

# El cable entre el inversor y el motor según la CEM

**leedeo**  
ENGINEERING  
www.leedeo.es

**CEMDAL**  
www.cemdal.com



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría Leedeo Engineering

En la instalación entre un inversor de frecuencia y un motor trifásico de corriente alterna (CA) es importante seleccionar correctamente el cable más adecuado. No es bueno instalar el cable más barato que nos ofrezca el mercado. En este artículo no vamos a tratar sobre la sección ni la tensión de los cables de fase según la potencia del motor o la tensión nominal del motor a instalar, ni del margen de temperatura de uso del cable. Vamos a analizar los aspectos relacionados con la configuración geométrica del cable, con respecto a la disposición de los cables de fase, los cables de tierra, las pantallas y los aislantes. Vamos a ver como la construcción geométrica del cable afecta a sus prestaciones desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética (CEM). También comentaremos algunos consejos sobre los filtros en la salida del inversor.

## Inversores de frecuencia

Los inversores de frecuencia (variadores de velocidad ajustable) son equipos industriales muy usados en el control de la velocidad de motores trifásicos. Los inversores tienen otras denominaciones en inglés como AFD (Adjustable Frequency Drive), VFD (Variable Frequency Drive) o ASD (Adjustable Speed Drive). Usualmente, los inversores para motores de baja y media potencia incorporan en su interior, en su entrada, un filtro de red para evitar tener excesivas emisiones conducidas hacia la red de suministro. Normalmente, los inversores no incorporan ningún filtro en su salida hacia el motor. Es responsabilidad del instalador añadir un filtro externo en su salida, en caso necesario y elegir el cable más adecuado. Estos filtros pueden ser ferritas, filtros dV/dt, filtros en modo común o filtros sinusoidales, dependiendo de la necesidad de filtrado de la instalación.

Los inversores de frecuencia son una causa de emisiones de interferencias electromagnéticas (EMI) de alta frecuencia no deseadas hacia el

motor de corriente alterna (CA) y hacia la red de suministro. El aumento de la frecuencia de la portadora de la modulación de anchura de impulso (PWM: Pulse Width Modulation) y los tiempos cortos de transición en las conmutaciones de los transistores de potencia del inversor intensifican los problemas de EMI.

Uno de los principales problemas relacionados con estos fenómenos es la generación de impulsos de corriente parásita de alta frecuencia, que circulan a través de los componentes internos del inversor debido a los altos niveles de la pendiente de la variación de la tensión de salida con respecto a la variación del tiempo (dV/dt).

## El cable y los filtros

En cuanto a la selección del cable a usar en la instalación entre el inversor y el motor, una primera elección fácil es usar un cable sin apantallar, es decir una manguera de tres cables para las tres fases. Esta elección es adecuada cuando la manguera de cables debe ser muy larga, por ejemplo, de unos 100 metros de longitud o más. El uso de esta manguera de tres conductores sin pantalla es usual cuando se deben instalar bombas de agua sumergidas, por ejemplo. En estas bombas es casi imposible tener un sistema correcto de conexión de la

pantalla a 360°. Ello hace inviable el uso correcto de un cable apantallado, al no poder realizar la conexión de la pantalla correctamente en la bomba. Esta conexión a 360° es importante desde el punto de vista de la CEM, para tener una buena y necesaria terminación del cable en los dos lados. Ver el detalle de cómo se puede realizar esta terminación a 360° en la figura 1, usando un prensaestopas metálico o una brida que envuelve la pantalla a 360°. Hay otros mecanismos más o menos complejos en el mercado para realizar esta terminación correctamente.

Si en un lado del cable no es viable realizar esta conexión, sería incorrecto usar un cable apantallado. Si se debiera escoger el uso de una manguera con solo tres conductores es recomendable instalar en la salida del inversor un filtro sinusoidal para poder atenuar todas las componentes de alta frecuencia generadas por las conmutaciones rápidas de los transistores de potencia del inversor, y obtener así una tensión trifásica sinusoidal muy limpia de ruido de alta frecuencia, sin apenas tener emisiones radiadas en modo diferencial. Prácticamente se tiene una tensión trifásica sinusoidal libre de los impulsos de alta frecuencia de la modulación PWM. Los filtros sinusoidales reducen las sobretensiones en los



Figura 1. Terminación de la pantalla a 360° con prensaestopas y con brida.

bornes del motor, reducen las pendientes  $dV/dt$ , suavizan la forma de onda de la salida del inversor, reducen las EMI radiadas del cable del motor en modo diferencial y reducen las corrientes de fuga que circulan por los rodamientos del motor, aumentando la vida útil del motor. Atención, si se usa un filtro sinusoidal, el control del motor debe ser escalar, porque el control vectorial no funciona.

Los filtros sinusoidales permiten alargar la longitud del cable del motor tanto como se necesite. Usando un filtro sinusoidal se pueden usar cables muy largos de 100, 200, o más de 300 metros, sin tener problemas de EMI. Para asegurar tener la instalación de este cable sin pantalla, sin emisiones radiadas en modo común, además es necesario instalar, al lado del filtro sinusoidal, un filtro en modo común que rodee los tres conductores de fase, los dos filtros en la salida del inversor.

Si no es necesario instalar un cable tan largo, y solo necesitamos una longitud de cable menor a unos 200 metros, una segunda buena elección es usar un cable apantallado. Pero ¿qué cable apantallado?, ¿qué configuración geométrica?. La pantalla se utiliza para evitar que el cable radie EMI. Si hay equipos sensibles cercanos al inversor, es necesario usar cables apantallados. Si se instalan varios inversores y los cables van juntos, también es conveniente apantallar los cables. El uso de un cable apantallado aumenta las fugas de corriente debido a su capacidad parásita y limita la longitud máxima del cable instalado.

## Normas

Si el motor no es conforme con la norma IEC 60034-25 (Rotating electrical machines - Part 25: AC electrical machines used in power drive systems - Application guide) y se necesita usar un cable sin apantallar, siempre es recomendable usar como mínimo un filtro  $dV/dt$  en la salida del inversor. Pero, a partir de 50 metros de longitud, es mejor usar un filtro sinusoidal. Si el motor es conforme con la norma IEC 60034-25, si se usa un cable sin pantalla con una longitud máxima de unos 200 metros, no es necesario usar ningún filtro en la salida del inversor. Los cables recomendados deben cumplir con

la norma IEC 61439-1:2019 (Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 1: General rules). Como la norma EN 61800-3/ 2018 (Sistemas de variadores de potencia eléctrica de velocidad ajustable - Parte 3: Requisitos EMC y métodos de prueba específicos) es una norma específica para los inversores de frecuencia, la norma EN 55011/2011 (Equipos industriales, científicos y médicos. Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medición) nunca debe aplicarse a los inversores.

La norma EN 61800-3/2018 especifica los requisitos de CEM para sistemas de potencia con tensiones de entrada y / o salida de inversor de hasta 35 kV CA, en las bandas de frecuencia de 150 kHz a 30 MHz, para las emisiones conducidas hacia la red de suministro y en la banda de frecuencias de 30 MHz a 1 GHz para las emisiones radiadas.

## Capacidades parásitas y corrientes en modo común

Los impulsos de alta frecuencia de la modulación PWM y el corto tiempo de conmutación de los transistores de potencia del inversor, intensifican de varias maneras los problemas de alta frecuencia existentes en el normal funcionamiento de un inversor. Los cortos tiempos de conmutación de los transistores provocan la generación de altas frecuencias. Aproximadamente, el ancho de banda (AB) de las EMI generadas se puede estimar usando esta ecuación:

$$AB = 0,35 / tr$$

con AB en MHz y  $tr$  (rise time: tiempo de subida) en microsegundos. El tiempo de subida  $tr$  es el tiempo de la conmutación de subida de los transistores de potencia del inversor.

Uno de los principales problemas relacionados con la alta frecuencia es la generación de impulsos de corriente parásita que circulan a través de los componentes del inversor debido a las abruptas pendientes de los impulsos de tensión de salida ( $dV/dt$ ) y a las capacidades parásitas inevitables.

Las corrientes de fuga de alta frecuencia, que fluyen por los componentes conductores del inversor

debido a la existencia de capacidades parásitas entre componentes, no están limitadas por ninguna norma relacionada con la CEM de los inversores. Sin embargo, la principal consecuencia de las corrientes parásitas de alta frecuencia, especialmente a través de las capacidades parásitas, es la generación de tensiones de alta frecuencia que se extienden por todos los elementos conductores del inversor. Estas tensiones de alta frecuencia, especialmente las tensiones en modo común (MC), son altamente ruidosas y son el origen fundamental de las emisiones conducidas de EMI en los inversores.

La identificación precisa de los parámetros parásitos de todos los componentes de un inversor en un amplio rango de frecuencias es especialmente difícil, sobre todo a alta frecuencia. Las capacidades parásitas de los componentes del inversor provocan varios efectos a alta frecuencia, tales como: resonancias locales en circuitos parásitos y aumento de la circulación de corrientes en MC nocivas asociadas a ellos.

El aumento de las corrientes en MC generadas en la salida del inversor debido a los efectos de las resonancias en el cable inversor - motor y en los devanados del motor, se propagan a todos los circuitos circundantes y regresan a la red de suministro a través del propio inversor.

El análisis de la propagación de las corrientes en MC en el inversor está relacionado principalmente con la carga conectada al inversor. En un inversor, la pendiente de la tensión de salida ( $dV/dt$ ) es alta, debido a la conmutación rápida de la tensión del bus de corriente continua (CC) durante el tiempo de conmutación de los transistores de potencia. Este análisis permite reconocer más claramente los efectos del cable entre el inversor y el motor. En la figura 2 se muestra una configuración típica inversor-motor, usando un cable apantallado se muestra, donde se presentan cuatro bucles principales de corriente:

- el primer bucle,  $I_{MC, Cable}$ , es relativamente pequeño y permite la circulación de corriente en MC entre el cable del motor y la pantalla del cable, debido a las capacidades internas del cable. La pantalla está conectada correctamente en el lado de salida del inversor,

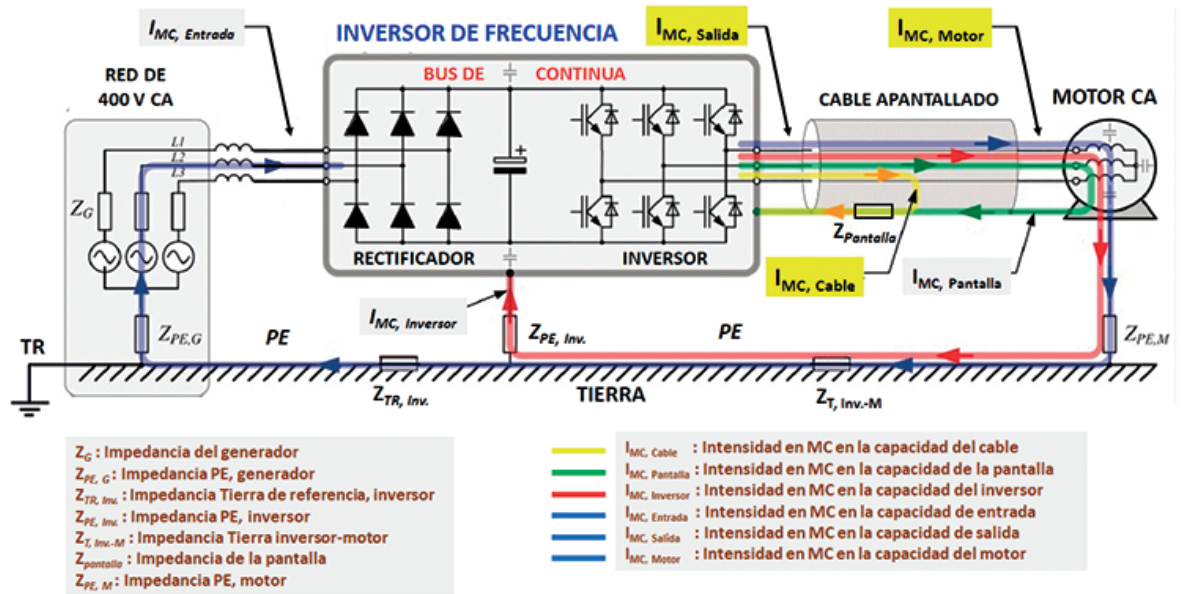


Figura 2. Bucles de las corrientes en modo común (MC) más significativas existentes en un inversor de frecuencia con un cable apantallado entre el inversor y el motor. Impedancias más características. PE: conductor de tierra de protección. MC: Modo Común. TR: Tierra de Referencia.

- el segundo bucle,  $I_{MC,Pantalla}$ , transporta la mayor parte de la corriente en MC del motor. Circula a través de las capacidades del devanado del motor de regreso hacia la envolvente metálica del inversor. El chasis está conectado a tierra a través la pantalla del cable del motor. El cable está conectado correctamente a tierra en ambos extremos, en el inversor y en la carcasa del motor,
- el tercer bucle,  $I_{MC,Inv}$ , transporta la parte de la corriente en MC del motor que circula a través de la conexión a tierra entre la envolvente del inversor y el motor. No pasa por la pantalla del cable del motor. Generalmente es la instalación de la tierra protectora (PE) caracterizada por la impedancia equivalente de la conexión a tierra del motor  $Z_{PE,M}$  y la conexión a tierra de la envolvente metálica del inversor  $Z_{PE,Inv}$
- el cuarto bucle,  $I_{MC,Entrada}$ , es el bucle más grande y conduce la parte restante de la corriente en MC del motor, a través de la impedancia  $Z_G$  de la red eléctrica de suministro y la impedancia  $Z_{PE,G}$  conectada a tierra de referencia (TR) de la red eléctrica.

Los bucles de corriente en MC presentados en la figura anterior muestran que el cable apantallado

y sus parámetros son esenciales para la generación y distribución de las corrientes en MC. De acuerdo con el diagrama del circuito, la corriente en MC total del inversor es la suma de las corrientes en MC del cable apantallado y los bobinados del motor. Sin embargo, el carácter distribuido de las capacidades parásitas causa resonancias entre el cable apantallado y el devanado del motor, lo que complica el análisis de la distribución de corrientes en MC:

$$I_{MC, salida} = I_{MC, Motor} + I_{MC, Cable}$$

El análisis de las corrientes en MC en el inversor es problemático por la dificultad para identificar las características de la impedancia-frecuencia de algunas partes del circuito de corriente en MC, especialmente la impedancia de la red eléctrica de suministro, la impedancia a tierra del inversor y la impedancia de la carga del inversor (cable + motor). Las dificultades para la determinación de la impedancia de la carga en MC de los inversores están asociadas con las capacidades parásitas de los devanados del motor y del cable con referencia a tierra.

Una visión simplista del modo común es que cualquier diferencia de potencial entre dos puntos de tierra hará que circule una corriente a través del camino de menor impe-

dancia. Dado que la diferencia de potencial puede ser debida a la suma de muchas frecuencias diferentes, la solución matemática puede ser extremadamente compleja.

La solución básica es garantizar que todos los puntos de tierra sean equipotenciales, con la ruta de menor impedancia determinada por la instalación y que no sea a través de componentes del equipo que puedan fallar debido a corrientes de tierra no deseadas.

La preocupación principal es que una instalación incorrecta puede introducir en los terminales del motor tensiones mucho más altas que la tensión de aislamiento de los devanados del motor. Además, el camino de menor impedancia en MC puede ser a través de los rodamientos del motor. La circulación de excesiva corriente en MC generalmente acorta la vida útil de los rodamientos y por tanto del motor.

Los cables para inversores están diseñados específicamente para optimizar el control y la operación del motor y minimizar el daño de la corriente de tierra en los cojinetes del motor. El daño que las corrientes de tierra puede causar es la aparición de estrías en las bandas de rodadura de las bolas de los cojinetes, lo que puede provocar un fallo prematuro del motor. Una causa relacionada con los picos alta tensión en los termina-

les del motor es el concepto de onda estacionaria. Las altas velocidades de conmutación de los transistores del inversor permiten que se envíe una cadena de impulsos de tensión de alta frecuencia desde el inversor. Esto puede causar tensiones superiores a la nominal en el motor. Para un tipo de cable en particular, hay una longitud de cable que maximiza estas componentes de tensión. Cuanto más largo sea el cable, la probabilidad de tener picos de sobretensión en bornes del motor es mayor, si no se usa un filtro  $dV/dt$  en la salida del inversor.

### Las configuraciones de los cables

A nivel constructivo, los cables apantallados se clasifican en cables simétricos y cables asimétricos. Para potencias superiores a los 150 kW, es muy recomendable usar un cable simétrico. El uso de un cable simétrico está recomendado por la norma IEC 60034-25.

Si se descarta el uso de un cable sin pantalla, para seleccionar un cable apantallado debemos considerar diversas configuraciones. Las siguientes configuraciones de cable apantallado tienen prioridad de uso 1 a 5.

**Cable de prioridad 1:** la configuración que se muestra en la Figura 3, cuando se termina adecuadamente en los dos extremos del cable, es la mejor opción. Este cable tiene tres conductores de tierra que están distribuidos equilibradamente entre los cables de las tres fases. El cable no introduce desequilibrio de fase. Este tipo de cable tiene la prioridad 1 de uso porque da como resultado las corrientes mínimas en modo común en el circuito de conexión a tierra y minimiza las EMI de alta frecuencia.

**Cable de prioridad 2:** este cable (figura 4) tiene un solo conductor de tierra ubicado en el centro entre las tres fases. Aunque en la figura se muestra centrado, es difícil asegurar que el conductor de tierra está ubicado exactamente en el centro a lo largo de toda su longitud. Ello causa alguna pequeña asimetría.

**Cable de prioridad 3:** este cable (Figura 5) no tiene un conductor de tierra interno y la conexión a tierra se basa únicamente en la pantalla general del cable. Si la pantalla del

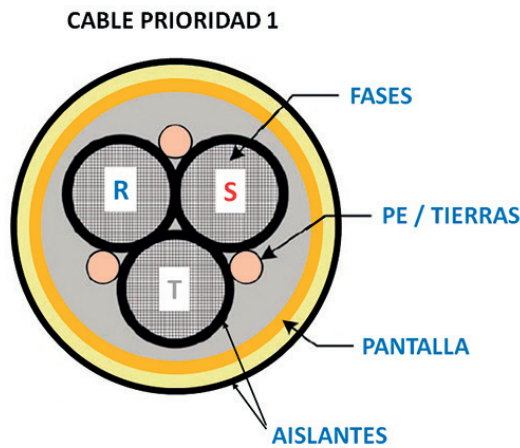


Figura 3. Prioridad 1; cable apantallado simétrico equilibrado con 3 conductores de fase más 3 conductores de tierra (3+3).

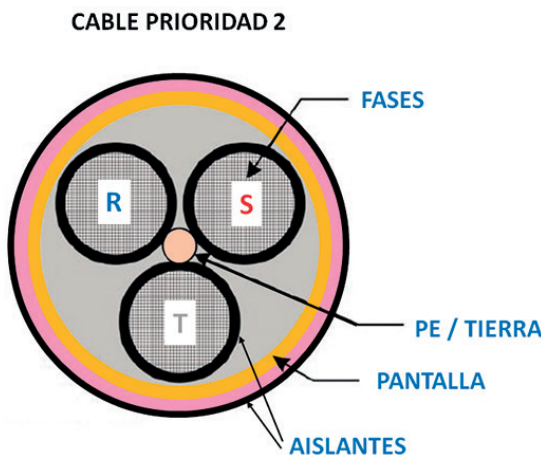


Figura 4. Prioridad 2; cable apantallado simétrico equilibrado con 3 conductores de fase más 1 conductor de tierra (3+1).

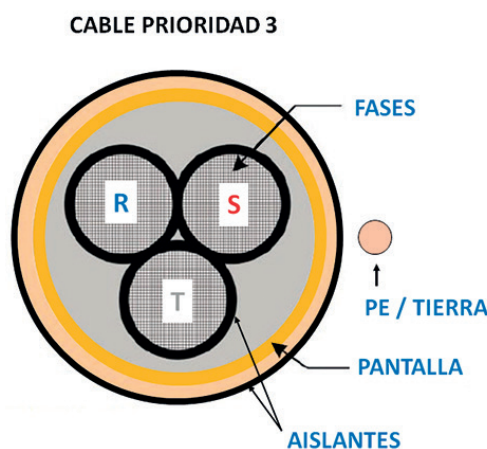


Figura 5. Prioridad 3; cable apantallado simétrico equilibrado con 3 conductores de fase sin cable interno de tierra.

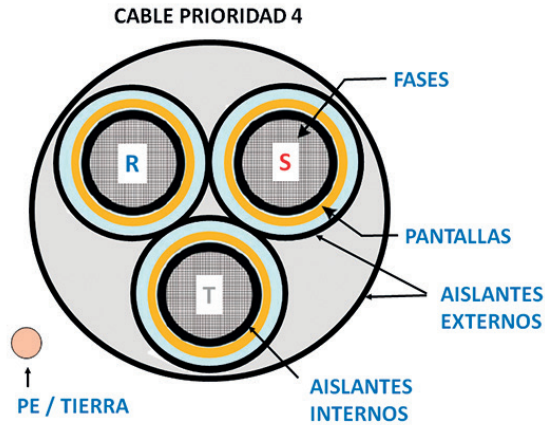


Figura 6. Prioridad 4; tres conductores individuales apantallados sin conductor de tierra.

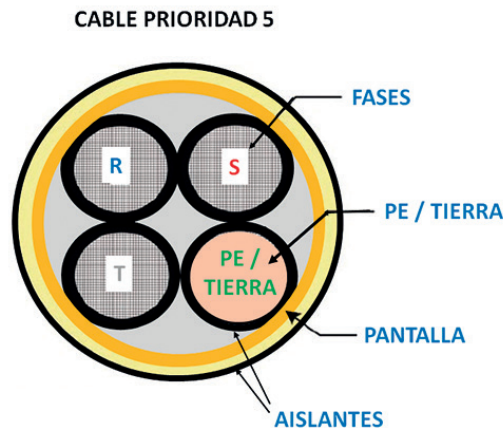


Figura 7. Prioridad 5; cable apantallado asimétrico no equilibrado con 3 conductores de fase más 1 conductor de tierra.

cable del motor se utiliza como único conductor de tierra de protección del motor, la sección debería ser suficiente. En este caso, los fabricantes del cable pueden aportar una mayor sección de la pantalla para dejar circular la corriente entre los dos extremos de la pantalla que deben estar conectados a tierra y bien terminados a 360°. Si no es así se necesita más sección, se puede adjuntar un conductor de tierra PE (conductor de tierra de protección) al lado del cable.

**Cable de prioridad 4:** Este cable (Figura 6) consta de tres conductores de fase individuales apantallados colocados simétricamente. En todas las configuraciones, se requieren conductores de fase simétricos para mantener equilibradas las corrientes de fase con el objetivo de minimizar las corrientes a tierra en modo común

y las emisiones de alta frecuencia. Se debe tener especial cuidado para garantizar la colocación simétrica de los tres cables individuales. También se debe tener en cuenta que, dado que no existe una pantalla trifásica general, las tres pantallas individuales de cada cable deben conectarse a tierra en cada extremo del cable. En el caso de usar este cable con circulación de altas corrientes, se debe añadir un conductor de tierra PE (conductor de tierra de protección) o reforzar la sección de cada pantalla individual.

**Cable de Prioridad 5:** Este cable (figura 7) es asimétrico y tiene efectos electromagnéticos desequilibrados. En este cable hay un desequilibrio de fase independientemente del cuidado que se tome durante la instalación de sus conexiones. Es desaconsejable usarlo, sobre todo si debe ser largo.

## Pantallas

Las pantallas o blindajes generales de los cables pueden implementarse utilizando varios métodos como, por ejemplo:

- Pantalla continua de aluminio coarugado soldado. Generalmente considerada la mejor solución técnica para conectar la pantalla a tierra y reducir las emisiones de alta frecuencia. También proporciona una muy buena protección mecánica. Este tipo de cable es el más costoso y difícil de instalar debido a la rigidez de la pantalla.
- Vaina coarugada y aplicada longitudinalmente con solapamiento. El material es generalmente cobre y proporciona una buena conexión a tierra. La pantalla coarugada se aplana cuando el cable se dobla, proporcionando una pantalla ininterrumpida.
- Cinta plana de cobre envuelta circularmente con un 133–150% de superposición. El nivel de superposición asegura la cobertura si el radio de curvatura no es demasiado pequeño. La separación o los agujeros en la vaina permiten cierto nivel de emisiones no deseadas.

Las pantallas de cobre tejidas se encuentran en algunos cables fabricados específicamente para inversores. Las pantallas no proporcionan una pantalla del 100% debido a los pequeños agujeros en el tejido de cobre.

Como explicación general adicional, una pantalla trenzada de cobre es una forma usual de blindaje. Su resistencia mecánica y flexibilidad ofrecen una mayor versatilidad que, por ejemplo, una pantalla de aluminio. Sin embargo, la pantalla trenzada de cobre tiene algunos problemas de CEM debido a la cobertura limitada de la trenza sobre el cable (típicamente del 70% al 95%). Funciona mejor hasta frecuencias bajas de unos 15 kHz y pierde prestaciones alrededor de los 100 MHz.

Una pantalla laminada envuelve el cable a través de una capa delgada de cobre o aluminio, con una funda de poliéster que aumenta la resistencia mecánica. Funciona juntamente con un cable de drenaje de cobre para conectar a tierra la pantalla. Una pantalla de aluminio proporciona una

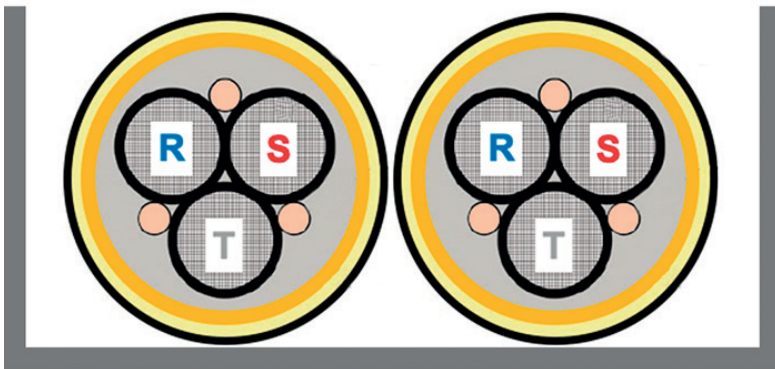


Figura 8. Dos cables apantallados simétricos de Prioridad 1 juntos en una bandeja o conducto.

En radianes:

$$V \text{sen}(x) + V \text{sen}\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) + V \text{sen}\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) = 0 V$$

$$\begin{aligned} 2\pi \text{ radianes} &= 360^\circ \\ \pi \text{ radianes} &= 180^\circ \end{aligned}$$

En grados:

$$V \text{sen}(0^\circ) + V \text{sen}(x - 120^\circ) + V \text{sen}(x - 240^\circ) = 0 V$$

Figura 9. Fórmulas trigonométricas por las que tres tensiones desfasadas 120° acoplan 0 V en el conductor de tierra en un cable simétrico y equilibrado.

cobertura del 100%, lo que es mejor a altas frecuencias, comenzando alrededor de los 10 MHz y llegando hasta los 20 GHz en algunos diseños, pero tiene poca flexibilidad y es frágil.

Una pantalla en espiral generalmente se forma a partir de hilos de cobre envueltos alrededor del conductor. Es más flexible que la pantalla trenzada y proporciona una conexión fácil a tierra. Aunque una pantalla en espiral obtiene una cobertura del 95% o más, es solo efectiva a frecuencias situadas en el rango de las señales de audio, por debajo de 20 kHz. Por ello nunca se debe usar en aplicaciones de potencia como cable entre un inversor y un motor.

Como solución óptima, a menudo una pantalla trenzada se complementa con una lámina de aluminio para proporcionar la resistencia mecánica y la máxima eficiencia de blindaje en un amplio espectro de frecuencia.

Cuando se deben usar cables múltiples trifásicos se requieren varios cables con fines de ampacidad. La ampacidad es la capacidad de conducción de corriente de los cables y es la corriente máxima que un conductor puede transportar bajo condiciones de uso, sin exceder su rango de temperatura. Cada cable trifásico debe disponerse cerca uno al lado del otro en un conducto o bandeja metálica, como se muestra en la figura 8 para dos cables de Prioridad 1, por ejemplo. Deben observarse las reglas de reducción de ampacidad recomendadas por el fabricante del cable.

### Efectos de los cables simétricos y asimétricos

Empecemos por revisar un hecho simple de trigonometría. Si sumamos tres ondas sinusoidales de igual amplitud desfasadas 120° grados, el resultado es cero, como muestran las fórmulas de la figura 9.

En la figura 10 se compara la distinta tensión acoplada en el conductor de tierra entre un cable de Prioridad 5 (asimétrico) y un cable de Prioridad 1 (simétrico). En el cable asimétrico la fase R acopla una menor tensión en el cable de tierra que la que acoplan las fases S o T. El acoplo de tensión de las fases S o T es igual y mayor que el acoplo de la fase R. El acoplo menor de la fase R es me-

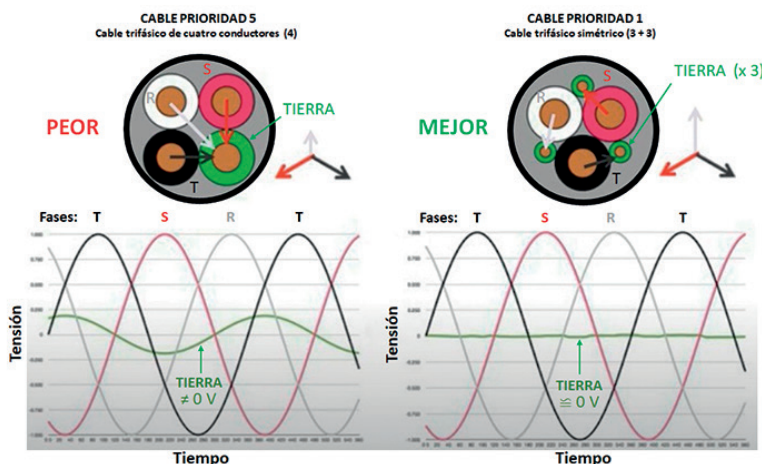


Figura 10. Diferencia de tensión acoplada en el conductor de tierra entre un cable asimétrico de Prioridad 5 (peor) y un cable simétrico de Prioridad 1 (mejor).

nor porque está más separada, por construcción, del conductor de tierra que las fases S o T. Este desequilibrio geométrico, provoca una tensión no igual a cero en el conductor de tierra. La suma de las tres tensiones desfasadas  $120^\circ$  dan como resultado una tensión no nula en el conductor de tierra, ya que esta tierra es parte de un circuito por el que circula corriente en MC y potencialmente daña los cojinetes del motor.

En la figura anterior y las dos siguientes, se muestran de forma gráfica los efectos sumados de los diversos acoplos inductivos y capacitivos en forma de flechas, simplificada en el interior de los conductores. Los acoplos inductivos debidos a las corrientes que circulan por todos los conductores y las pantallas, se deben a las inductancias parásitas de los conductores y pantallas. Sus efectos sobre las corrientes inducidas disminuyen con el aumento de la frecuencia, debido al aumento de los efectos de la inductancia propia y la inductancia mutua entre conductores.

Los acoplos capacitivos debidos a las tensiones en todos los conductores y las pantallas se deben a las capacidades entre los conductores y las pantallas. Sus efectos son mayores a altas frecuencias. Esta suma de efectos depende también de la forma en que esté conectado el cable al inversor y al motor. La tensión que aparece en el conductor o conductores de tierra depende de:

- a) el acoplo de campo magnético (acoplo inductivo entre fases,

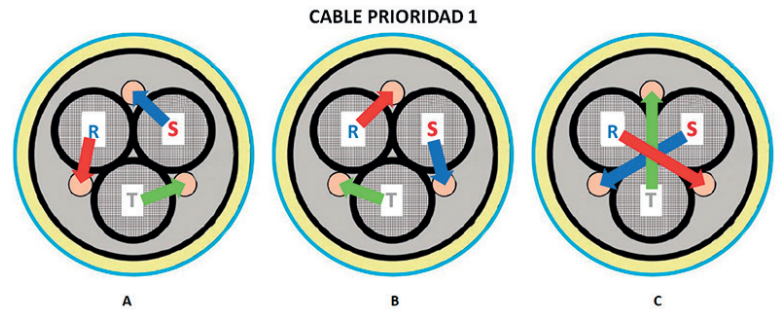


Figura 11. Tensiones acopladas en los conductores de tierra debido a las fases en sentido anti-horario (A), en sentido horario (B) y a las fases opuestas (C).

pantalla y conductores de tierra) debido a la intensidad que circula por cada fase y la tierra. Influye el valor de las inductancias de todos los conductores y pantallas.

- b) el acoplo de campo eléctrico (acoplo capacitivo entre fases, pantalla y tierra) debido a la tensión en cada fase. Influye el valor de las capacidades entre todos los conductores y las pantallas.

Sobre este conjunto de efectos también influye como se conecte todo el sistema inversor – cable – motor. Ahora veamos los efectos en un cable diseñado simétricamente, de Prioridad 1. En la figura 11 vemos las tensiones acopladas en los conductores de tierra debido a los efectos de los conductores de fase con la secuencia en sentido anti-horario, horario y en las fases opuestas. Al ser un sistema simétrico geoméricamente y equilibrado en sus tensiones, se cancelan todos los efectos mutuos.

En la figura 12 se muestran las tensiones de las fases en los cables de prioridad 2 y prioridad 5. El cable de Prioridad 2, al ser simétrico, las corrientes de fuga en el conductor de tierra se cancelan, al ser de igual amplitud y estar desfasadas  $120^\circ$ . Claramente, en el cable de prioridad 5, las corrientes de fuga capacitivas están desequilibradas al tener una menor amplitud de la tensión acoplada de la fase R, debido a su mayor distancia respecto a las fases T y S. De igual manera, el acoplo magnético por circulación de corrientes, incluso equilibradas en las fases, induce sobre el conductor de tierra, cuando está puesto a tierra en ambos extremos una corriente debida a la asimetría geométrica del cable. Ambos efectos, corriente de fuga capacitiva y corriente inductiva se suman en los conductores de tierra. Aquí se ve que no es conveniente usar este cable de prioridad 5, a pesar de que es el cable apantallado trifásico más usual en el mercado en inversores de baja y media potencia. La tensión acoplada en el cable de tierra puede reducir la vida de los cojinetes del motor.

CABLE PRIORIDAD 2

CABLE PRIORIDAD 5

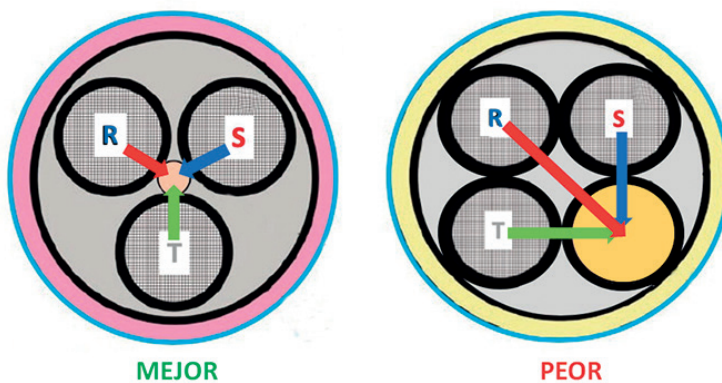


Figura 12. Tensiones acopladas en el conductor de tierra central debido a las fases en el cable de Prioridad 2 y en el cable de Prioridad 5.

### Conclusiones

Siempre es recomendable usar un cable apantallado simétrico entre el inversor y el motor para evitar tener excesivos problemas de interferencias electromagnéticas y también para alargar la vida del motor. El mejor cable a utilizar es el cable simétrico de 3 conductores de fase más 3 conductores de tierra más pantalla. Si el cable es demasiado largo, es conveniente pensar en añadir el filtro correspondiente en la salida del inversor (dV/dt o sinusoidal). □

## REFERENCIAS

- Jaroslaw Luszcz, "Motor Cable Effect on the Converter-Fed AC Motor Common Mode Current", Gdansk University, 2012
- Jaroslaw Luszcz, "High Frequency Conducted Emission in AC Motor Drives Fed by Frequency Converters", IEEE Press Wiley, 2018
- Steve Wetzel, "VFD Cables, Essential or Overkill? , Southwire Company, General Cable 2016
- Chaedler Yesco, Suji Sullivan, "Understand your Risks & Costs in Selecting the Wrong VFD Cable", General Cable, April, 2016 (video en Youtube)
- "Drive Cables for Variable Frequency Drives VFD", General Cable, September 2014 (video en Youtube)
- Ronald Tessendorf, Hiromi Hosoda, Sumiyasu Kodama, "AC Drive Cable Selection", TMEIC Corporation, 2009
- Peng-kang Xie, Jia-zheng Lu, Guo-zhu Chen, Heng-lin Chen, "Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system", Frontiers of Information Tecnology & Electronic Engineering, 2016
- Marco Chiari, "4 Tips on how to limit cable-length related electric motor damage", Schneider, April 2014
- Dennis Kampen, "Differential and common mode passive motor filters", Elincom Block
- Francesc Daura Luna, "Los prensaestopas y la CEM", Revista Española de Electrónica, enero 2018.
- Francesc Daura Luna, "El choque en modo común y las EMI", Revista Española de Electrónica, marzo 2015

**leedeo**  
ENGINEERING  
[www.leedeo.es](http://www.leedeo.es)

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

CONTACTO:  
**Francesc Daura**  
[fdaura@cemdal.com](mailto:fdaura@cemdal.com)  
Avda. de la Vía Augusta, 15-25  
Building B1, 2nd floor  
08174, Sant Cugat 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**.

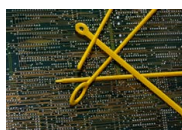
### SERVICIOS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS DE CEM



**SERVICIO PREVENTIVO**



**COMPLETO: MARCADO CE**



**EMISIONES E INMUNIDAD**

