

El mito de las conexiones de los cables blindados

Artículo cedido por Cemdal



www.cemdal.com



Autores: 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

Entre los ingenieros de diferentes sectores como el diseño de productos electrónicos, de equipos industriales, de instalaciones o de maquinaria, hay un mito relativo a las conexiones de los blindajes de los cables blindados. Se trata de cómo realizar la conexión de la pantalla del cable blindado a un conector, a una tarjeta de circuito impreso o a unos terminales. Una práctica usual es quitar el aislante del cable, abrir la pantalla y trenzarla con más o menos longitud configurando una "coleta" o "pigtail" para ser conectada a masa como si fuera un simple cable.

Donde y como el blindaje de un cable apantallado se conecta a masa puede cambiar radicalmente sus prestaciones, independientemente de las características intrínsecas de su fabricación. La conexión a masa del blindaje de un cable puede ser el eslabón más débil de la cadena, especialmente a altas frecuencias. Puede ser difícil y más caro conectar el blindaje de un cable usando un conector que tenga una buena abrazadera interna. Una buena abrazadera tiene siempre una impedancia mucho menor que la impedancia de transferencia del blindaje. Si en lugar de un conector se usa una coleta, siempre es un factor limita-

tivo de las prestaciones reales del cable. Un conector que pueda unir el blindaje a 360° con una abrazadera interna es la mejor forma de conectar el blindaje de un cable a masa (por ejemplo, conectores BNC, N o SMA para cables coaxiales). La conexión tipo coleta siempre degrada las prestaciones intrínsecas del blindaje a alta frecuencia. En el mejor de los casos, el mejor método de conexión a masa del blindaje aporta prestaciones casi similares a las prestaciones generales del cable apantallado. Nunca las mejora.

Las prestaciones del blindaje

Los generadores inducen corrientes ruidosas en los cables de los equipos y estas corrientes provocan tensiones de EMI que aparecen en los terminales de entrada del equipo víctima. Este tipo de mecanismo de acoplamiento es el acoplamiento del campo externo al cable y desempeña un papel importante en los problemas de EMI, jugando un papel central en la evaluación de la inmunidad radiada (o susceptibilidad) del equipo bajo prueba.

La evaluación de las prestaciones de la pantalla del cable, junto con sus conexiones a masa da informa-

ción vital para el diseño adecuado de la instalación del cable. La primera línea de defensa contra esta amenaza de EMI es utilizar buenos cables blindados. Si la impedancia de transferencia superficial del blindaje del cable es baja (esto se logra por lo general con una buena cobertura óptica), entonces la tensión de EMI en los terminales del equipo disminuye.

Impedancia transversal

El blindaje de los cables apantallados realizado con trenza de cobre tiene una impedancia de transferencia que aumenta con la frecuencia, pero su aumento es mucho menor que para el caso del blindaje realizado con espiral. La impedancia de transferencia Z_T es una medida del grado de efectividad del blindaje de un cable apantallado. Es la relación entre la corriente que circula por el blindaje debida a las EMI externas y la tensión inducida en el cable interno, dentro del blindaje, por unidad de longitud. También se puede definir como la relación que existe entre la corriente que circula por el conductor interno y la tensión inducida en el blindaje por unidad de longitud. La impedancia de transferencia Z_T se detalla como:

$$Z_T = (1 / I_s) (dV / dl)$$

Donde I_s es la corriente circulante por el blindaje, dV es la tensión inducida en el cable interno y dl es la unidad de longitud. El correcto funcionamiento del cable apantallado se basa en que tanto la corriente de EMI exterior al cable, como la corriente de retorno del conductor central comparten el blindaje en estratos contiguos. El efecto pelicular hace que a partir de un cierto valor de frecuencia esto sea posible, ocupando la corriente de EMI una fina capa en la zona exterior del blindaje, mientras que la corriente de retorno hace lo mismo pero en una capa interna del mismo blindaje. Debido al efecto pelicular, ambas corrientes

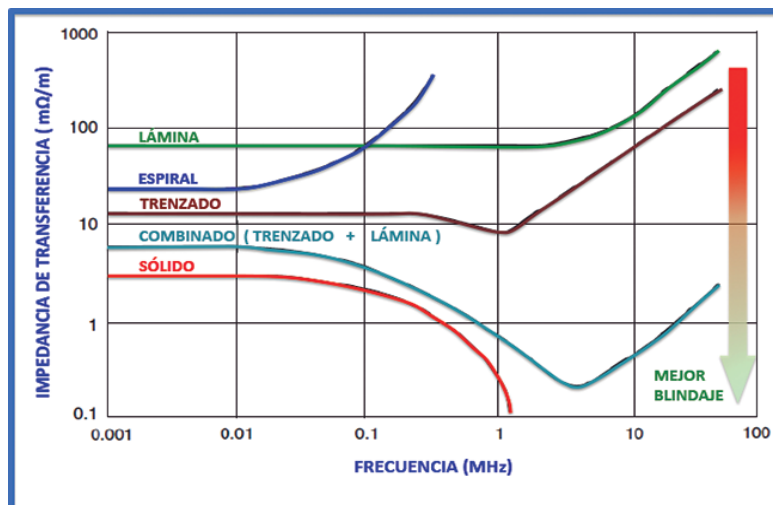


Figura 1. Valores de impedancia transversal de varios tipos de blindaje de cable, en función de la frecuencia. Cuanto menor es la impedancia de transversal, mejor es el blindaje.

pueden coexistir sin haber interferencias entre ellas.

La figura 1 muestra los valores de impedancia de transferencia en cables con diferentes tipos de blindaje. Cuanto menor es la impedancia de transferencia, mejor es el blindaje del cable.

La mayoría de los problemas con los cables apantallados son debidos a las conexiones indebidas de los blindajes. Las mejores prestaciones que se pueden obtener de un cable blindado sólo se obtendrán si el blindaje está correctamente conectado a masa. Los requisitos de una conexión adecuada del blindaje a masa son las siguientes:

1. Una conexión a masa con una impedancia muy baja
2. Una conexión con un contacto entre el conector y el blindaje a realizada a 360°
3. Una conexión en el extremo adecuado, (o extremos), y en el punto o puntos adecuados

Las coletas o "pigtaills"

El efecto del blindaje para el campo magnético depende de la distribución uniforme de la corriente longitudinal alrededor de la circunferencia del blindaje. Por lo tanto, la eficacia del blindaje magnético cerca de los extremos del cable depende en gran medida del método usado en la conexión del blindaje. Una conexión tipo coleta o "pigtail" (figura 2) hace que la corriente del blindaje se concentre en un lado del perímetro del blindaje. Para la máxima protección, el blindaje debe terminar uniformemente alrededor de su circunferencia. Esto se puede lograr mediante el uso de conectores coaxiales tales como los BNC, SMA, SMB, TNC, N, K, C, etc, si se usa un cable coaxial. El ejemplo del conector BNC a punto de cerrarse y cerrado se muestra en la figura 3.

El conector BNC proporciona un buen contacto eléctrico de la trenza del blindaje distribuida a 360° contra la carcasa del conector. Una terminación coaxial también proporciona un blindaje completo al conductor interior de señal, preservando la integridad del blindaje para el campo eléctrico. Es importante tener un buen contacto a 360° entre el blindaje y el conector, y también

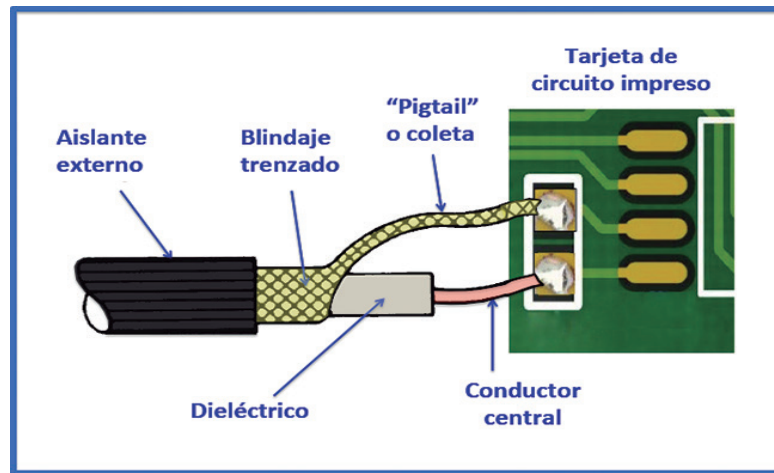


Figura 2. Conexión tipo "pigtail" o coleta de un blindaje de un cable coaxial a un circuito impreso.

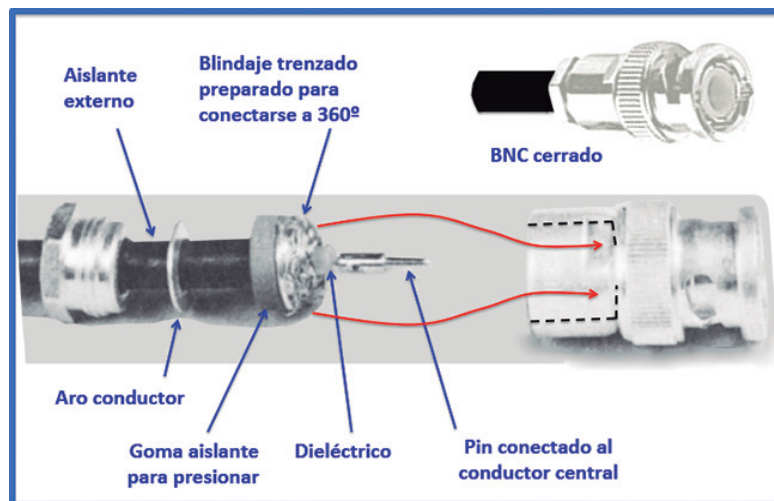


Figura 3. Conector BNC a punto de cerrarse. Las líneas rojas señalan el movimiento de la trenza al cerrar el conector y donde va a quedar bajo presión. Arriba: el conector cerrado.

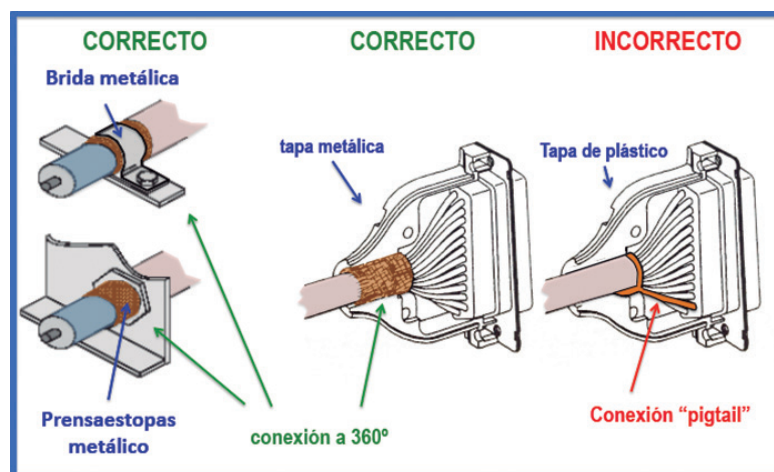


Figura 4. Conexión del blindaje de un cable apantallado usando una brida metálica o un prensaestopas metálico. También se puede realizar una conexión correcta en un conector no coaxial, con conexión del blindaje igualmente a 360°, como en un conector tipo DB25. También es conveniente evitar el "pigtail" al usar tapas de plástico en un conector DB25.

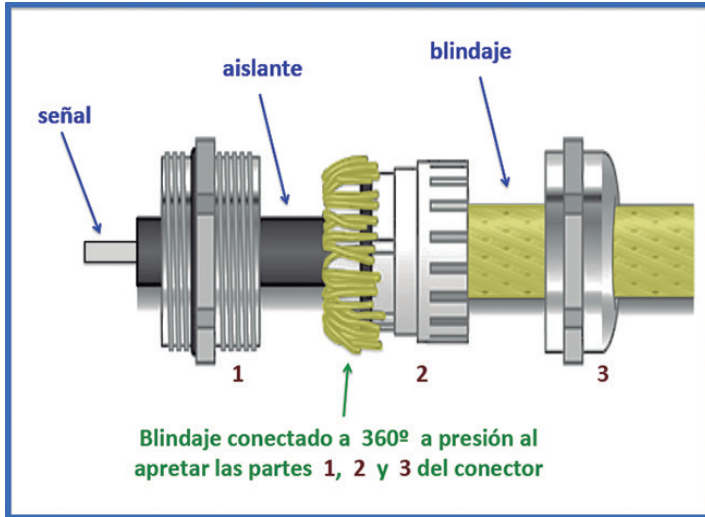


Figura 5. Conexión del blindaje o pantalla a 360° de un cable coaxial en un prensaestopas metálico.

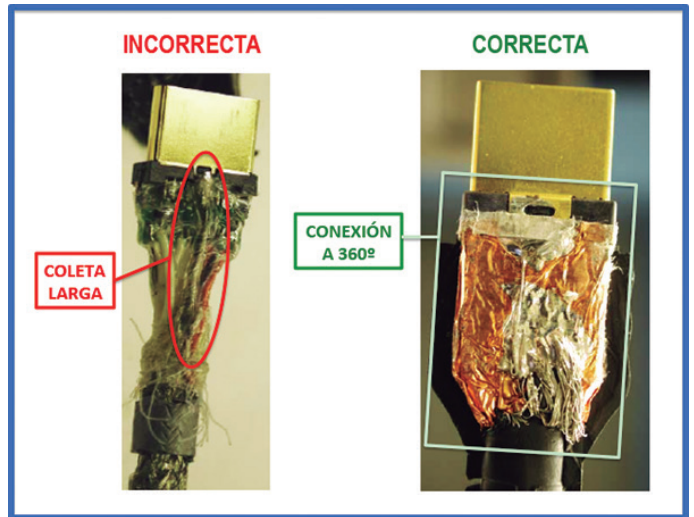


Figura 6. Conexión incorrecta y correcta del blindaje de un conector de video HDMI.

entre las dos mitades que conforman el conector. Hay otros métodos para proporcionar la terminación del blindaje a 360°, sin necesidad de utilizar un conector. Se pueden usar bridas metálicas, prensaestopas metálicos, abrir la trenza para ser conectada con todo su perímetro..., como en la figura 4. Aunque el conector no sea coaxial, como en el conector DB25, por ejemplo, también se pueden usar conexiones del blindaje a 360°. La conexión a 360° se puede realizar a través de las carcasas metálicas o capuchas de varios tipos de conectores.

Los fabricantes de conectores ofrecen una variedad de soluciones mecánicas para la unión del blindaje o pantalla al conector o en un prensaestopas, tal como un plano cónico, un anillo de compresión en

iris, un tubo encogible conductor y una trenza soldada. Como ejemplo, la figura 5 presenta el detalle de la conexión de la pantalla a 360° en un prensaestopas metálico.

El uso de una terminación tipo coleta, cuya longitud sea sólo una pequeña fracción de la longitud total del cable puede tener un efecto negativo significativo en el acoplamiento de interferencias electromagnéticas (EMI) al cable, a frecuencias superiores a los 100 kHz. El acoplamiento capacitivo (campo eléctrico) a la parte apantallada del cable es insignificante debido a que el blindaje está conectado a masa. Por encima de 100 kHz, el principal acoplamiento al cable es el acoplamiento inductivo del "pigtail". Como ejemplo práctico, la figura 6 muestra las conexiones incorrecta y

correcta del blindaje de un cable de vídeo HDMI. La conexión incorrecta es debida a una coleta excesivamente larga y la conexión correcta es gracias a una conexión bien hecha a 360° alrededor de la carcasa del conector.

Circuito equivalente

La corriente de retorno de una señal en corriente continua o a muy baja frecuencia toma el camino de menor resistencia. Pero, a alta frecuencia, la corriente de retorno toma el camino de menor impedancia. La impedancia en el circuito de retorno es la resistencia de la masa, la resistencia de las conexiones, del blindaje del cable, las reactancias inductivas de los cables, y otro factor importante, la reactancia in-

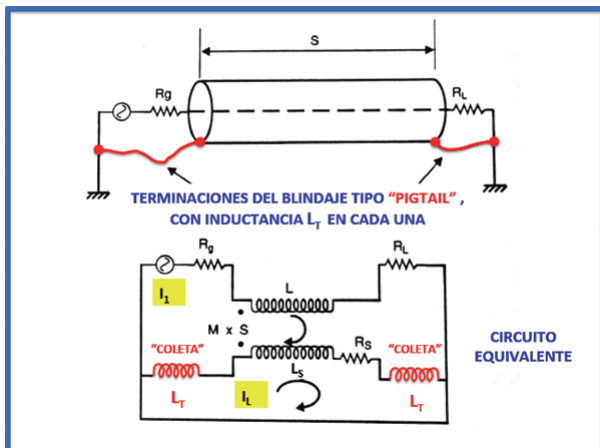


Figura 7. Conexión tipo "pigtail" con su esquema eléctrico equivalente.

La ecuación del bucle es:

$$I_1 = (-R_S - j\omega 2 L_T + j\omega (M - L_S)) + I_L (R_S + j\omega (L_S + 2 L_T)) = 0$$

Entonces:

$$\frac{I_L}{I_1} = \frac{1 + \frac{j\omega 2 L_T}{R_S}}{1 + j\omega \frac{(L_S + 2 L_T)}{R_S}}$$

A altas frecuencias:

$$\frac{I_L}{I_1} = \frac{2 L_T}{(L_S + 2 L_T)}$$

Figura 8. Ecuaciones del bucle de la conexión tipo "coleta" en el circuito equivalente.

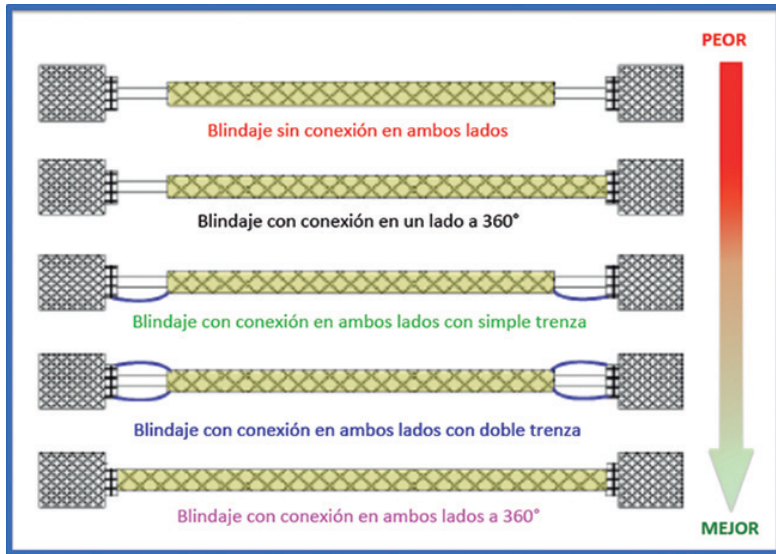


Figura 9. Distintas conexiones a masa del blindaje.

ductiva de la conexión a masa del cable. Esta reactancia es una función de la inductancia (a veces llamada "externa" para diferenciarla de la inductancia del cable de aproximadamente $1 \mu\text{H}/\text{m}$). La inductancia es una función del área del bucle formado por la conexión a masa. Es evidente que el área del bucle de la conexión a masa del cable es mucho mayor que el área del bucle entre el cable y el blindaje. Por lo tanto, la reactancia inductiva es mayor y la corriente de retorno va a elegir el camino de menor reactancia, volviendo a través del blindaje, como se requiere.

La figura 7 muestra el circuito eléctrico equivalente del blindaje y sus conexiones a masa. En el esque-

ma, L_T es la inductancia de la coleta, que es de aproximadamente de $10 \text{ nH}/\text{cm}$. La ecuaciones del bucle del circuito equivalente se presentan en la figura 8. I_L disminuye en proporción a la disminución de la inductancia L_T de la coleta. Para obtener todos los beneficios del blindaje, se requiere una baja resistencia y baja inductancia en la conexión de la pantalla a la masa.

La conexión entre el blindaje y el conector es parte de una cadena. Tenemos las uniones de la carcasa al conector, del conector del cable al conector del panel, del conector del panel a la caja y del panel de la caja a la masa. Todas ellas tienen una baja impedancia; de otro modo, si tenemos una conexión débil en esta

cadena hasta la masa, ésta reducirá las prestaciones de toda la cadena y casi inutilizará el blindaje. Uno de los eslabones más débiles de esta cadena es la conexión del conector del cable al conector del panel. Algunos conectores multiconductor redondos usan la bayoneta como mecanismo de cierre. Este tipo de conector tiene sólo unos pocos puntos de contacto y por lo tanto tiene una alta impedancia de transferencia. Es mucho mejor un conector con acoplamiento roscado al tener un contacto eléctrico con menor impedancia.

Acoplamiento de las EMI al cable

A nivel experimental y práctico se presenta el efecto de las terminaciones del blindaje en el acoplamiento de las EMI al cable blindado. Se comparan 5 tipos distintos de conexión a masa de un cable blindado con un par trenzado en su interior de 2 metros de longitud conectando dos equipos, como se ilustra en la figura 9. Las conexiones a masa del blindaje se presentan de peor a mejor prestaciones (de mayor a menor impedancia de conexión): sin conexión del blindaje en ambos lados, con conexión del blindaje en un solo lado a 360° , el blindaje con conexión con simple coleta en ambos lados, el blindaje con conexión en ambos lados con doble coleta y el blindaje con conexión en ambos lados a 360° . En la figura 10 se muestra la comparación de cada tipo de terminación del blindaje se muestra para frecuencias de 1 MHz a 1 GHz.

El nivel de EMI sin el cable (es la curva cian) es de 5 a 10 dBuV . La curva de color rojo muestra el resultado sin conectar la pantalla del cable a masa. Como se ve, aumenta linealmente con la frecuencia con un aumento de $20 \text{ dB}/\text{década}$, aproximadamente hasta los 70 MHz , donde se produce la primera resonancia. Esta resonancia es esperable ya que corresponde a la frecuencia en la que la longitud del cable es igual a media longitud de onda ($\lambda/2$). La curva en negro corresponde a la conexión del blindaje en un solo lado a 360° , en el conector. Aparte de una ligera disminución en la zona

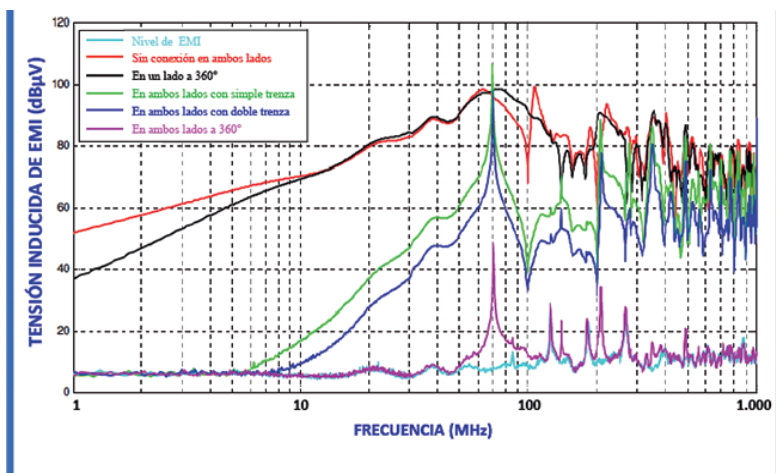


Figura 10. Resultados de las medidas del acoplamiento de EMI de las distintas conexiones a masa del blindaje de un cable RG-223.

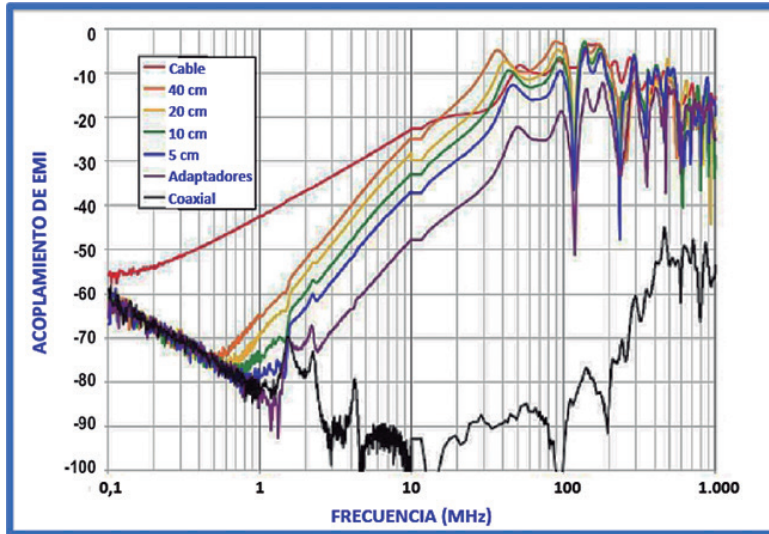


Figura 11. Comparación del acoplamiento de EMI en función de la longitud de la coleta. Línea negra: conexión con conectores, sin coletas. Línea marrón con solo los adaptadores para poder conectar las coletas. Línea roja: blindaje sin conexión a masa. Resto líneas: conexión a masa con coletas de distintas longitudes.

de las bajas frecuencias, menores a 10 MHz, casi se tiene la misma respuesta que en el caso anterior.

Cuando el blindaje del cable se conecta con una coleta de aproximadamente 1 mm de diámetro y 10 mm de longitud en ambos lados, la tensión inducida disminuye rápidamente hasta la frecuencia de resonancia (curva verde). Sin embargo, la respuesta es similar después del pico de resonancia. La adición de otra coleta en paralelo a la anterior en ambos lados, mejora la situación en aproximadamente unos 10 dB (curva azul). Pero la mejora real se consigue con la conexión a 360° en ambos lados (curva magenta). Aparte de la frecuencia de resonancia, la tensión inducida es muy cercana al nivel de umbral de EMI. Además, la tensión inducida es de 50 dB menos que en los otros casos en la frecuencia de resonancia, donde se obtienen la mayoría de las tensiones inducidas más graves.

Los resultados de otra prueba interesante se muestran en la figura 11. Se trata de comparar la diferencia de resultados del acoplamiento de EMI sobre un cable apantallado, conectando su blindaje con coletas de diferentes longitudes. La línea roja es el blindaje sin conexión a masa. En el otro extremo, la línea negra es el cable coaxial con la conexión realizada con conectores, sin coletas. La línea lila es el cable

con solo los adaptadores para poder conectar luego las coletas. El resto de las líneas corresponden a las conexiones a masa con coletas de distintas longitudes. En esta prueba, la primera frecuencia de resonancia está en los 35 MHz.

Conexión del blindaje a masa en los dos extremos

La razón principal para apantallar los cables a baja frecuencia es protegerlos contra el acoplamiento de campo eléctrico, principalmente de los conductores de la red eléctrica de 50 Hz. Un blindaje no proporciona ninguna protección contra el campo magnético a baja frecuencia. Esto señala la ventaja de utilizar pares trenzados blindados a baja frecuencia: el blindaje protege contra el acoplamiento de campo eléctrico y el par trenzado protege contra el acoplamiento de campo magnético.

Cuando la pantalla se conecta a masa en ambos extremos del cable, la posible reducción de EMI queda limitada por la diferencia en potencial entre las masas y por la susceptibilidad del bucle de masa a los campos magnéticos. En el caso de un par trenzado blindado con la pantalla conectada a masa en ambos extremos, se fuerza que parte de la corriente del bucle de masa circule a través de la pantalla, al tener una

impedancia más baja, en lugar de circular por el conductor de retorno de la señal.

En un cable coaxial, su pantalla debe estar conectada a masa en ambos extremos, porque también es el conductor de retorno de la señal. En este caso, el acoplamiento de EMI se puede reducir disminuyendo la impedancia de transferencia de la pantalla, porque así se reduce el acoplamiento por impedancia común. Si se debe aumentar el nivel de inmunidad, se debe abrir el bucle de masa, usando optoacopladores, choques en modo común o transformadores de aislamiento.

A frecuencias por encima de los 100 kHz, o cuando la longitud del cable es superior a $\lambda/20$, se hace necesario poner a masa la pantalla en ambos extremos. Esto es cierto tanto para cables multiconductor como para cables coaxiales.

Por lo tanto, es una práctica común en alta frecuencia, y con circuitos digitales, conectar a masa la pantalla del cable en ambos extremos. Cualquier pequeña tensión de EMI causada por la diferencia de potencial entre masas que se pueda acoplar al circuito (principalmente a 50 Hz y sus armónicos) no afectará a los circuitos digitales y puede, por lo general, ser filtrada, debido a la gran diferencia de frecuencias entre las EMI y la señal digital. A frecuencias superiores a 1 MHz, el efecto pelicular reduce el acoplamiento por impedancia común de las corrientes de señal y de EMI circulando por el blindaje. El efecto pelicular hace que la corriente de EMI circule por la superficie exterior del blindaje y que la corriente de señal circule por la superficie interior del blindaje. La doble conexión del blindaje a masa también proporciona apantallamiento de campo magnético a frecuencias por encima de la frecuencia de corte del blindaje.

La conexión del blindaje en sólo un extremo

A baja frecuencia, los blindajes de los cables apantallados multiconductor en los que el blindaje no es el conductor de retorno de las señales, a menudo el blindaje se conecta en un solo extremo. Si el blindaje se conecta en los dos

extremos, pueden circular corrientes de EMI por el blindaje debido a la posible diferencia de potencial entre las masas de los dos extremos del cable. Esta diferencia de potencial y, por lo tanto, la corriente por el blindaje, es generalmente debida a corrientes de 50 Hz circulando entre las dos masas. En el caso de un cable coaxial, la corriente I_{EMI} que circula por el blindaje provoca una tensión VEMI cuya magnitud es igual a:

$$V_{EMI} = I_{EMI} \times Z_T$$

donde Z_T es la impedancia de transferencia del blindaje. En el caso de un par trenzado apantallado, la corriente en la pantalla puede inducir tensiones desiguales en los conductores de señal del par trenzado y ser una fuente de EMI.

Si el blindaje se conecta a masa en un solo extremo, entonces ¿en qué extremo debe conectarse a masa, y en qué masa? Por lo general, es mejor conectar a masa el blindaje en el extremo de la fuente de señal, ya que es la referencia para la tensión de la señal. Sin embargo, si la fuente de señal es flotante (no conectada a masa), es mejor conectar la pantalla a masa en el extremo de la carga.

La conexión a masa del blindaje del cable en un solo extremo para eliminar el acoplamiento de EMI de la línea de red permite, sin embargo, que el cable actúe como una antena a alta frecuencia y sea vulnerable a la captación de EMI de alta frecuencia. Los transmisores de radio en AM o FM pueden inducir corrientes de RF de alta frecuencia en la pantalla del cable. Si la pantalla del cable está conectada a la masa del circuito, estas corrientes de RF podrían entrar en el equipo y podrían causar interferencias. Por lo tanto, la forma correcta de conectar la pantalla del cable a masa es conectarla al recinto blindado del equipo, no a la masa del circuito. Esta conexión debe tener la impedancia más baja posible y debe ser hecha en la parte exterior del recinto blindado.

Los blindajes de los cables coaxiales, en los que el blindaje es el conductor de retorno de la señal, deben estar conectados a masa en ambos extremos, y, para cumplir con la funcionalidad, esta masa debe es-

tar conectada a la masa del circuito. Sin embargo, teniendo en cuenta las EMI, el blindaje debe antes conectarse al recinto del equipo. Esto se puede lograr fácilmente mediante la conexión del blindaje del cable a la caja y luego se debe conectar el circuito de masa al recinto en el mismo punto. La masa conectada en un solo extremo del blindaje es eficaz a bajas frecuencias (audio), ya que evita que las corrientes de frecuencia industrial circulen por el blindaje y la posible llegada de EMI al circuito de la señal. El único punto de conexión de masa también elimina el bucle de masa del blindaje y su posible captación de campo magnético. A medida que aumenta la frecuencia, sin embargo, la conexión única de masa se vuelve menos eficaz. Cuando la longitud del cable se aproxima a $\lambda/4$, la conexión del blindaje a masa en un extremo se convierte en una antena muy eficiente. En estas circunstancias normalmente se hace necesaria la conexión a masa en ambos extremos del blindaje.

A altas frecuencias aparece un problema: la capacidad parásita tiende a completar el circuito de masa, lo que hace que sea difícil o imposible mantener el aislamiento de masa en el extremo del blindaje sin conexión. Aunque la conexión en un solo punto es eficaz en las frecuencias de audio y más bajas, y la conexión a masa en los dos extremos es eficaz a alta frecuencia,

¿qué se puede hacer cuando la señal contiene componentes de alta y baja frecuencia a la vez? En este caso, las señales de alta frecuencia no forman parte del circuito, pero pueden estar presentes en el cable debido al acoplamiento como una señal en modo común en el cable. Entonces ser necesario el uso del blindaje para prevenir la radiación de las señales de alta frecuencia. En estas situaciones, se puede reemplazar la capacidad parásita por un condensador real (de unos 33 - 47 nF), para formar una combinación híbrida de masa. Así, a baja frecuencia, existe una única conexión de masa debido a que la impedancia del condensador es grande. Sin embargo, a alta frecuencia, el condensador se convierte en una baja impedancia, que convierte el circuito en uno que está conectado a masa en ambos extremos.

Conclusiones

Se ha explicado como conectar el blindaje a masa, usando coletas o usando conectores, viendo que la conexión a 360° de la tranza del blindaje siempre obtiene las mejores prestaciones. También se ha visto que normalmente el blindaje de un cable apantallado debe estar conectado a masa en los dos extremos.

Aunque hay algunas excepciones en las que el blindaje es mejor conectarlo en un solo extremo. □

REFERENCIAS

- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Elya B. Joffe, Kai-Sang Lock, *Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook*, 2010, IEEE 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, "Differential Transfer Impedance of Shielded Twisted Pairs", Mayo 2010, *Interference Technology*.
- F. Ustüner, N. Tarim, and E. Baran, "Experimental Investigation of the Shield Termination Effect on the Field-to-Cable Coupling Level"
- Dana J. Bergey, Nathan E. Altland, "EMI Shielding of Cable Assemblies", *DesignCon 2008*
- Martin Rowe, "Never use pigtailed on cable shields", *EDN*, August 2014 <https://www.youtube.com/watch?v=7w-nB6-8500>
- Francesc Daura, "El mito de las conexiones de los cables apantallados", *Revista Española de Electrónica*, Julio/Agosto 2013