenta o cuando, en las señales digitales, el tiempo de subida de la corriente es más corto, aumentando así su ancho de banda y frecuencia.

En la evaluación de la CEM de un producto, máquina o instalación es conveniente considerar la impedancia de sus conductores, especialmente cuando alguno de los conductores críticos se utiliza para hacer una conexión a tierra o masa. Los conductores presentan una impedancia intrínseca (interna) compuesta por su resistencia en corriente continua (CC), su resistencia en corriente alterna (CA) debida a la concentración de corriente cerca de la periferia exterior del conductor (efecto pelicular) y su inductancia interna debido al flujo magnético interno. Además, los conductores presentan una inductancia externa debida al flujo magnético externo. Esta inductancia externa, también tiene el nombre de auto-inductancia o inductancia parcial y, cuando no es intencional, se llama también inductancia parásita.

Vamos a comparar la impedancia del cable redondo y la impedancia de la trenza de cobre para conectar la puerta al cuerpo de un armario. En esta comparación, vamos a despreciar las capacidades parásitas, por ser pequeñas y similares en ambos casos. Así, despreciaremos el valor

de la pequeña capacidad debida a la disposición del cable con respecto a la puerta y el armario. Asumiendo la condición:

$$\text{longitud del conductor} \ll \text{longitud de onda de las corrientes}$$

Con esta condición, la impedancia Z se puede calcular usando los parámetros concentrados del conductor.  $\lambda = c/f$ , es la longitud de onda de la mayor frecuencia de la corriente que circula por el conductor (cable o trenza). La impedancia del conductor es:

$$Z = R_{(CA \text{ o } CC)} + j\omega (L_{EXT} + L_{INT}) \text{ en } \Omega$$

$R_{(CA \text{ o } CC)}$  es la resistencia en CA o CC,  $\omega = 2\pi f$ ,  $(L_{INT} + L_{EXT})$  es la inductancia externa más la interna. Veremos luego en detalle como se calcula cada uno de los elementos en el cable y en la trenza.

Para poder comparar los parámetros de los dos tipos de conductor en una situación similar, la figura 2 muestra la disposición de los dos conductores con respecto al plano de tierra. Es una disposición que se puede asemejar idealmente a la conexión de los dos conductores entre la puerta y el cuerpo del armario, cuando la puerta está abierta.

La figura 3 muestra la fotografía de una trenza conectada entre la puerta y el cuerpo del armario con dos buenas conexiones en los dos extremos usando tornillos de acero inoxidable. Cuando la puerta se cierra, el conductor se separa del armario y su forma se puede asemejar a

una "U". La figura 4 muestra la "U" con las medidas correspondientes. Los valores de la auto-inductancia serán más altos en comparación a una trenza recta.

### Inductancia interna

La inductancia interna  $L_{INT}$  está causada por el campo magnético en el interior del conductor. Al tener una importancia secundaria, usualmente se desprecia en los cálculos de la impedancia del conductor. Cuando la frecuencia aumenta, la inductancia interna disminuye ya que los campos se concentran hacia la superficie (efecto pelicular). Esta redistribución de los campos y la corriente cambia la inductancia interna y la resistencia. Así, la inductancia interna es una función de la frecuencia. El valor de la inductancia interna en corriente continua para un conductor de sección circular viene dado por:

$$L_{INT} = \mu_0 / 8 \pi = 5 \text{ nH/cm}$$

para  $r \ll \sigma$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío, igual a  $4\pi \times 10^{-7}$ , l es la lon-



Figura 3. Trenza flexible de cobre de conexión entre la puerta y el armario. Forma una "U" al cerrar la puerta

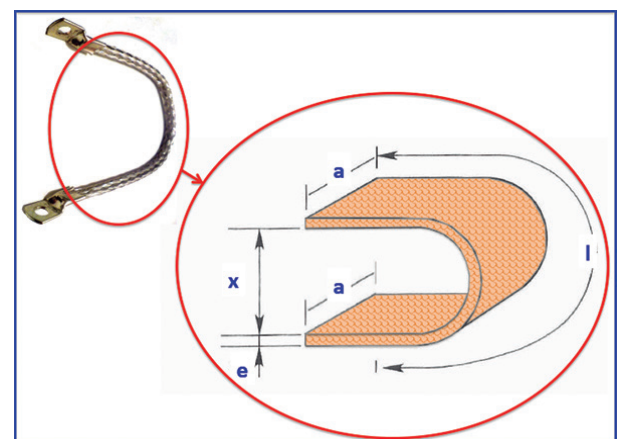


Figura 4. Medidas de la forma en "U" de la trenza al cerrar la puerta.

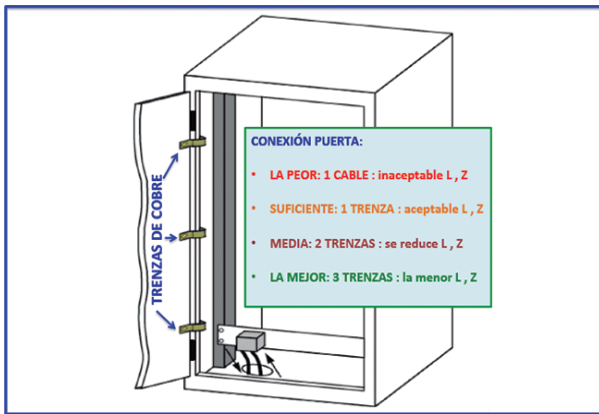


Figura 5. Niveles de conexión de la puerta a un armario industrial metálico con trenzas de cobre: 1, 2 o 3 trenzas. Las trenzas en paralelo reducen la inductancia de la conexión de la puerta, contribuyendo a la reducción de la impedancia. No usar cables. L: inductancia y Z: impedancia.

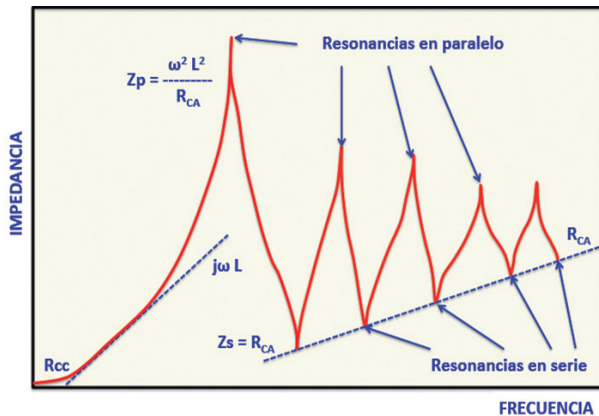


Figura 6. Comportamiento frecuencial de la impedancia de un cable (escalas logarítmicas). Zp: impedancia en paralelo, Zs: impedancia en serie, Rcc: resistencia en corriente continua, Rca: resistencia en corriente alterna

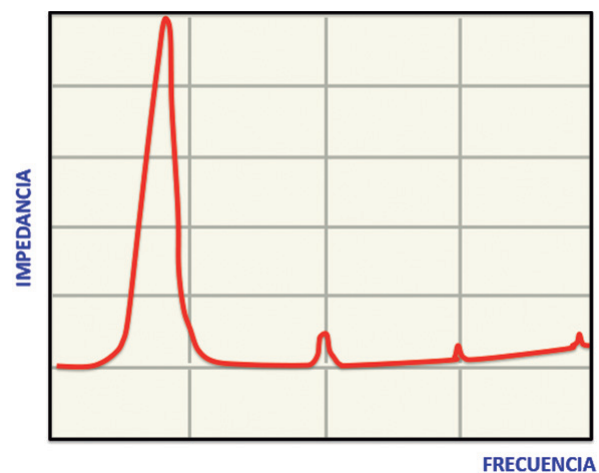


Figura 7. Comportamiento frecuencial de la impedancia de una trenza.

gitud del conductor y  $r$  es el radio del conductor y  $\sigma$  es la profundidad del efecto pelicular. Al aumentar la frecuencia el valor de  $0,5 \text{ nH/cm}$  disminuirá.

### Resonancias

Como hemos dicho, tanto en el cable como en la trenza, en la comparativa despreciaremos el valor de la pequeña capacidad debida a la disposición del conductor con respecto a la puerta y el armario, al ser muy pequeña y poderla aproximar a un valor similar en ambos casos (cable y trenza).

Pero en algunos casos, esta capacidad podría provocar problemas de resonancia junto a sus respectivas inductancias. Para el caso general de un conductor que tiene una inductancia  $L$ , podría resonar con su capacidad parásita  $C$ , a una frecuencia  $f_r$ :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Se debe tener cuidado y evitar las resonancias dentro de la gama de frecuencias de funcionamiento del equipo. El uso de trenzas más cortas y más anchas o de varias en paralelo disminuirá su inductancia conjunta, desplazando con ello la frecuencia de resonancia a una frecuencia más alta. En los armarios, usualmente se usa una sola trenza pero, para mejorar el efecto de las resonancias, conviene usar varias trenzas en paralelo. En la unión de la puerta y el cuerpo del armario se pueden usar 2 o 3 trenzas (figura 5).

Los efectos de las resonancias en paralelo de una conexión a tierra con un cable redondo se ilustran en la figura 6. Para obtener la eficacia máxima, la longitud de conductor de tierra debe ser una pequeña porción de la longitud de onda de la mayor frecuencia de la señal que pueda ser problemática. El mejor rendimiento se obtiene a frecuencias muy por debajo de la de primera resonancia.

Los efectos del conductor a tierra actuando como una antena están relacionados con el comportamiento de las resonancias del circuito que forma. Los conductores a tierra actúan como antenas para radiar o captar interferencias, dependiendo de sus longitudes relativas a la longitud

de onda de las señales, es decir, su eficiencia como antena. Un criterio conveniente para obtener una deseada mala antena, es decir, un buen conductor a tierra, es que su longitud sea  $\lambda/12$  o menos. Por lo tanto, una regla de oro en el diseño de un sistema de puesta a tierra eficaz es mantener las conexiones a tierra potencialmente expuestas a las interferencias (EMI) a longitudes menores a  $\lambda/20$  de la longitud de onda de la señal interferente.

En la figura 7 se muestra el comportamiento frecuencial de una conexión a tierra realizada con una trenza, donde se ve que, salvo en la primera resonancia en paralelo, las impedancias de las resonancias en paralelo de mayor frecuencia quedan muy reducidas en comparación a las impedancias de las resonancias paralelo del cable redondo.

### Cable: resistencia en corriente continua

La resistencia en corriente continua de un cable de sección circular viene dada por la fórmula:

$$R_{cc} = \rho l / S = \rho l / \pi r^2 \text{ en } \Omega$$

usando la resistividad  $\rho$  del conductor. Usando la conductividad  $\sigma$ , otra forma de calcularla es:

$$R_{cc} = l / \sigma \pi r^2 \text{ en } \Omega$$

$l$  es la longitud del cable en metros,  $\rho =$  resistividad en  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  (para el cobre es  $1,7 \times 10^{-2} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ,  $S$  es la sección transversal en  $\text{mm}^2$ ),  $r$  el radio del cable en  $\text{mm}$ .  $\sigma$  es la conductividad del conductor (para el cobre es  $5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$ )

### Cable: resistencia en corriente alterna

Cuando aumenta la frecuencia, el efecto pelicular hace que la corriente tienda a abandonar progresivamente el núcleo central del conductor. En consecuencia, la sección transversal efectiva disponible para que la corriente fluya disminuye. Así, la resistencia de corriente alterna para un conductor de sección circular es:

$$R_{ca} = R_{cc} \left( \frac{d}{4\delta} + 0,25 \right) \text{ en } \Omega$$

para la condición  $r > \sigma$  (en los cálculos en este artículo se ha escogido  $r > 3\sigma$ ), donde  $d$  es el diámetro del conductor en mm y  $\sigma$  es la profundidad del efecto pelicular en mm.

La profundidad del efecto pelicular se define como el espesor de la superficie en el que se concentra el 63% de la corriente para una frecuencia dada (figura 8) y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\delta = 0,066 / (\sigma_r \mu_r f)^{1/2} = \frac{0,066}{\sqrt{f}} \text{ mm}$$

donde  $f$  es la frecuencia en MHz,  $\sigma_r$  es la conductividad relativa, igual a 1 para el cobre y  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa, igual a 1 para el cobre.

### Cable: inductancia externa

La inductancia externa se debe a los campos magnéticos fuera del conductor y es una función del área del bucle del circuito cerrado formado por el conductor. La inductancia externa no se ve afectada por la frecuencia.

La inductancia externa  $L_{EXT}$  es el efecto parásito indeseado más importante en un conductor de conexión a masa. Para un cable redondo, por encima de un plano de tierra y para  $h < l$  (ver la anterior figura 2):

$$L_{EXT} = 2 \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \text{ nH/cm}$$

Donde  $d$  es el diámetro del conductor redondo en cm,  $l$  es su longitud en cm, la función  $\ln$  es el logaritmo neperiano y  $h$  es la altura sobre el plano de tierra en cm. Esta ecuación muestra que el aumento de  $h$  para un diámetro  $d$  dado hace aumentar  $L_{EXT}$ .

Pero más allá de una cierta altura  $h$  (exactamente cuando  $h > l$ ), el flujo producido por la corriente en el bucle formado por el cable y su retorno ya no es uniforme y  $L_{EXT}$  deja de aumentar con  $h$ . Calculamos la  $L_{EXT}$  de un cable con una sección transversal circular posicionado por lo menos a  $h = 5$  cm del plano de tierra (plancha del armario).

Si la distancia entre el cable y el armario cumple  $h/r > 5$ , se asume que la corriente estará uniformemente distribuida alrededor del cable y por ello el efecto de proximidad no será relevante. Para  $h \leq l$  tendremos:

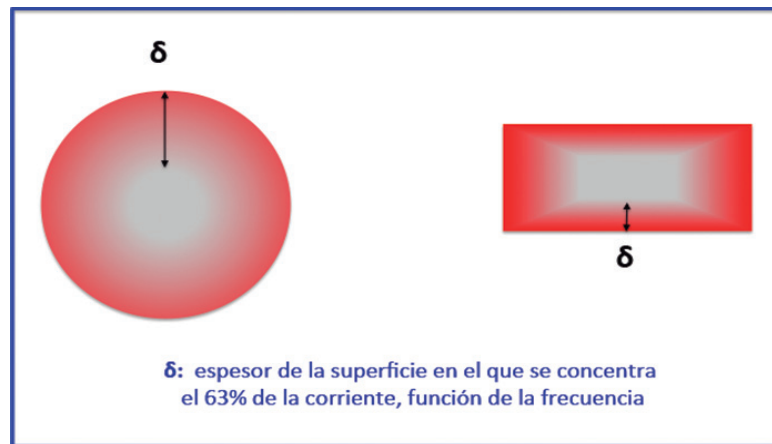


Figura 8. La profundidad del efecto pelicular  $\delta$ , en un cable de cobre con sección redonda y para una trenza con sección rectangular.

$$L_{EXT} = 2 \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \text{ nH/cm}$$

La figura 9 presenta la gráfica de la inductancia de diversos cables redondos con secciones de 2,5 a 10 mm<sup>2</sup> y longitudes de 10 a 25 cm. Son valores usuales en la conexión de la puerta del armario con cable.

### Trenza: resistencia en corriente continua

Para los cálculos de la trenza se considera una sección rectangular con una anchura  $a$  y un espesor  $e$ . En una trenza, la resistencia en CC es:

$$R_{CC} = \rho l / S = \rho l / a e = \frac{l}{\sigma a e} \text{ en } \Omega$$

donde  $\rho$  = resistividad del cobre  $1,7 \times 10^{-2}$  en  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ,  $l$  = longitud en m y  $S$  es la sección transversal en

mm<sup>2</sup> ( $S = a \cdot e$ ).  $\sigma$  es la conductividad del conductor (para el cobre es  $5,8 \times 10^7$  S/m).

### Trenza: resistencia en corriente alterna

La resistencia en CA para una trenza se calcula con la fórmula:

$$R_{CA} = \frac{1}{2\sigma\delta(a+e)} \text{ en } \Omega/\text{mm}$$

Con las mismas variables que en la anterior fórmula: anchura  $a$ , espesor  $e$  y profundidad del efecto pelicular  $\sigma$  en mm.  $\sigma$  es la conductividad del conductor (para el cobre es  $5,8 \times 10^7$  S/m).

Si la sección del conductor no es exactamente rectangular o circular, el valor de la resistencia  $R_{CA}$  para cualquier otra forma se puede obtener

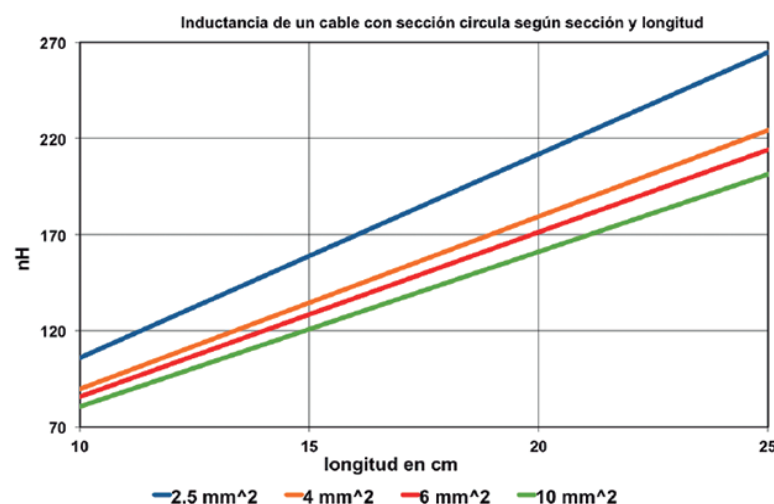


Figura 9. Inductancia de un cable con sección circular de 2,5 a 10 mm<sup>2</sup> y longitud de 10 a 25 cm.

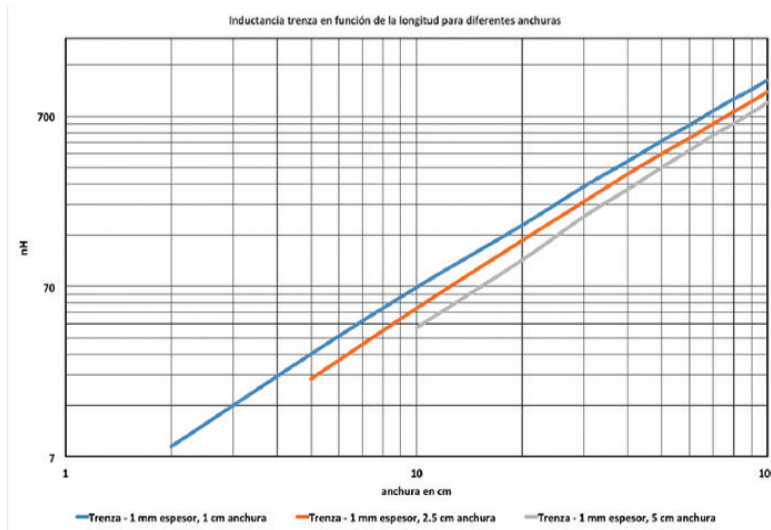


Figura 10. Inductancia de una trenza en función de la longitud (l) para diferentes anchuras (a). En todas espesor (e) = 1 mm. Cuando (l/a) < 2, el modelo es inaplicable porque la trenza se comporta como un plano de masa.

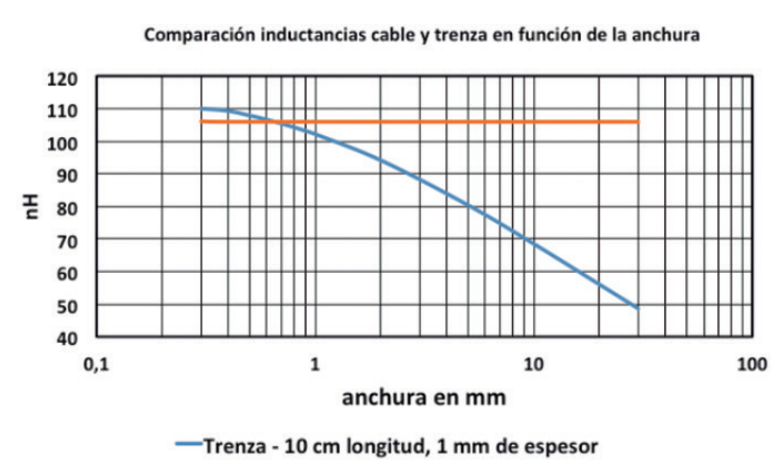


Figura 11. Comparación entre la inductancia de una trenza y la de un cable en función de su anchura. Espesor de la trenza = diámetro del cable.

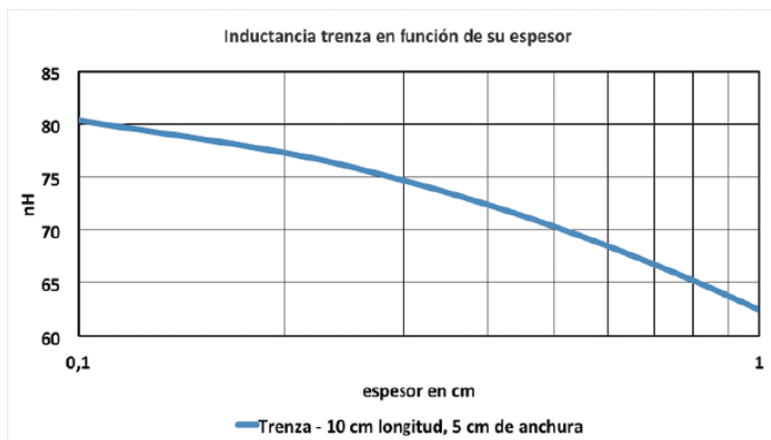


Figura 12. Inductancia de una trenza en función de su espesor.

mediante la inserción del valor del radio r de la siguiente forma:

$$r = \text{perímetro de la sección transversal del conductor} / 2 \pi$$

Si el perímetro es en mm, r será en mm.

Esta ecuación evidencia que una trenza plana es útil como conexión de tierra a altas frecuencias porque tiene un perímetro mayor que un cable redondo con la misma sección transversal.

### Trenza: inductancia externa

La inductancia para una trenza, equiparable a un conductor de sección rectangular, puede calcularse de esta forma:

$$L_{EXT} = 2 \left[ \ln \frac{2l}{(a+e)} + 0,5 + 0,2235 \frac{(a+e)}{l} \right]$$

en nH/cm

donde a es la anchura de la trenza, e es su espesor y l su longitud, aquí todo en cm.

La figura 10 muestra la inductancia de una trenza en función de la longitud (l) para diferentes anchuras de 1, 2,5 y 5 cm. En todas el espesor es de 1 mm. Cuando (l/a) < 2, el modelo es inaplicable porque la trenza se comporta como un plano de masa. La figura 11 presenta la comparación entre la inductancia de una trenza de 10 cm de longitud, 1 mm de espesor y la inductancia de un cable redondo en función de la anchura de la trenza. En ella, el espesor de la trenza es igual al diámetro del cable, igual a 1 mm. Aquí se ve que la inductancia de la trenza disminuye conforme aumenta su anchura. La figura 12 muestra como varía la inductancia de una trenza en función de su espesor, con una longitud de 10 cm y una anchura de 5 cm. La variación del espesor no afecta tanto a la variación de la inductancia como afecta la variación de anchura.

De estas gráficas se deduce que la inductancia disminuye con el aumento de la anchura de la trenza y aumenta al incrementar su longitud. Por lo tanto, una buena recomendación es seleccionar una trenza con una relación longitud/anchura de 5:1, aunque también es aceptable una mínima relación de 3:1.

La figura 13 muestra el comportamiento del ratio de inductancia de una trenza recta con respecto a la inductancia de un cable redondo, ( $L_{\text{TRENZA}} / L_{\text{CABLE}}$ ) como una función de la relación longitud/anchura ( $l/a$ ), con el espesor de la trenza igual al diámetro del cable.

También hay que señalar que la relación 5:1 es el valor por debajo del cual la ecuación de la inductancia externa de la trenza empieza a dar valores de inductancia demasiado altos, dado que una trenza muy ancha se acerca a la condición de un plano de masa. La figura 14 presenta el valor de la inductancia de la trenza  $L_{\text{TRENZA}}$  en función del ratio ( $l/a$ ), con el espesor de la trenza igual al diámetro del cable.

Comparando la inductancia de un conductor cuadrado y un conductor redondo, se comprueba que cuando el diámetro de un conductor circular es igual a la dimensión de los lados de un conductor cuadrado, entonces el conductor cuadrado presenta una inductancia inferior y una resistencia en corriente alterna inferiores. Cuando el área de la sección transversal de los conductores cuadrados y circulares es la misma, entonces la inductancia es la misma.

### Comparación de las impedancias cable/trenza

Para calcular el valor permitido máximo de la impedancia en el sistema de conexión a tierra se requieren dos entradas de datos básicos:

- La sensibilidad del circuito víctima como tensión en modo común, en función de la frecuencia y la duración del pico perturbador, y
- La amplitud de la corriente que fluirá a través de la impedancia común de tierra, en función de la frecuencia y  $\omega$  de la duración del pico perturbador.

Mientras que la sensibilidad a las interferencias del circuito puede evaluarse teóricamente o experimentalmente, conocer la amplitud de la corriente culpable del problema de CEM podría ser mucho más difícil. En un sistema complejo que implica tener muchos subsistemas, es difícil predecir las trayectorias de las corrientes de tierra y las características de cada una.

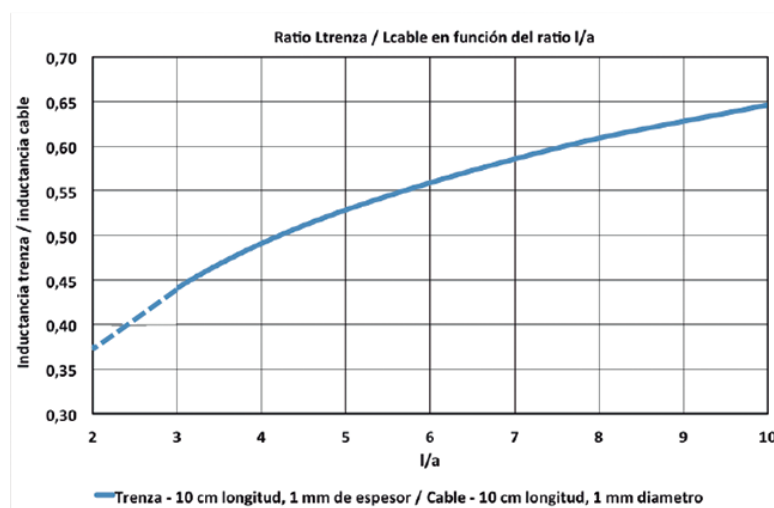


Figura 13. Ratio inductancias  $L_{\text{TRENZA}} / L_{\text{CABLE}}$  en función del ratio  $l/a$ , en comparando la trenza y el cable redondo con espesor trenza = diámetro cable.

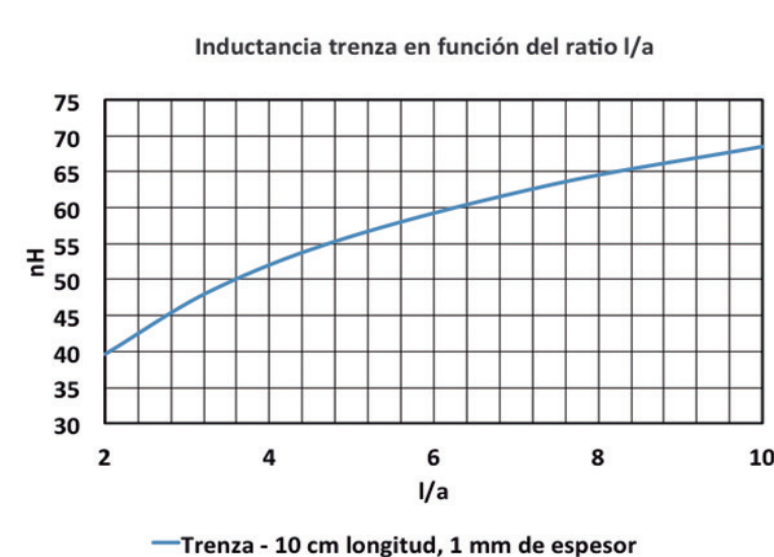


Figura 14. Inductancia de la trenza  $L_{\text{TRENZA}}$  en función del ratio  $l/a$ , en comparando la trenza y el cable redondo con espesor trenza = diámetro cable.

Como ya se ha visto, para una longitud del conductor ( $l$ )  $\ll$  longitud de onda ( $\lambda$ ), su impedancia total es:

$$Z = R_{(\text{CA o CC})} + j\omega L_{\text{EXT}}$$

La sustitución de un conductor circular por una trenza con un espesor que se aproxima o iguala al diámetro del cable, pero con una anchura mucho mayor, reduce la inductancia. A 10 Hz, la impedancia es igual al valor de la resistencia del cable, pero incluso a frecuencias del orden de los 10 kHz, la impedancia es significativamente mayor que el valor de la resistencia debido a la auto-inductancia.

En la figura 15 se compara gráficamente las impedancias de los cables y las trenzas en función de la frecuencia. Los parámetros son  $h = 5$  cm y las longitudes son de 10 a 25 cm. Para cada longitud, la sección del cable es igual a la sección de la trenza. Se comprueba que en cada longitud, la impedancia de la trenza es inferior a la impedancia del cable, demostrando la conveniencia de usar trenzas en lugar de cables.

### Conclusiones

Se han analizado y calculado la resistencia en continua y en alterna, la inductancia externa y la impedancia

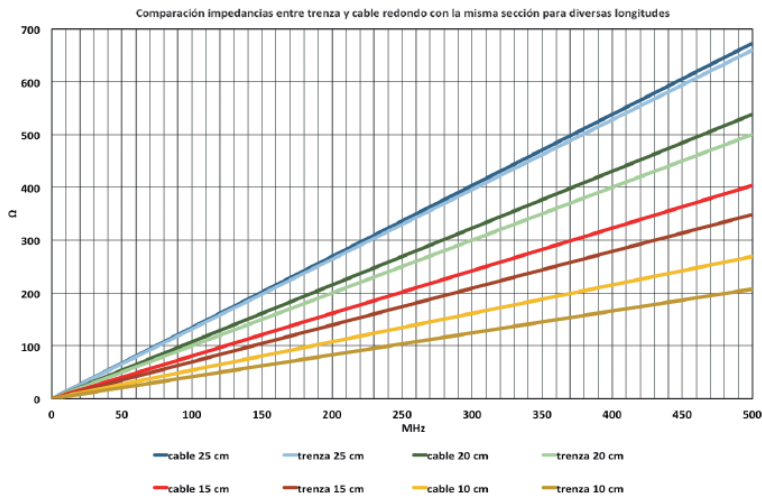


Figura 15. Comparación de las impedancias de los cables y de las trenzas en función de la frecuencia, con la misma sección y  $h = 5 \text{ cm}$ .

de los cables redondos y de las trenzas de cobre con valores adecuados a la aplicación de la conexión de la puerta con el cuerpo de un armario industrial, para reducir la impedancia y con ello la diferencia de potencial.

A igualdad de longitud, el uso de una trenza reduce la impedancia con respecto al uso de un cable. La metodología usada se puede aplicar a cualquier otro tipo de unión equipotencial en estructuras o chasis

en general (máquinas, mallados de tierra de edificios, estructuras, chasis, trenes, camiones, etc) para reducir la impedancia y en consecuencia la diferencia de potencial entre sus diversos puntos. Se debe destacar que se deben tener en cuenta las limitaciones de cálculo de las fórmulas simples aquí utilizadas. Hay el riesgo de tomar los resultados como buenos y aplicarlos en circunstancias reales muy distintas de las que aquí se han

REFERENCIAS

- Michel Mardiguian, *Electromagnetic Control in Components and Devices, Interference Control Technologies*, 1988
- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Oren Hartal, *Electromagnetic Compatibility by Design*, 1991, R & B Enterprises
- Clayton R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2006, John Wiley & Sons
- Michel Mardiguian, *Grounding and Bonding, Volume 2, Interference Control Technologies*, 1998
- Frederick W. Grover, *Inductance Calculations*, Dover Publications, 1946
- Kenneth L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, 2005

expuesto con sus limitaciones. En una instalación industrial compleja se deben hacer mediciones en una gran cantidad de situaciones para tener un abanico de valores probables a tener en cuenta en un diseño, junto con unas recomendaciones genéricas de buenas prácticas. 📏



[www.cemdal.com](http://www.cemdal.com)

CONTACTO:  
**Francesc Daura**  
[fdaura@cemdal.com](mailto:fdaura@cemdal.com)  
 Taronger 12  
 08192, Sant Quirze del Vallès  
 T: 93 600 455 492



En **CEMDAL** ofrecemos servicios de consultoría de diseño óptimo en **Compatibilidad Electromagnética (CEM)**, con buenas prestaciones, calidad y costes para todos los sectores de la industria electrónica, aplicable en cualquier momento del ciclo de desarrollo de sus productos.

Nuestra experiencia en diseño, desarrollo y solución a problemas de **Compatibilidad Electromagnética** en sistemas electrónicos, nos permite ofrecer nuestros servicios a empresas que necesitan ayuda con **flexibilidad, diligencia y fiabilidad** en los resultados. **Garantizamos los resultados positivos** en las pruebas de laboratorio de **CEM**.

SERVICIOS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS DE CEM



SERVICIO PREVENTIVO



COMPLETO: MERCADO CE



EMISIONES E INMUNIDAD

