

Los prensaestopas y la CEM

Artículo cedido por Cemdal



www.cemdal.com



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL. Representante de CFC para España y Portugal. www.cemdal.com fdaura@cemdal.com www.cfcele.com

En las instalaciones industriales es habitual ver conexiones a tierra de las pantallas de cables de potencia incorrectamente realizadas conectando la pantalla en forma de coleta ("pigtail" en inglés) demasiado larga. También es habitual ver la introducción de cables apantallados en armarios de control usando prensaestopas de plástico o simplemente pasando a través de agujeros en la plancha del armario metálico. Estas prácticas de ingeniería son incorrectas desde el punto de vista electromagnético porque pueden provocar problemas de compatibilidad electromagnética (CEM). Si se aplican todas a la vez, la aparición de problemas de CEM está asegurada.

Estos problemas de CEM podrían consistir en emisiones radiadas excesivas provenientes de los cables de potencia trifásicos apantallados mal conectados entre inversores de frecuencia y motores. También podrían consistir en problemas de susceptibilidad en cables de sensores o de comunicaciones, también mal conectados entre los equipos de control dentro de un armario y otros dispositivos externos, situados a una cierta distancia.

Conexiones de un cable apantallado

El efecto de blindaje de un cable apantallado depende del material de la pantalla (cobre o aluminio), de la construcción del cable, de la naturaleza de la pantalla (lámina o trenza) y del tipo de su conexión a tierra (coleta, brida, conector o prensaestopas). La conexión de la pantalla es particularmente importante. Su conexión a tierra debe tener muy baja impedancia (bajas resistencia e inductancia).

Esto se consigue si la pantalla se conecta gracias a una conexión muy corta con un área de contacto muy grande. Incorrectamente es muy usual conectar la pantalla usando coletas ("pigtails") con una longitud de varios centímetros. Esta conexión es inductiva y reduce drásticamente el efecto de blindaje del cable apantallado.

En una instalación, una pantalla debe conectarse a tierra en ambos extremos del cable. Estas dos conexiones son esenciales para asegurar que la pantalla provee una protección efectiva contra los acoplos inductivo (campo magnético), capacitivo (campo eléctrico) y por radiación (campo electromagnético). Si estas conexiones se realizan correctamente, la pantalla será eficiente tanto para las emisiones como para la susceptibilidad. Si la pantalla se conecta solo en uno de los extremos solo tendrá protección contra el acoplo de campo eléctrico y perderá la protección contra el campo magnético.

Hay tres excepciones a la regla de conectar la pantalla a tierra en ambos extremos del cable y sería mejor conectarla en un solo extremo:

- Si las señales que circulan por el cable apantallado son de baja frecuencia y bajo nivel: la corriente que circularía entre los dos extremos de la pantalla del cable podría generar una tensión parásita en los conductores internos del cable vía la impedancia de acopio entre la pantalla y los conductores que podría superar el margen de ruido de la señal.
- Si el cable apantallado es muy largo: la posible diferencia de potencial entre las dos tierras de los extremos del cable podría generar corriente parásita que se podría

acoplar a los conductores internos en el cable.

- Si el cable apantallado se sitúa en ambientes con alto riesgo de explosión (ATEX): la posible diferencia de potencial entre las dos tierras de los extremos podría causar chispas en el momento de conectar el cable.

Si por alguna excepción la pantalla no se pudiera conectar a tierra en los dos extremos del cable, para obtener un relativo buen comportamiento a alta frecuencia, la pantalla podría conectarse directamente en un extremo y en el otro se podría conectar a través de un condensador (de unos 33 nF). Esta solución evitaría la circulación de corriente de baja frecuencia ($f < 100$ kHz) permitiendo la circulación a alta frecuencia ($f > 100$ kHz). Otra posibilidad sería el uso de un cable con pantalla doble, conectando una pantalla a tierra en un extremo y la segunda pantalla en el otro extremo. En este caso las dos pantallas deben estar bien aisladas eléctricamente.

Conexión de la pantalla de un cable de potencia

Vamos a considerar como ejemplo las conexiones de los cables de potencia trifásicos apantallados dispuestos entre inversores de fre-

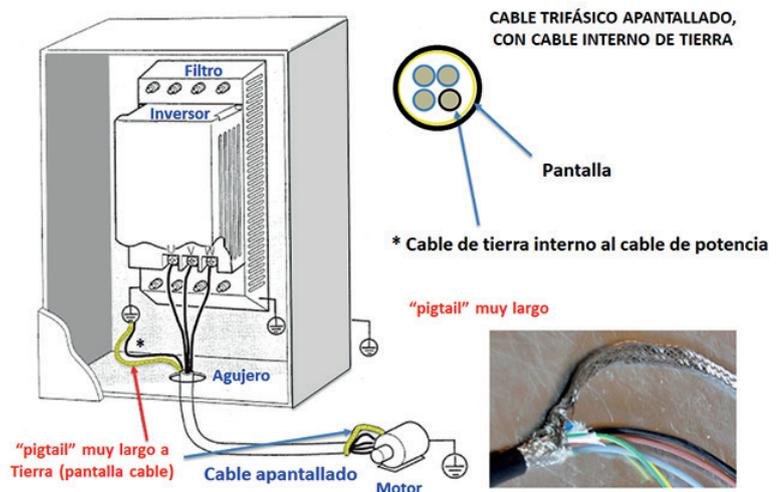


Figura 1. Conexión incorrecta de un cable apantallado de potencia al entrar en un armario a través de un agujero.

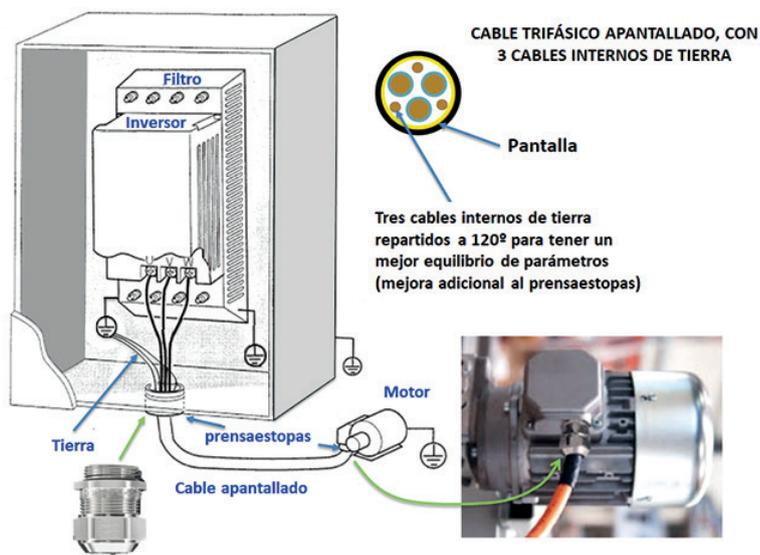


Figura 2. Conexión correcta de un cable apantallado de potencia al entrar en un armario usando un prensaestopas metálico (también en la caja de bornas del motor).

cuencia y motores para aportar una solución óptima a sus introducciones en armarios y las conexiones de sus pantallas realizadas incorrectamente.

En instalaciones y máquinas, el tipo de cable de potencia más usado para conectar un inversor de frecuencia y un motor es el cable apantallado trifásico con cable de tierra, como se muestra en la figura 1 (3 fases, 1 tierra y pantalla). Usualmente, para introducir el cable en el armario metálico se usa un simple agujero en la plancha. Así, el cable entra hasta llegar al inversor, para conectar las fases a sus bornes. El cable de tierra interno del cable se conecta a un terminal de tierra interno en el armario. La pantalla se convierte en una coleta larga para ser conectada al mismo terminal que el cable de tierra interno, según se ve en la figura 1. Con algunas variaciones, este modo de conexión es muy habitual, pero es electromagnéticamente incorrecto porque degrada las buenas prestaciones de blindaje del cable de potencia.

Luego, esta incorrección también se aplica de forma similar en la caja de empalmes del motor, en el otro extremo del cable de potencia. El cable también se introduce por el agujero de la caja metálica, usando algunas veces prensaestopas de plástico como sujeción mecánica y como sellado antihumedad. Ésto es electromagnéticamente equivalente a pasar el cable por el agujero, igual a lo realizado en el armario

en la figura 1, conectando el cable interno de tierra junto a la pantalla a un terminal de tierra en la caja de empalmes del motor. La pantalla se debe convertir en una coleta larga para poderla conectar al terminal de tierra, degradando las prestaciones de blindaje del cable.

Si el motor no necesitara control de velocidad y funcionara solo en modo TODO/NADA, conectándolo a la red eléctrica de 50 Hz mediante un simple contactor o un arrancador, no sería necesario usar un cable de potencia apantallado y todo lo antedicho no sería motivo de análisis.

Dónde y cómo una pantalla se conecta a tierra puede cambiar radicalmente sus prestaciones, independientemente de sus características intrínsecas de fabricación. La conexión a tierra de la pantalla puede ser el punto más débil del conexionado del cable, especialmente a altas frecuencias. Debido a que es muy difícil conectar una pantalla con un conector con una buena abrazadera interna o con la típica conexión en forma de coleta ("pigtail"), para conseguir una impedancia mucho menor que la del material de la pantalla, su conexión es siempre el factor limitativo de sus prestaciones reales de blindaje. La forma de coleta siempre degrada las prestaciones intrínsecas de la pantalla a alta frecuencia. En consecuencia, la mejor conexión a tierra de la pantalla, en el mejor de los casos, aporta prestaciones casi

similares a las prestaciones generales de blindaje del cable de potencia. Nunca las mejora.

Para aplicar buenas prácticas de ingeniería en las conexiones de los dos extremos de un cable apantallado de potencia veamos la figura 2. Una primera mejora es usar un prensaestopas metálico para introducir el cable dentro del armario correctamente. Hay otras posibilidades medianamente aceptables, pero ésta es electromagnéticamente la mejor práctica. Al usar un prensaestopas metálico, la pantalla queda conectada a la chapa del armario (tierra) a 360° sin usar una coleta. Así no se degradan las prestaciones de blindaje. En paralelo, podemos mejorar el cable seleccionando un cable trifásico apantallado, con 3 cables internos de tierra, repartidos a 120° para tener un mejor equilibrio de los parámetros internos en el cable (3 fases, 3 tierras y pantalla). Estos tres cables se conectan juntos a un terminal de tierra interno al armario. La pantalla queda conectada y cortada en el prensaestopas metálico de entrada al armario.

De forma similar, en la caja de empalmes del motor, en el otro extremo del cable de potencia, también se debe usar un prensaestopas metálico para pasar el cable por el agujero, conectando la pantalla del cable a 360° a la caja de empalmes metálica, que está unida a la carcasa del motor, contribuyendo así a no degradar las prestaciones de blindaje del cable de potencia.

La impedancia de transferencia de la pantalla de un cable

Inicialmente, la impedancia de transferencia (ZT) de la pantalla de un cable, se concibió para realizar cálculos de susceptibilidad frente a una amenaza de interferencias electromagnéticas (EMI) ambientales conocidas. El principio de ZT es perfectamente recíproco y también se puede aplicar en el cálculo de las emisiones radiadas.

La impedancia de transferencia de una pantalla es una propiedad de la pantalla que relaciona la tensión del circuito abierto (por unidad de longitud), medida entre el conductor central y la pantalla, con la corriente que

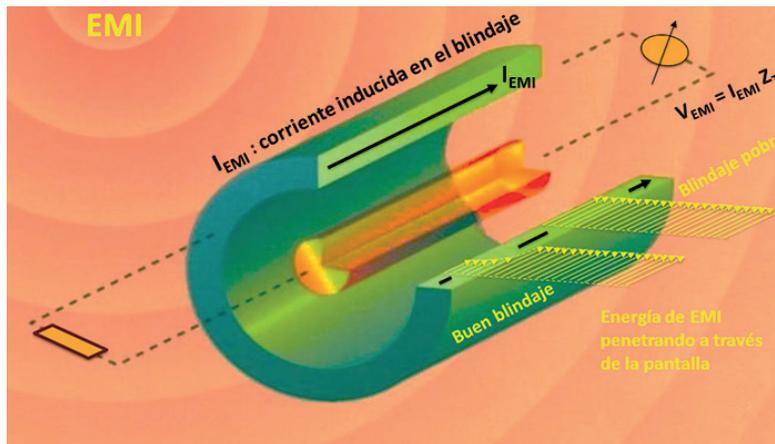


Figura 3. Concepto de impedancia de transferencia.

circula por la pantalla. La impedancia de transferencia Z_T es una medida del grado de efectividad de blindaje de un cable apantallado. La impedancia de transferencia Z_T se detalla como:

$$Z_T = (1 / I_{EMI}) (dV_{EMI} / dl)$$

donde I_{EMI} es la corriente que circula por pantalla, dV_{EMI} es la tensión inducida en el cable interno y dl es la unidad de longitud del cable. 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 la

pantalla en estratos contiguos. El efecto pelicular hace que a partir de un cierto valor de frecuencia esto sea posible, ocupando la corriente de interferencia una fina capa en la zona exterior de la pantalla, mientras que la corriente de retorno hace lo mismo, pero en una capa interna de la misma pantalla. Debido al efecto pelicular, ambas corrientes pueden coexistir sin haber interferencias entre ellas.

Mientras se propaga a través de la pantalla, la interferencia se atenúa. Cuanto mayor es la atenuación de la energía de EMI que pasa a través de la pantalla, menor es la tensión V_{EMI} ,

generada por el mismo campo y correspondiente a la misma magnitud de corriente inducida I_{EMI} , mejor será el efecto de blindaje (figura 3).

Cuanto menor es la impedancia de transferencia, mejor es el efecto blindaje del cable. La figura 4 muestra valores típicos de Z_T para varios cables coaxiales. Si la pantalla está conectada a tierra mediante coletas las impedancias de las coletas deben agregarse a Z_T y a los cálculos de impedancia del bucle formado. Por debajo de aproximadamente 100 kHz, Z_T permanece constante. A partir de 100 kHz, la impedancia de transferencia varía dependiendo del tipo de pantalla.

El problema de las coletas ("pigtailes")

El efecto de la pantalla para el campo magnético depende de la distribución uniforme de la corriente longitudinal alrededor de la circunferencia en sección de la pantalla. Por lo tanto, la eficacia del blindaje magnético cerca de los extremos del cable depende en gran medida del método usado en la conexión de la pantalla. Una conexión tipo coleta ("pigtail") hace que la corriente de la pantalla se concentre en un lado del perímetro de la pantalla. Para la máxima eficacia, la pantalla debe tener un contacto uniforme alrededor de su circunferencia, es decir, a 360°. En los cables de potencia esto se puede lograr mediante el uso de prensaestopas metálicos. Es importante tener un buen contacto a 360° en la conexión.

El uso de una conexión 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 EMI al cable, a frecuencias superiores a los 100 kHz. El acoplamiento capacitivo (campo eléctrico) en la parte apantallada del cable es insignificante debido a que la pantalla está conectada a tierra. Por encima de los 100 kHz, el principal acoplamiento en el cable es el acoplamiento inductivo en la coleta, sobre todo si la coleta es excesivamente larga.

La figura 5 muestra un cable de potencia con una coleta excesivamente larga que incorrectamente es usual encontrar en instalaciones

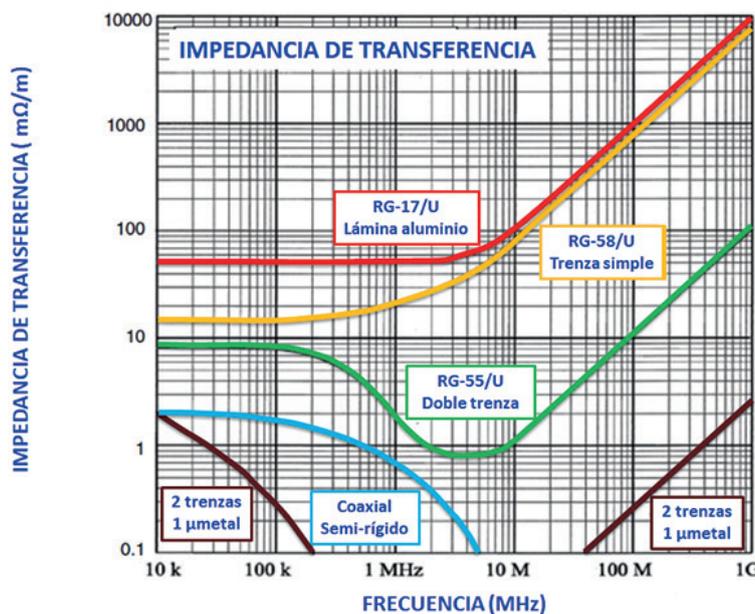


Figura 4. Valores de impedancia de transferencia de varios tipos de blindaje del cable apantallado, en función de la frecuencia.

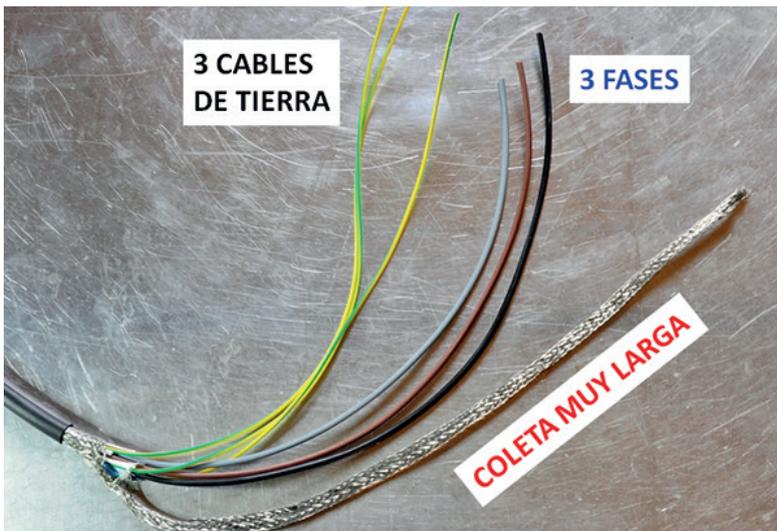


Figura 5. Coleta excesivamente larga en un cable apantallado.

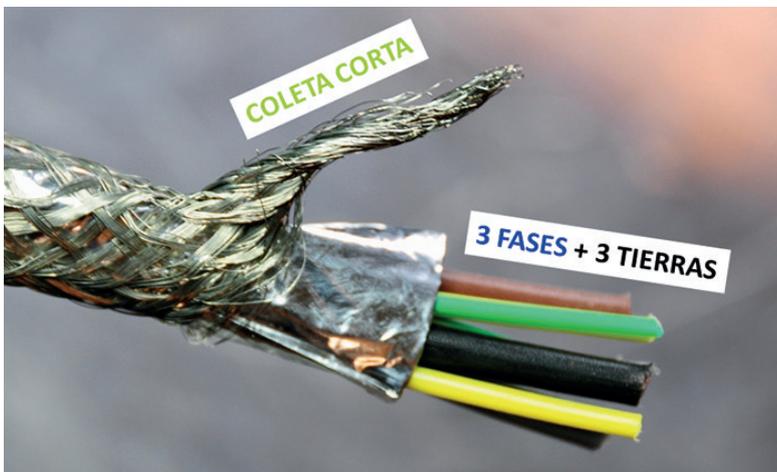


Figura 6. Coleta corta en un cable apantallado.

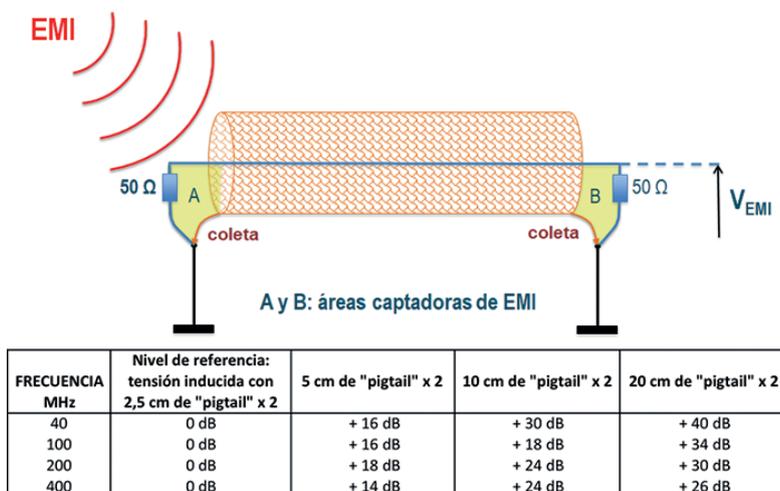


Figura 7. Degradación relativa debida al incremento de la longitud de la coleta. El incremento de la interferencia (V_{EMI}) es un efecto combinado del incremento de la impedancia de transferencia Z_T más el incremento de las áreas A y B formadas entre el conductor de la señal no apantallado y la masa.

industriales. Estas conexiones incorrectas se deben evitar. La figura 6 muestra un cable de potencia con una coleta aceptablemente corta que podría ser adecuada para realizar una conexión de la pantalla a tierra correctamente sin esperar problemas de CEM. Aunque sería mejor evitarla en las instalaciones industriales.

La figura 7 muestra la degradación relativa del efecto blindaje debida al incremento de la longitud de la coleta. El incremento de la EMI (V_{EMI}) es un efecto combinado del incremento de la impedancia de la pantalla más el incremento de las áreas A y B formadas entre el conductor de la señal no apantallado y la masa.

Los prensaestopas metálicos

En una instalación industrial, el uso de prensaestopas metálicos es la mejor solución para conectar a tierra la pantalla de un cable de potencia trifásico. Vamos a presentar como guía la familia de prensaestopas metálicos de CEM de la marca AGRO. Esta familia consta de 5 tipos de prensaestopas. Aunque no existe una norma de EMC específica para estos componentes, los prensaestopas son una gran ayuda para hacer posible cumplir con los límites prescritos en las normas de CEM.

Los prensaestopas metálicos tienen certificados sus bajos valores de impedancia de transferencia. Para lograr una efectividad óptima, la pantalla debe estar conectada a tierra en ambos extremos a través de una conexión con baja resistividad y baja inductancia. Así, debe montarse en la pared del armario con una gran superficie de contacto.

Los prensaestopas están certificados para obtener la menor impedancia de transferencia y la mayor capacidad de paso de corriente. La figura 8 muestra las gráficas de la impedancia de transferencia en función de la frecuencia de los cinco prensaestopas de AGRO. Según la norma EN 50262 no se debe exceder el valor de 0,1 óhmios. El prensaestopas con menor valor de impedancia de transferencia es el mejor de todos. Generalmente, los valores pueden variar dependiendo del tipo de cable, de su instalación y de su aplicación.

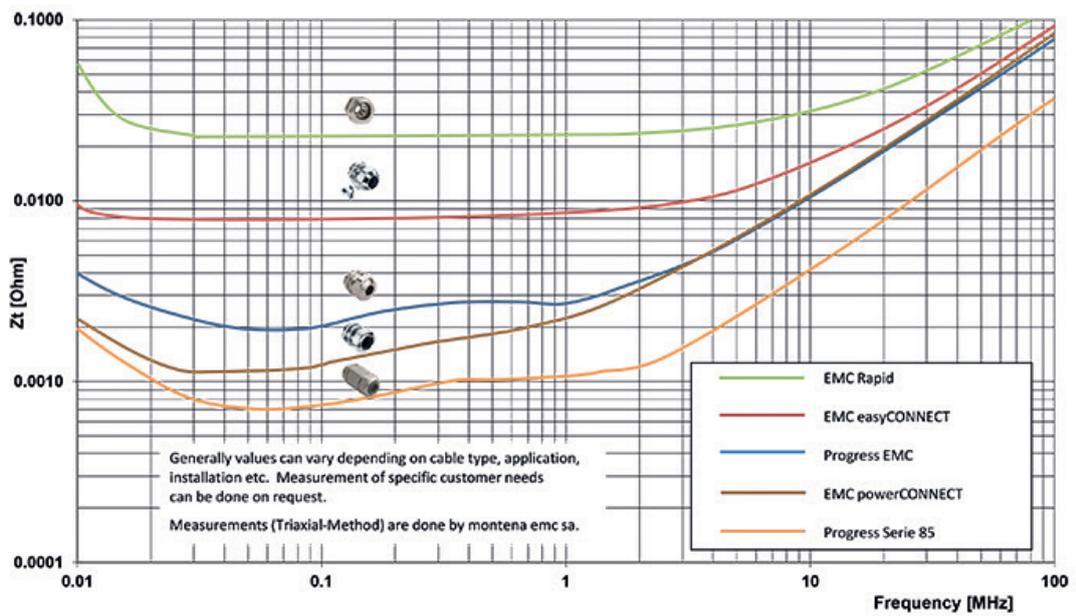


Figura 8. Comparación de la impedancia de transferencia de transferencia en función de la frecuencia de varios prensaestopos para CEM de AGRO. Según la norma EN 50262 no se debe exceder 0,1 óhmios

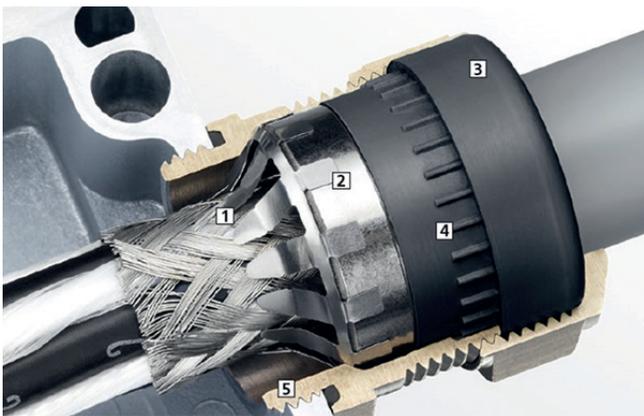


Figura 9. Prensaestopos de AGRO: "Progress® EMC Rapid Brass" para instalación rápida. (1) contacto de baja resistencia. (2) lengüetas flexibles. (3) anillo de sellado (4) alta resistencia a la torsión. (5) rosca larga.

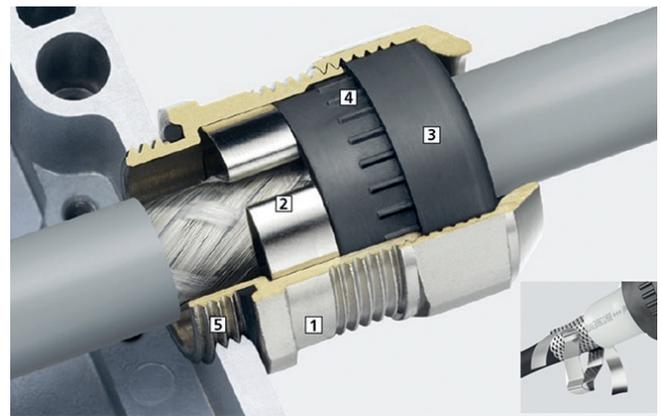


Figura 10. Prensaestopos de AGRO: "Progress® EMC easyCONNECT Brass". (2) contacto óptimo con la pantalla. (3) anillo de sellado (4) alta resistencia a la torsión. (5) rosca larga



Figura 11. Prensaestopos de AGRO: "Progress® EMC Brass". (1) contacto de baja resistencia. (2) presión de contacto permanente. (3) anillo de sellado estable en temperatura. (4) alta resistencia a la torsión. (5) rosca larga.

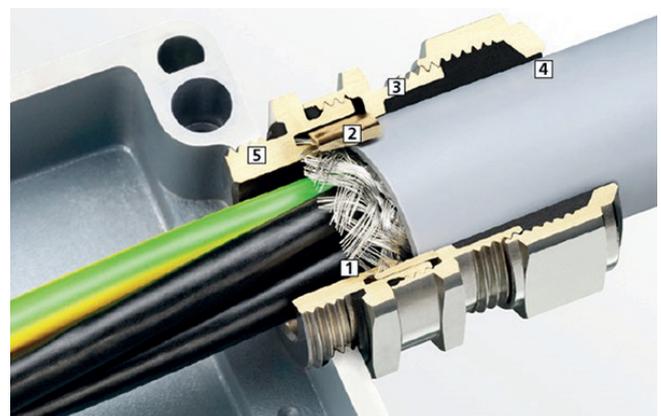


Figura 12. Prensaestopos de AGRO: "Progress® EMC powerCONNECT Brass". (1) contacto de baja resistencia.

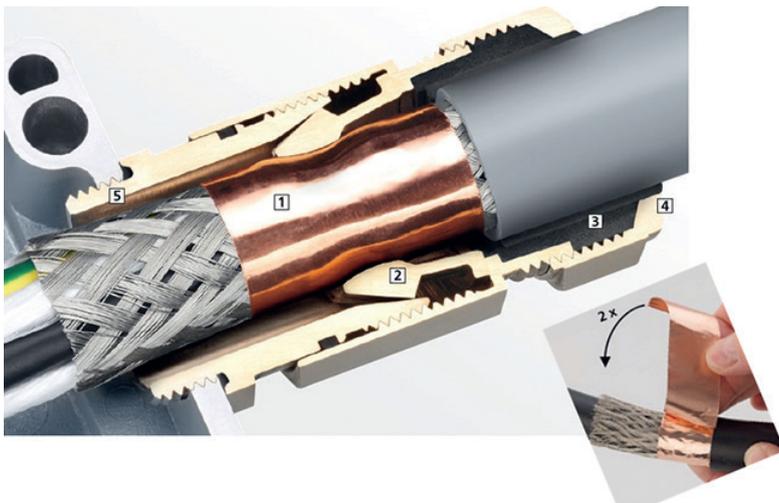


Figura 13. Prensaestopos de AGRO: "Progress® EMC series 85 Brass". (1) contacto óptimo de muy baja resistencia. (2) muy altas corrientes de fuga. (3) muy flexible.

Explicaremos las características de cada uno de los 5 prensaestopos. El primero presentado en la figura 10 es el que tiene la mayor impedancia de transferencia en la gráfica anterior. Se trata del prensaestopos llamado "Progress® EMC Rapid Brass". Un disco de contacto integrado permite un contacto fácil y rápido. Las lengüetas flexibles en el disco de contacto, con su gran área de superficie, maximizan la superficie de agarre en la pantalla trenzada. Tiene un contacto a 360° con una buena presión de contacto.

El siguiente prensaestopos en valor de impedancia de transferencia se obtiene con el prensaestopos llamado "Progress® EMC easyCONNECT Brass", presentado en la figura 10. Su sistema de resorte proporciona un contacto muy bueno con la pantalla completamente expuesta que pueden seguir hacia dentro del armario. La poderosa sujeción de protección de la pantalla del cable garantiza un excelente contacto de la pantalla y proporciona la menor impedancia de transferencia posible. Los dos anteriores prensaestopos permiten introducir el cable conectando la pantalla de forma pasante, sin necesidad de cortarla y permite llevar la pantalla hacia el interior del armario y llegar a poder conectarla a la conexión de tierra del inversor de frecuencia.

El siguiente prensaestopos en valor de impedancia de transferencia en la gráfica es el prensaestopos llamado "Progress® EMC easyCONNECT Brass", presentado en la figura 11.

La geometría del borde decisiva del manguito de contacto evita cualquier corte en la pantalla trenzada. La inmensa superficie de contacto de 360° garantiza una baja resistencia de contacto. Es especial para aplicaciones a + 200°C.

El siguiente prensaestopos en la gráfica de impedancia de transferencia es el prensaestopos llamado "Progress® EMC powerCONNECT Brass" presentado en la figura 12. Tiene alta flexibilidad y excelente rendimiento de sellado con alta flexibilidad. Los dos anteriores prensaestopos no permiten introducir la pantalla de forma pasante y ésta debe ser cortada para quedarse justo en el prensaestopos.

Por último, el mejor prensaestopos debido a su mínimo valor de impedancia de transferencia es el

"Progress® EMC series 85 Brass", presentado en la figura 13. Proporciona una conexión de muy baja impedancia entre la pantalla trenzada y la carcasa de metal. El anillo segmentado concéntrico garantiza una excelente conexión con la pantalla, con muy baja impedancia y puede manejar corrientes de fuga de hasta 1,6 kA de forma continua y de 3 kA de corta duración.

Para el montaje de este prensaestopos se debe encintar la pantalla con una cinta de cobre adhesiva (incluida) para mejorar la conductividad eléctrica entre la pantalla del cable y el anillo interno del prensaestopos. Este prensaestopos permite introducir el cable conectando la pantalla de forma pasante, sin necesidad de cortarla y así dejar llegar la pantalla hacia el interior del armario y poder conectarla a la conexión de tierra del inversor de frecuencia.

Conclusión

La conexión a tierra de la pantalla de un cable de potencia usando coletas es incorrecta porque aumenta su impedancia y con ello se degradan las prestaciones de blindaje del cable. En una instalación industrial, la solución óptima en la conexión de la pantalla de un cable de potencia es el uso de prensaestopos metálicos en los dos extremos del cable.

Agradezco la colaboración de FALCONERA DE GESTIONS S.L., distribuidor del fabricante AGRO en la cesión de documentación para poder escribir este artículo. 📧

REFERENCIAS

- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Anatoly Tsaliovich, *Cable Shielding for Electromagnetic Compatibility*, Chapman & Hall, Int. Thomson Publishing, 1995
- Francesc Daura, "El mito de las conexiones de los cables apantallados", *Revista Española de Electrónica*, Julio 2013
- Salvatore Celozzi, Rodolfo Araneo, Giampiero Lovat, "Electromagnetic Shielding", IEEE Press, John Wiley & Sons, 2008
- Michel Mardiguian, "Differential Transfer Impedance of Shielded Twisted Pairs", *Interference Technology*, November 2010
- Francesc Daura, "El mito de las conexiones de los cables blindados", *Revista Española de Electrónica*, Julio 2016
- Michel Mardiguian, "Simple Method for Predicting a Cable Shielding Factor, Based on Transfer Impedance", *Interference Technology*, March 2012
- AGRO Cable Glands, "EMC cable glands for interference-free cable installations"