Los cables balanceados / no balanceados y la masa

Artículo cedido por Cemdal

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

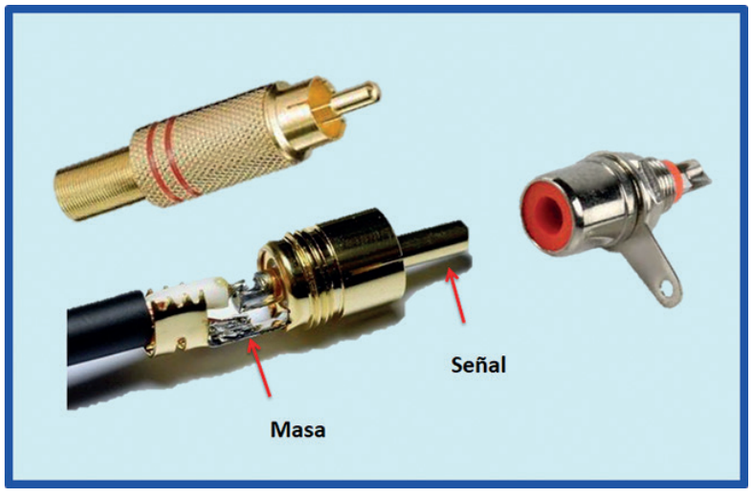

Figura 1. Conector de audio tipo RCA.

En los equipos electrónicos e instalaciones se usan cables balanceados y cables no-balanceados para conectar, por ejemplo, sensores de todo tipo (analógicos y digitales), líneas de comunicación digital, líneas de audio, líneas de teléfono, etc. Los dos tipos de cables conforman dos mundos teóricamente separados e incompatibles. Pero en la práctica se mezclan confusamente, causando problemas de interferencias (EMI). A los cables balanceados también se les llama cables o líneas diferenciales.

En una línea no-balanceada la señal se lleva a través de un cable con dos conductores: el "vivo" y la masa en forma de pantalla o blindaje (en inglés se llama "single-ended line"). Los conectores de señal no-balanceada tienen dos patillas, igual como en el típico conector tipo RCA de audio, utilizado usualmente en los equipos domésticos de alta fidelidad (figura 1) o los conectores tipo jack de 1/4" (6,35 mm) o 1/8" (3,5 mm) no-balanceados (figura 2) usados en los instrumentos musicales y en las salidas para auriculares (en este caso en su versión estéreo). A veces estos conectores también se usan para conectar señales provenientes de sensores no-balanceados. Los conectores de más patillas también pueden llevar señales no-balanceadas. Por ejemplo, un conector XLR-3 (Cannon) de audio profesional (figura 3) con tres patillas (para señales de audio no-balanceadas) podría llevar señal no-balanceada, dejando una patilla sin usar. Los equipos de audio domésticos usan en su practica totalidad conexiones no-balanceadas.

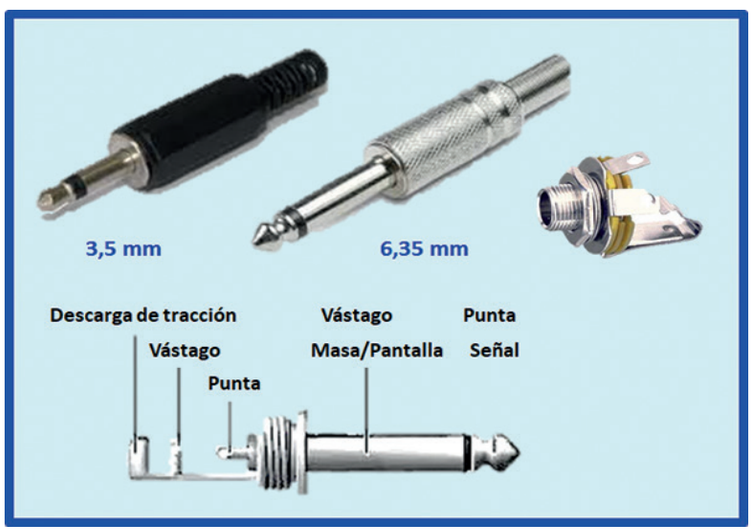

Figura 2. Conectores de audio tipo jack (3,5 y 6,35 mm). Estos conectores monoaurales de audio también se usan para líneas no-balanceadas con otro tipo de señales.

En un cable balanceado hay dos señales. Una señal tiene la polaridad invertida respecto a la otra. También recibe el nombre de línea diferencial. Para llevar una señal balanceada o diferencial como mínimo necesitaremos un conector de tres patillas y un cable con dos conductores trenzados y la masa, que normalmente es el blindaje del cable (figura 4a). Las EMI que no son rechazadas por la pantalla del cable, afectan por igual a los dos cables que llevan la señal. La entrada del dispositivo al que llevamos la señal realiza lo que se conoce como desbalanceado, que consiste en sumar las dos señales que le llegan tras invertir una de ellas. Al haber estado invertida a su vez una señal con respecto de la otra en el cable, el balanceado consigue reforzar (doblar) la señal original y cancelar las EMI que se captaron en el cable.

Las entradas diferenciales proporcionan un mayor nivel de inmunidad contra las EMI externas y, por lo tanto, se recomienda utilizarlas ante un problema de EMI. Esto es especialmente cierto cuando se miden termopares, o galgas extensiométricas, ya que generan señales muy pequeñas, muy susceptibles a las EMI. La figura 4b muestra una línea no-balanceada. El uso de cables balanceados usando un par trenzado proporciona un nivel de inmunidad mucho mayor a las EMI de campo magnético y el blindaje adicional mejora la inmunidad contra los campos eléctricos. No se debe confundir el cable de par trenzado con un circuito

Figura 3. Conector de audio profesional tipo XLR-3 (Cannon).
Patillas: 1: masa , 2: señal polaridad normal , 3: señal polaridad invertida
Normalmente se usan para señales balanceadas de audio. También se pueden usar para señales no-balanceadas usando solo dos patillas.

en equilibrio o balanceado. Son dos cosas diferentes, aunque se utilizan a menudo juntos.

Las prestaciones de cualquier sistema de interconexión entre equipos dependen de las topologías de los circuitos de entrada / salida (esquemas balanceados o no-balanceados), del diseño de la tarjeta de circuito impreso (TCI) y de la instalación de los cables y sus conectores. Aquí sólo vamos a considerar el cableado. Considerando las topologías de los circuitos de E / S ideales para que esta discusión se centre en los problemas de las conexiones. No vamos a entrar en la descripción y problemática de sistemas de comunicaciones estándar, (Ethernet, HDMI, DBI, VGA, Firewire, LVDS, HDMI o USB, etc) porque al tener conectores específicos hacen difícil su mezcla. En cambio, los estándar más extendidos en la industria como el viejo RS-232, o los RS-422 y RS-485, I2C y SPI no tienen asignados conectores específicos y en el diseño de las E / S en las TCI muchas veces es confuso si no se tienen las ideas claras respecto a las líneas balanceadas y no-balanceadas.

Problemas de EMI

Al mezclar cables balanceados y no-balanceados en instalaciones pueden aparecer problemas de EMI. En este caso se deben usar técnicas de aislamiento. Una solución común a los problemas de EMI consiste en desconectar un lado del blindaje, aunque no se pueden comprar cables en el mercado con el blindaje desconectado en un lado. El mejor lado para desconectar el blindaje no tiene importancia en esta explicación. El hecho de que muchos instaladores sigan la regla de la conexión del blindaje en un solo lado indica que a veces esta solución es aceptable, aunque el uso de la tecnología digital y el correspondiente aumento de la frecuencia, ha aumentando la probabilidad de tener mayores problemas de EMI.

Se debe considerar que el blindaje conectado en un solo lado del cable no apantalla contra los campos magnéticos y solo protege el cable contra los campos eléctricos. Una solución de compromiso consiste en proporcionar un camino a las EMI a través de un condensador (≈ 33 nF) conectado desde el lado no conectado de la pantalla al chasis. En este caso, el blindaje está conectado en los dos lados a alta frecuencia y en un solo lado a baja frecuencia. Se recomienda que la unión de un cable se realice con una unión a 360° (a veces llamada unión periférica) en ambos lados para generalmente conseguir las mejores prestaciones posibles, al menor costo.

Justificación técnica

El uso de cables balanceados es una técnica muy útil para la reducción de las EMI. El propósito del equilibrio en una línea balanceada es hacer que la captación de las EMI externas en ambos conductores sea la misma, de forma que esta EMI se pueda cancelar en la carga. Los cables balanceados pueden utilizarse junto a otras técnicas para la supresión de EMI. También son útiles para minimizar las emisiones radiadas.

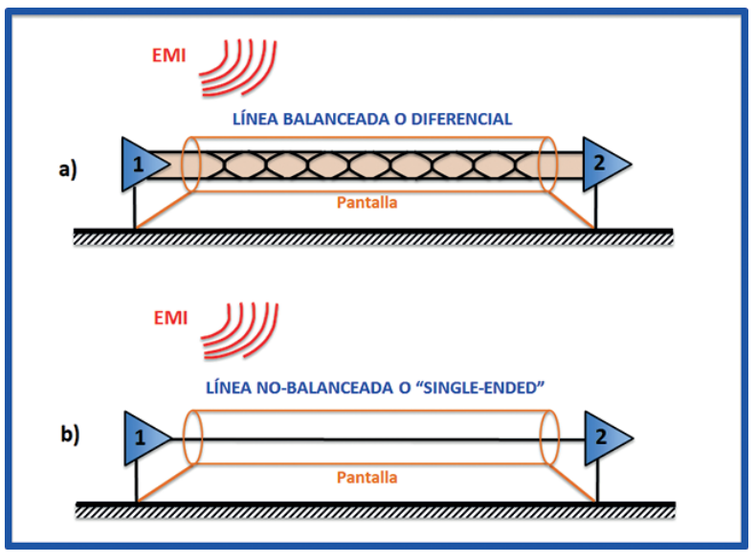

Figura 4. a) Línea balanceada o diferencial. Recomendable que sea un par trenzado apantallado.
b) Línea no-balanceada o "sIngle-ended" apantallada.

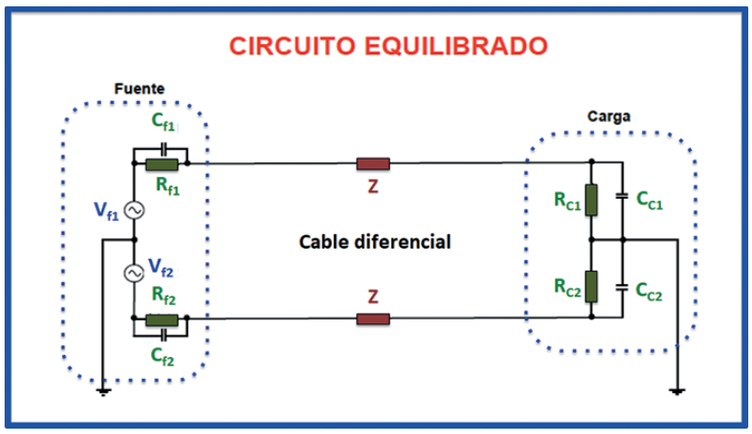

Figura 5. Circuito equilibrado en la fuente: $R_{f1} = R_{f2}$ y $C_{f1} = C_{f2}$. Circuito equilibrado en la carga: $R_{C1} = R_{C2}$ y $C_{C1} = C_{C2}$. Para tener equilibrio no es necesario que $V_{f1} = V_{f2}$.

El equilibrio de un circuito diferencial se define con respecto a la impedancia de los dos conductores de señal en relación a un punto de referencia, que usualmente es la masa de la señal. Si estas impedancias son iguales y no son nulas, el conjunto está equilibrado. Así, en la figura 5, para tener equilibrado todo el circuito se debe cumplir en la fuente $R_{f1}=R_{f2}$ y $C_{f1}=C_{f2}$, en la carga $R_{C1}=R_{C1}$ y $C_{C1}=C_{C2}$. El cable también debe tener el mismo valor de impedancia Z en los dos conductores. El valor de las tensiones V_{f1} y V_{f2} no afecta al equilibrio del circuito y no es necesario que sean iguales.

Si las impedancias en algún punto del circuito son desiguales, el circuito estará desequilibrado. En la figura 6, como ejemplo, vemos que hay un desequilibrio debido a una variación de la resistencia (ΔR_f) de la fuente en el conductor superior. El parámetro CMRR ("Common Mode Rejection Ratio": Relación de Rechazo en Modo Común) expresa el nivel de desequilibrio del circuito o la efectividad de un circuito balanceado para rechazar las EMI en modo común. La fórmula para su cálculo se muestra en la misma figura 6 para el ejemplo presentado. En la fórmula se desprecia el valor de la impedancia de los conductores por ser muy pequeña y ser igual en los dos lados del cable. Su valor en dB es: CMRR(dB) = 20 log(CMRR) y usualmente suele oscilar entre 60 y 80 dB.

Un excelente ejemplo de la efectividad del uso de un sistema equilibrado o balanceado en la reducción de las EMI es el cableado telefónico, donde los niveles de señal son típicamente de decenas a centésimas de milivoltios. Los cables telefónicos (analógicos) suelen funcionar bien aunque estén instalados a lo largo de muchos kilómetros en paralelo a las líneas de red de alta tensión (kilovoltios) al no oírse ningún zumbido de 50 Hz en el teléfono. Esto se debe a que los cables telefónicos están equilibrados al usar preferentemente pares trenzados. En las raras ocasiones en las que se escucha zumbido de 50 Hz en el teléfono, es porque algún desperfecto ha causado un desequilibrio en las líneas. El cableado con par trenzado, incluso cuando no está protegido con una pantalla, es muy efectivo para reducir el acoplamiento de campo magnético de baja frecuencia si se cumplen estas dos condiciones:

- La señal debe circular de igual forma y en direcciones opuestas en los dos conductores.
- El paso de torsión del par trenzado debe ser inferior a 1/20 de la longitud de onda (40 vueltas/metro es efectivo hasta 500 MHz).

Lo anterior es cierto tanto si las terminaciones (impedancias de adaptación) son equilibradas o no. Si las terminaciones son equilibradas, el par trenzado también será efectivo para reducir el acoplamiento de campo eléctrico.

En un sistema equilibrado ideal, las EMI quedan muy reducidas en el circuito. En el mundo real, sin embargo, los pequeños desequilibrios limitarán la supresión de las EMI. Estos desequilibrios pueden ser:

- Desequilibrio en la carga
- Desequilibrio en la fuente
- Desequilibrio en el cable:
  - o Desequilibrio Resistivo (Generalmente Negligible)
  - o Desequilibrio capacitivo (típicamente del 3 al 5%)
  - o Desequilibrio Inductivo:
- Si la conexión del blindaje usa coletas ("pigtails"))
- Usual en los cables blindados con lámina de aluminio debido al cable de drenaje
- Virtualmente no existe a frecuencias > 100 kHz en los cables blindados con trenzado de cobre si están correctamente conectados a 360º

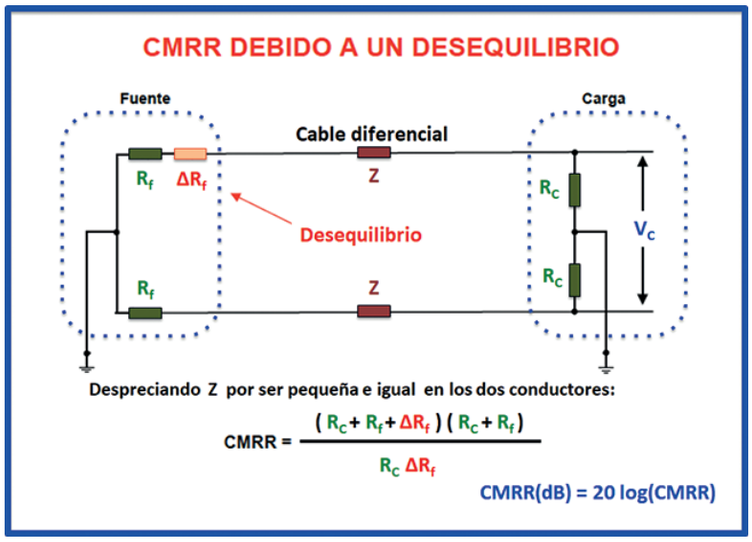

Figura 6. CMRR debido a un desequilibrio en el circuito diferencial. Usualmente se expresa en dB

El chasis y la masa

Examinemos la conexión a tierra del chasis (caja metálica) de un equipo y la conexión de la masa de la señal. La conexión a tierra del chasis es el conductor que conecta el chasis de un equipo a la toma de tierra del edificio. Esta conexión se realiza por razones de seguridad eléctrica para la protección humana contra descargas eléctricas accidentales. En los productos domésticos con un cable de red de solo 2 conductores, el chasis no se conecta a tierra, aunque el chasis está normalmente conectado a la masa de la señal. En los productos con caja de plástico, no hay chasis ni toma de tierra.

La masa de la señal es el conductor interno utilizado como potencial de referencia de 0 V para la electrónica interna. Es fácil confundir la toma de tierra del chasis y la masa de la señal, ya que normalmente están conectadas entre sí. La clave para tener una buena conexión de masa y tierra, con un buen comportamiento electromagnético, es saber dónde y cómo conectar la señal de masa al chasis.

Una de las razones para conectar la masa de la señal al chasis es reducir los efectos del acoplo capacitivo entre el chasis y los circuitos internos. La figura 7a muestra un circuito dentro de una caja metálica (chasis) totalmente cerrada, sin conexiones exteriores. El chasis, por lo tanto, aislará el circuito de influencias electrostáticas exteriores. El circuito está aislado del chasis. Aparecen entonces unas capacidades parásitas del circuito con respecto al chasis.

En la figura se han representado tres de ellas: Ce en la entrada, Cs en la salida y Cm en el conductor de 0V de alimentación, con respecto al cuál están referenciadas las señales de entrada y salida. La figura 7b es el mismo circuito anterior esquematizado de otra forma, donde se ve que las capacidades parasitas han formado una estructura de realimentación desde la salida hasta la entrada del circuito.

La única manera eficiente de eliminar por completo este efecto de realimentación es unir el conductor 0V con el chasis, cortocircuitando la capacidad Cm (figuras 7c y 7d). El circuito interno necesita conexiones de entrada y salida. Cualquier cable entre o salga del equipo violará la norma de que el chasis debe encerrar completamente el circuito protegido y podrá causar problemas por la posibilidad de captar y radiar EMI. La manera de no violar esta norma es prolongar el chasis mediante el uso cables blindados, conectando sus blindajes en los dos lados a los chasis de cada equipo.

Los equipos conectados entre si con cables no-balanceados conectan sucesivas señales juntas directamente a través de cada cable de interconexión. Esto, y el hecho de que el chasis está conectado a la masa de la señal, mantiene muy baja su impedancia. Si los chasis de cada equipo están conectados a la toma de tierra, puede haber diferencia de potencial de múltiples trayectos de retorno, ya que hay varios caminos de retorno (bucles de tierra). Tener una baja impedancia de la masa de la señal entre equipos es esencial para un funcionamiento aceptable de todos los sistemas sin transformador de aislamiento, balanceados y no-balanceados.

Las interconexiones balanceadas no conectan directamente las masas de señal. El conductor negativo de la línea balanceada proporciona la corriente de retorno de señal requerida. Para evitar la pérdida de margen dinámico, los sistemas balanceados utilizan un método diferente para mantener pequeños los potenciales de masa de la señal. Dado que el blindaje del cable conecta los dos chasis entre sí, simplemente al conectar la señal de masa al chasis en cada caja mantiene los potenciales de masa de la señal entre equipos pequeñas. La clave es cómo conectarlos. Dado que los cables entre los equipos también proporcionan el camino más corto (y por lo tanto, la impedancia más baja) entre dos equipos el uso del blindaje del cable para minimizar los potenciales de masa de la señal entre equipos es bastante efectivo. Ahora que sabemos porque se debe conectar de masa de la señal al chasis, vamos a ver cómo conectarlos correctamente.

Se debe prestar mucha atención en analizar por donde fluyen las corrientes. Las corrientes de EMI del blindaje fluyen a través del chasis y se derivan a tierra en los equipos con un cable de red de 3 conductores. El punto clave es que estas corrientes de EMI no se deben compartir con ninguna corriente de señal.

La conexión de la masa de la señal al chasis sólo puede realizarse en un único punto en cada unidad. A este punto se le llama punto de unión de la masa de la señal y la tierra en estrella. Si se conectan en dos puntos distintos, se deja abierta la posibilidad de que las corrientes de EMI circulen a través de un camino compartido por la señal, formando un bucle de masa indeseado que puede provocar problemas.

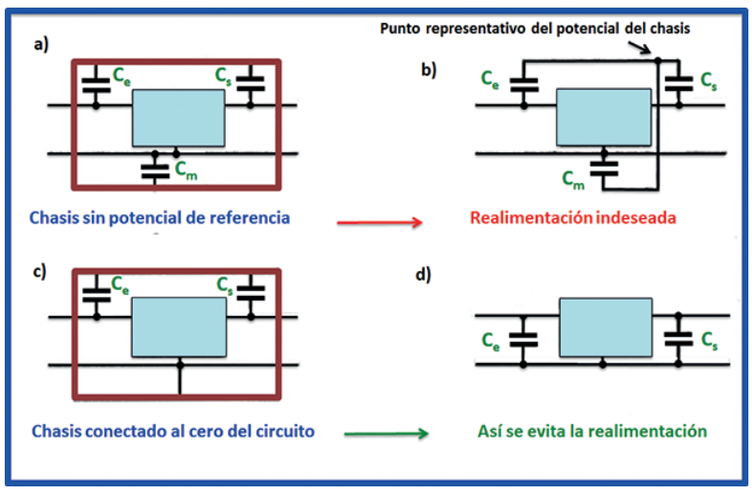

Figura 7. Para que una pantalla electrostática (chasis) sea efectiva, debe estar conectada al punto de referencia de tensión (0 V) de los circuitos que contiene (que pueden estar conectados a tierra o no). Ce: capacidad parásita de entrada. Cs: capacidad parásita de salida. Cm: capacidad parásita entre 0 V y chasis.

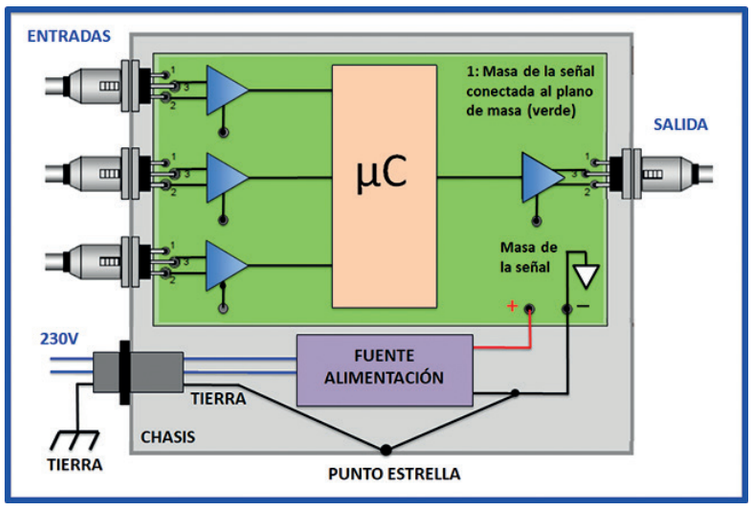

Figura 8. Conexiones correctas de masa y tierra en un equipo con cables balanceados.

La mejor práctica de conexión entre la masa de señal y la tierra es conectar un cable directamente desde el terminal de masa de la fuente de alimentación (terminal negativo de la fuente) hasta el punto de tierra del chasis (figura 8). Es importante no permitir que otras corrientes fluyan a través de este camino de conexión. No se debe permitir que este cable comparta otras corrientes de retorno de otros puntos de circuito conectados a la señal, como la masa del circuito de entrada o de salida. Esto evita que las corrientes de EMI del chasis circulen a través del mismo cable, que es una ruta de retorno para la señal.

También se debe tener en cuenta que por este cable pueden circular corrientes de EMI y debe mantenerse alejado de los circuitos sensibles. Este es un esquema de puesta a masa en estrella que utiliza un punto que se origina en la salida de la fuente de alimentación como el centro de la estrella de la masa. Hay dos lugares comunes en la fuente de alimentación para el centro de la estrella: el terminal negativo de salida de la fuente de alimentación o el punto entre los condensadores de filtro de entrada de red.

Las combinaciones de las conexiones balanceadas y no balanceadas

Veamos como se puede resolver el problema de la incompatibilidad entre los cables balanceados y no-balanceados. Los transformadores de aislamiento y las cajas de interfaz activa son las mejores soluciones. La figura 9 muestra el método correcto especificado por la norma AES48 para las conexiones entre equipos con cables balanceados. En ella se ve como se deben conectar las carcasas de los conectores (el blindaje del cable) al chasis y la patilla de la masa de la señal que debe estar también conectada a la carcasa de los conectores. El blindaje del cable debe conectarse al chasis de los equipos en ambos lados.

Las figuras 10 a 13 muestran el cableado recomendado para todas las combinaciones de interconexiones de entrada y salida, balanceadas y no-balanceadas cuando se utiliza cable blindado de 2 conductores. También incluye los dos esquemas de conexión a masa del blindaje más comunes: la conexión del blindaje al chasis (tierra) y a la masa de la señal. La identificación de estos esquemas para cada equipo en un sistema es esencial para disminuir las EMI. Esto no es una tarea sencilla, ya que el chasis y la masa de la señal están conectados entre sí. Las líneas discontinuas en las figuras representan el chasis de los equipos.

En estas figuras los esquemas de conexionado están dispuestos de tal manera que la figura superior es la "mejor" forma teórica para conectar los equipos para obtener resultados óptimos. A medida que nos movemos hacia abajo en las figuras, debemos esperar una degradación en las prestaciones de las conexiones.

El enfoque es la calidad del cableado, no la configuración de los circuitos de entrada y salida. Se asume que los circuitos de E / S son ideales.

Conexión totalmente balanceada

Las conexiones completamente balanceadas entre dos equipos proporcionan las mejores prestaciones cuando se conectan ambos lados del blindaje del cable a los chasis de los

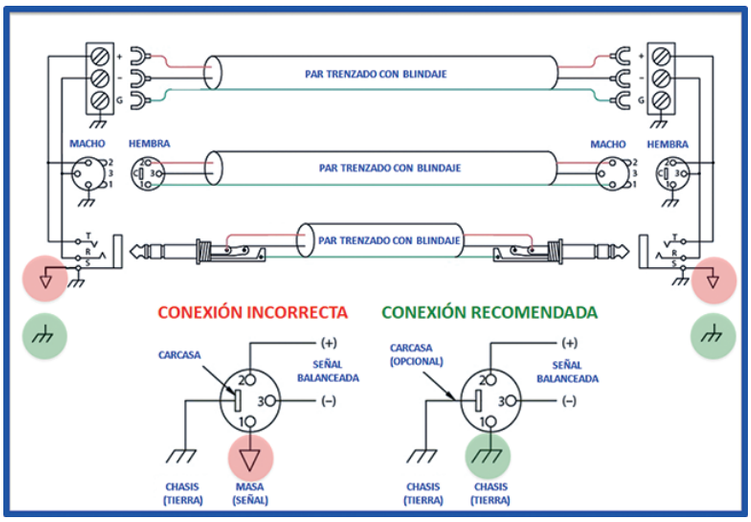

Figura 9. Conexiones correctas recomendadas de cables balanceados (en este caso para señales de audio). En el interior de cada equipo, la masa de la señal queda conectada al chasis en el punto estrella.

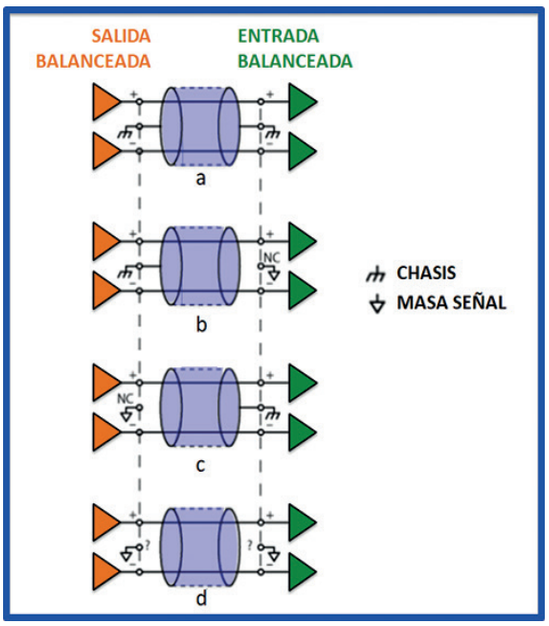

Figura 10.

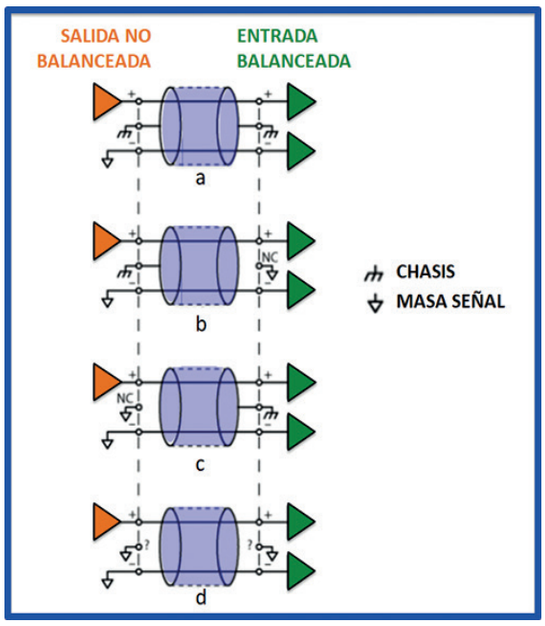

Figura 11.

equipos (figura 10a). Cuando por alguna razón, fuera de nuestro control, se deban conectar los equipos con blindajes conectados directamente a la masa de la señal, sin que se puedan conectar al chasis y, sobre todo, en el caso de tener señales de bajo nivel, debemos desconectar el blindaje del cable en el lado conectado a la masa de la señal (figuras 10b o 10c). Esto mantiene las corrientes inducidas en el blindaje del cable fuera de la masa de la señal. Si ambos equipos involucrados tienen dificultades para conectar el blindaje al chasis y solo están conectadas a la masa de la señal, es el peor caso (figura 10d) y se debería evitar en lo posible. Este es un esquema bastante común pero incorrecto.

La mayoría desconecta un lado del blindaje del cable y siempre se plantea el debate de qué lado debe ser desconectado. Como ya se ha comentado, una solución de compromiso consiste en conectar el lado no conectado a la masa con un condensador (≈ 33 nF) entre el blindaje y la masa de la señal.

En este caso, el blindaje está "conectado" en los dos lados a alta frecuencia y en un solo lado a baja frecuencia. En cualquier caso, nunca de deben desconectar los dos lados del blindaje de un cable. Es peor dejar flotante el blindaje que usar un cable sin blindaje.

Salida no balanceada controlando una entrada balanceada

La figura 11 muestra unas salidas no-balanceadas que se conectan a unas entradas balanceadas. De nuevo, sólo se utiliza un cable blindado de dos conductores. El mejor caso tiene ambos lados del blindaje conectados a los equipos cuyo blindaje está conectado a la masa del chasis (figura 9a). Se podría argumentar que muy probablemente las EMI inducidas en los conductores de señal puede ser inyectada en el equipo que envía la señal a través de la etapa de salida no-balanceada. Esto depende del sistema y del circuito de salida. Si se desconecta el blindaje del cable en la salida no-balanceada se podría reducir este problema.

Cuando se tengan equipos con blindajes conectados a la masa de la señal, se debe desconectar el blindaje en el lado conectado a masa de la señal (figuras 11b y 11c). Esto mantiene las corrientes ruidosas de la pantalla fuera de la masa de la señal de bajo nivel. Si ambos equipos involucrados tienen los blindajes conectados a la masa de la señal, se vuelve a tener un problema, como en el apartado anterior y se debe escoger en que lado conectar el blindaje (figura 9d). Aquí también se puede usar la solución del condensador en el lado no conectado para mejorar a altas frecuencias.

Salida balanceada controlando una entrada no balanceada

Ésta es la configuración más problemática. En ella las salidas balanceadas se conectan a entradas no-balanceadas. Dado que la etapa de entrada no está balanceada, no se pueden rechazar las EMI inducidas en los conductores de señal. Se debería evitar esta configuración, pero si es necesario usarla, se debe utilizar un cable lo más corto posible para reducir las EMI inducidas. Esta es la razón por la que es difícil encontrar cables RCA no-balanceados de más de 3 metros en el mercado. Esta configuración no admite cables muy largos.

La figura 12a muestra ambos lados del blindaje del cable conectados a los equipos con blindajes conectados a masa del chasis. Si los equipos están muy separados, la probabilidad de que las corrientes en el blindaje induzcan EMI en los conductores de señal es mayor. Si se mantiene el cable muy corto, se reduce la corriente en el blindaje y por lo tanto se reducen las EMI que no son rechazadas por la etapa de entrada no-balanceada. Muchos sistemas pueden requerir la desconexión de un lado del blindaje

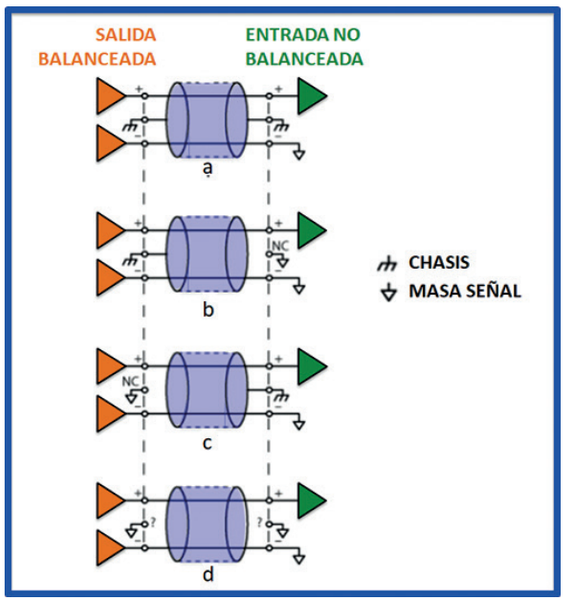

Figura 12.

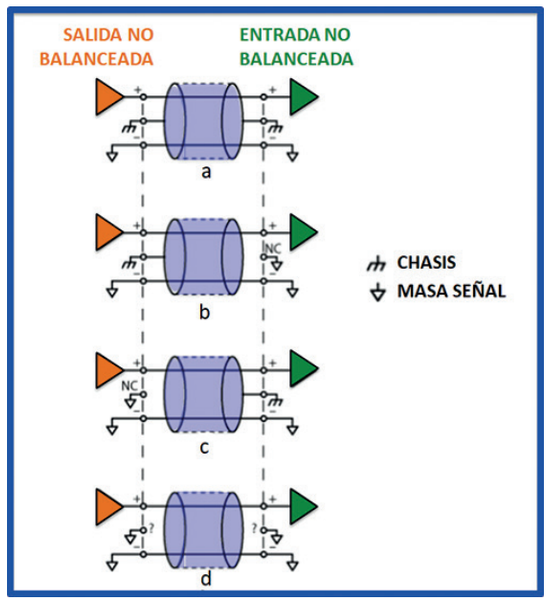

Figura 13.

para el caso de la figura 12a. Incluso una pequeña corriente de EMI en el blindaje puede resultar demasiado alta para una etapa de entrada no-balanceada. Una vez más, se debe considerar conectar el blindaje en un solo lado o usar también en el otro lado un condensador, como en las apartados anteriores. Se debe desconectar de un lado en el blindaje de los equipos con blindajes de masa de la señal (figuras 12b y 12c). Si ambos lados tienen blindajes conectados a la masa de la señal, también se debe desconectar el blindaje de un lado (figura 12d).

Este esquema conecta la salida negativa de la salida balanceada a la masa de la señal, en lugar de a una entrada de alta impedancia. Muchos circuitos de salida balanceada intentarán controlar esta masa de la señal, causando gran distorsión y potencialmente dañando la etapa de salida. Si se utiliza este esquema, se debe asegurar que la etapa de salida balanceada puede manejar correctamente la señal de masa en su salida negativa.

Conexión totalmente balanceada

Los sistemas completamente no-balanceados muchas veces no tienen conectores de 3 conductores o más para permitir el uso apropiado de la conexión un blindaje. En estos casos se hace difícil conectar adecuadamente el blindaje del cable. La figura 13 muestra sus posibles configuraciones. Una vez más mantener las longitudes de los cables cortas reducirá los problemas de EMI, con o sin blindaje.

Por ejemplo, la mayoría de los sistemas de audio domésticos están totalmente no-balanceados. Millones de estos sistemas trabajan prácticamente sin interferencias todos los días, debido al uso de cables cortos y a cables de red 2 conductores, sin toma de tierra. También porque trabajan en un entorno doméstico, electromagnéticamente tranquilo, Los problemas aparecerían cuando se tratara de agregar un equipo profesional con conexiones balanceadas a un sistema doméstico. Muchas veces ocurre algo similar cuando se intenta conectar un nuevo sensor a un equipo industrial que no está preparado para gestionarlo adecuadamente.

Conclusiones

Las interconexiones balanceadas y no-balanceadas tienen dos comportamientos muy diferentes. La incompatibilidad entre estas dos configuraciones, tanto para señales analógicas como digitales, debe tenerse en cuenta al diseñar, especificar, instalar o actualizar equipos. Es importante considerar la forma en que se conectan los dos tipos de interconexiones. Se debe tener el mismo cuidado al conectar los blindajes de los cables de entrada y salida a la masa del chasis o a la masa de la señal. Ω

REFERENCIAS

- *Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility engineering", 2009, John Wiley & Sons*
- *RaneNote 110, "Sound System Interconnection", Rane Corporation, 1985*
- *RaneNote 151, "Grounding and Shielding Audio Devices", Rane Corporation, 2002*
- *Keith Armstrong, "Designing I/Os so they will not suffer from ground loop currents in cable screens (shields)", Cherry Cloud Consultants*
- *Keith Armstrong, "The Benefits of applying IEC 61000-5-2 to cable screnn bonding and earthing", Cherry Cloud Consultants*
- *Norma AES48: "Interconnections – grounding and EMC practices"*
- *J.Balcells / F.Daura / R.Pallàs / R.Esparza, Interferencias Electromagnéticas En Sistemas Electrónicos, 1992, Marcombo*
- *Francesc Daura, "El Mito De Las Conexiones De Los Cables Apantallados", Revista Española de Electrónica, julio 2013*