

La arquitectura de masas y tierras

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 un esquema electrónico complejo muchas veces es difícil determinar la correcta arquitectura de las masas. Lo mismo se puede decir en una máquina o instalación compleja en cuanto a la arquitectura de sus masas y tierras. A nivel de masas, cuando un diseñador de hardware prepara un esquema electrónico para luego ser trazado en una tarjeta de circuito impreso (TCI), debe establecer cual debe ser la distribución o arquitectura de masas de forma clara y sin confusiones. Esta arquitectura se debe preparar independientemente de si el trazado de pistas de la TCI lo va a ejecutar él mismo, o lo va a pasar al diseñador de la TCI en la propia empresa o lo va a subcontratar a una empresa de diseño de TCI externa.

En el diseño de una instalación o máquina también es necesario diseñar la arquitectura de masas y tierras de los diferentes bloques que la integran. Una instalación tiene diversos niveles: cuadros de manobra, módulos funcionales, fuentes de alimentación, autómatas programables, inversores de frecuencia, paneles visualizadores, etc. todo ello interconectado. Muchos diseñadores no ponen la suficiente atención en el diseño de las masas, en cómo se interconectan entre ellas y en como los equipos se conectan a la toma de tierra de seguridad.

Es muy frecuente ver esquemas electrónicos usando un solo símbolo de masa, sin dar suficiente información para determinar como se debe

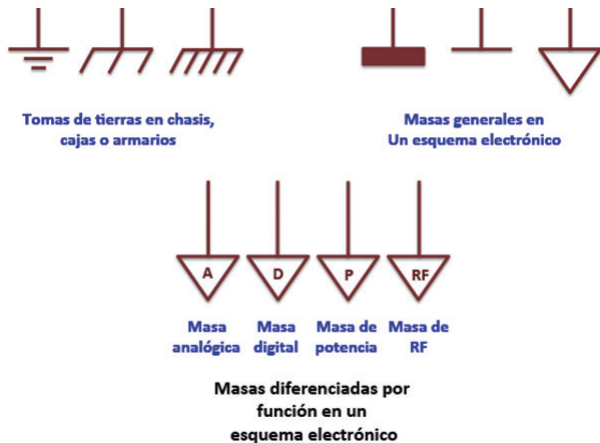


Figura 1. Ejemplos de varios símbolos usuales de masas y tierras.

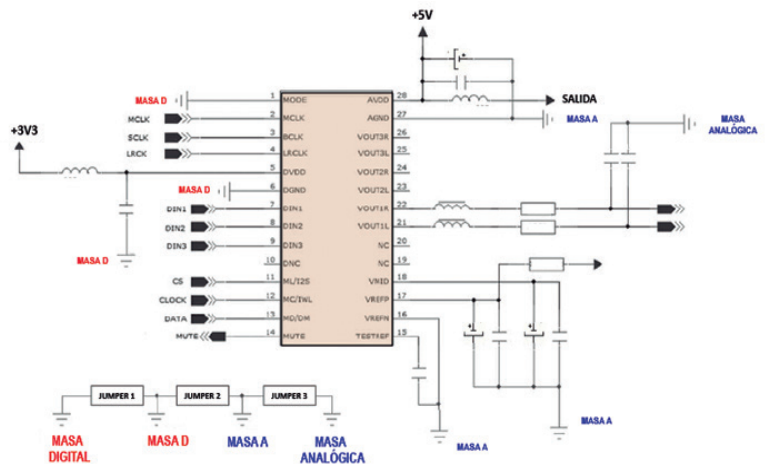


Figura 2. Esquema electrónico con un conexionado confuso de las masas.

realizar su conexionado. En otros casos, el diseñador del esquema usa diversos símbolos de masa y de tierra, como los mostrados en el ejemplo de la figura 1. El uso de varios símbolos de masa no es garantía de que se van a interconectar correctamente. En la figura 2 vemos el ejemplo de un esquema electrónico con varios símbolos de masa. En principio parece que el diseñador ha pensado en usar los diferentes símbolos para aparentemente "aclarar" como deben conectarse las diferentes masas. Pero en la práctica este esquema no cumple con este objetivo. No queda claro como se deben trazar y conectar las diferentes masas. El diseñador ha añadido los "jumpers" para tener un plan B no muy claro. Se supone que conectando o no los "jumpers" podrá solventar los posibles problemas de masa que puedan aparecer. Pero no da la información suficiente al diseñador de la TCI para trazar correctamente las conexiones de las masas. Siempre es aconsejable preparar un esquema adicional de la arquitectura de masas, independientemente de los esquemas electrónicos funcionales, de forma que quede claro como deben trazarse sus conexiones.

Masa y el retorno de la señal

Una forma de evitar tener problemas con el diseño de las masas es saber diferenciar entre los concep-

tos "masa" y "retorno de la señal". Una de las maneras más comunes de tener problemas de CEM debido a un incorrecto diseño de las masas es justamente utilizar en demasía el término "masa".

Una buena forma de diseñar correctamente cualquier circuito consiste en pensar por donde circulará el retorno de la señal que circula por un conductor. No será lo mismo en una TCI, con o sin plano de masa, o en una instalación donde los cables de retorno se pueden trenzar, o no, con los cables de señal. Siempre es mucho más claro tener el hábito no llamar sistemáticamente al "retorno de la señal" con el término "masa". Si nos acostumbramos a tener más cuidado en determinar la geometría del camino de retorno de las señales, evitaremos muchos problemas. Muchos de los problemas relacionados con la CEM son debidos a que los caminos de retorno de las señales han sido mal diseñados.

Cuando etiquetamos el "retorno de la señal" como "masa", pensamos típicamente que la masa es un sumidero universal para todas las corrientes. De este modo, las corrientes de los retornos de señal entran en la conexión de la masa y salen dondequiera que haya otra conexión a masa. Esto es totalmente incorrecto desde el punto de vista de la CEM. Las corrientes de retorno deben seguir muy de cerca las corrientes correspondientes de sus

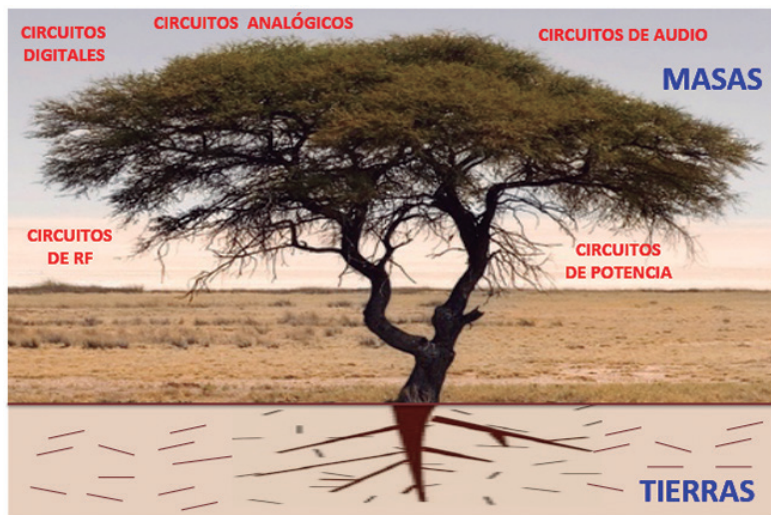


Figura 3. Representación simbólica del árbol de conexiones de masas y tierras.

señales. Sobre todo a altas frecuencias, se debe minimizar la inductancia del circuito del bucle formado por el conductor de la señal y su retorno, minimizando su área. Etiquetar una conexión con el término masa en un esquema es totalmente irrelevante para la señal. Etiquetar un conductor con el término masa no cambiará su comportamiento eléctrico. Lo importante es diseñar bien el retorno de las señales, aunque luego les llamemos "masa". Veamos seguidamente como gestionar correctamente los retornos de las señales y alimentaciones a los que llamamos masa.

Objetivos básicos

Un sistema electrónico complejo puede consistir en una gran variedad de distintos tipos de circuitos que presentan cada uno diferentes características de funcionamiento.

Es conveniente asignar los retornos de sus alimentaciones y de sus conductores de señales en cada subsistema, identificando cada carga conforme a las características de su señal y de su ruido o interferencia electromagnética (EMI). Como ejemplo, algunos tipos de carga podrían ser:

- Alimentaciones de corriente continua (CC) y corriente alterna (CA)
- Señales analógicas de bajo nivel y alto nivel
- Circuitos digitales de alta velocidad
- Señales de RF
- Circuitos de control de potencia

La complejidad de las conexiones de las masas y de las tierras de los sistemas electrónicos se puede asemejar a un "árbol de conexiones de masas y tierras", simbólicamente mostrado en la figura 3. Esta figura representa una muestra de varios tipos de circuitos, cuyas características deben ser abordadas cuidadosamente en el diseño de la arquitectura del sistema de masas y tierras, en relación con el enfoque específico de cada caso, para prevenir acoplamientos no deseados. Es probable que bastantes de estos subsistemas (o todos) deban compartir un punto de referencia común para garantizar la funcionalidad del sistema completo. Sin embargo, a fin de evitar corrientes circulantes entre los circuitos, a menudo se requiere que no exista más de un punto de referencia en el sistema.

La regla de tener un solo punto de conexión a tierra a menudo conduce a esquemas inadecuados, sobre todo cuando se trata de circuitos de alta frecuencia. Sin embargo, en sistemas compuestos que constan de circuitos de baja y de alta frecuencia, debe considerarse alguna variante de la regla de un solo punto de conexión a tierra, al menos en lo que se refiere a los circuitos de baja frecuencia.

En consecuencia, el "árbol de conexiones de masas y tierras" constituye una buena analogía del diseño de la arquitectura de masas y tierras por categorías de circuitos y señales, y sus respectivas interconexiones de masas, en particular, su conexión a la referencia común.

La toma de tierra de seguridad

Una vez queda clara la arquitectura interna de las masas en el equipo es importante determinar como debe ser su conexión a la toma de tierra de seguridad eléctrica. También es importante decidir como debe conectarse la toma de tierra de seguridad al chasis y a sus diversos elementos metálicos. Usualmente el punto de conexión del sistema a la toma de tierra de seguridad se llama PE. Muchos diseñadores usan el término PE por influencia del inglés (PE : "Protection Earth", protección de tierra). En el REBT (Reglamento de Baja Tensión) se le llama CP (Conductor de Protección).

Los componentes metálicos de un sistema, como los armarios o las cajas metálicas de los equipos, los recintos y su estructura metálica (en el caso de máquinas e instalaciones), deben estar bien interconectados para crear una buena equipotencialidad y tener una buena conexión a la toma de tierra (PE). La diferencia de potencial entre ellos debe ser baja. Los beneficios son múltiples: maximizar la protección y la seguridad eléctrica del equipo, eliminar el potencial de riesgo de descarga eléctrica en las personas, aumentar el tiempo de funcionamiento correcto del sistema y reducir los costos al evitar el oneroso servicio postventa de la máquina o sistema.

En la arquitectura de las tierras de una máquina o instalación conviene considerar su protección contra los rayos, si es necesario. Una instalación compleja puede estar situada en el exterior, o una máquina puede tener elementos situados también en el exterior. Siempre es bueno considerar un buen conexionado de las mallas equipotenciales en los cimientos del edificio o en la malla base en una instalación compleja en el exterior, junto con sus conexiones a las picas de tierra y a los pararrayos, para asegurar tener una buena seguridad. La conexión de las tierras puede ser uno de los temas difíciles en el diseño de sistemas complejos. Desafortunadamente, no hay un libro de recetas mágicas que garantice siempre buenos resultados. Conviene por tanto realizar en cada caso un buen análisis de las masas y las tierras.

Tipos de conexionado de masa

En un equipo, todos los puntos de masa individuales deben conectarse entre sí. Existen varios tipos de conexionado de los diferentes puntos de masa de los circuitos, para reducir sus impedancias y con ello las interferencias electromagnéticas (EMI). Una primera clasificación de estos tipos de masa es: masa centralizada con conexión en serie (margarita), masa centralizada con conexión en paralelo (estrella) y masa distribuida (multipunto).

La figura 4(a) muestra el esquema de una masa centralizada con conexión en serie o margarita. La conexión en serie es la más problemática desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética (CEM), al tener diferencias de potencial entre los puntos de masa que pueden provocar acoplamientos por conducción. Ésta es la conexión más simple y por ello es la más utilizada. Pero solo debe usarse en circuitos con bajas frecuencias y con bajos valores de corriente.

La figura 4(b) muestra el esquema de la masa centralizada con conexión en paralelo o estrella. Esta conexión elimina los problemas debidos a la impedancia común en el circuito de masa, pero físicamente necesita mayor longitud de conexionado. Otras desventajas son que la impedancia de una masa individual puede ser muy alta y que las líneas de masa pueden ser generadoras de interferencias (EMI). Este tipo de conexión es el más deseable a bajas frecuencias gracias a que no hay acoplamiento en modo común. Este tipo de conexión es algo engorroso de llevar a cabo, pero es aconsejable en equipos con muchos puntos de masa a conectar. Otra limitación es que no es bueno para altas frecuencias debido a su mayor inductancia.

La figura 4(c) muestra el esquema de una masa distribuida o multipunto. En esta conexión, la impedancia de masa se minimiza usando un plano de masa, de baja inductancia e impedancia con varios circuitos conectados a él mediante conductores muy cortos (o malla). Un buen plano de masa de referencia es una gran superficie conductora que tiene alta conductividad en un amplio margen de frecuencias, llegando a la mayor

frecuencia de interés. Idealmente, además tiene una superficie equipotencial. Asimismo, la impedancia de un buen plano de masa también es pequeña.

El sistema de masa distribuida o multipunto se usa a altas frecuencias para minimizar al máximo la impedancia de masa. Incrementando el grosor del plano de masa no se varía su impedancia a alta frecuencia, debido a que la corriente sólo circula por la superficie a causa del efecto pelicular, por el que las corrientes de alta frecuencia solo pueden penetrar en el metal con una profundidad muy pequeña. Por ello, a altas frecuencias, las corrientes no pueden aprovechar toda su sección. Así, a alta frecuencia, las superficies superior e inferior de un plano actúan como conductores separados.

A frecuencias por debajo de 1 MHz, es preferible usar la masa centralizada (punto único o simple punto). Entre 1 y 10 MHz puede usarse una masa centralizada, siempre que la pista de TCI o el conductor de masa más larga sea menor a $1/20$ de la longitud de onda. En caso contrario debe usarse una masa distribuida. Por encima de los 10 MHz, el sistema de masa multipunto o distribuida es el mejor. De forma práctica puede usarse una combinación de métodos de conexión de masas serie-paralelo que sea fácil, teniendo en cuenta las consideraciones electromagnéticas. La idea consiste en conectar en serie circuitos con propiedades electromagnéticas similares y conectarlos a un punto de referencia único, donde las distintas masas se unen.

Otra clasificación de masas que en algunos casos conviene usar, es la masa híbrida porque tiene un comportamiento distinto dependiendo de la frecuencia. La figura 5(a) presenta una masa híbrida capacitiva que actúa como masa de simple punto a bajas frecuencias y como masa multipunto a altas frecuencias. La figura 5(b) muestra otro tipo de masa híbrida inductiva, menos habitual, que se comporta como masa multipunto a bajas frecuencias y como masa de simple punto a altas frecuencias. Puede usar-

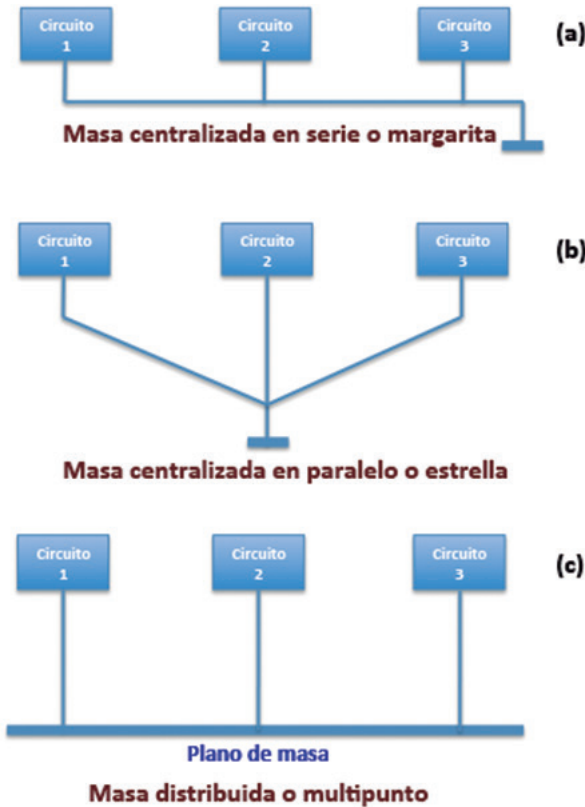


Figura 4. Tipos de conexionado de masa centralizada: a) conexión en serie o margarita. b) conexión en paralelo o estrella. Masa distribuida o multipunto: c) Utilización de un plano de masa para realizar las conexiones de masa en circuitos de alta frecuencia.

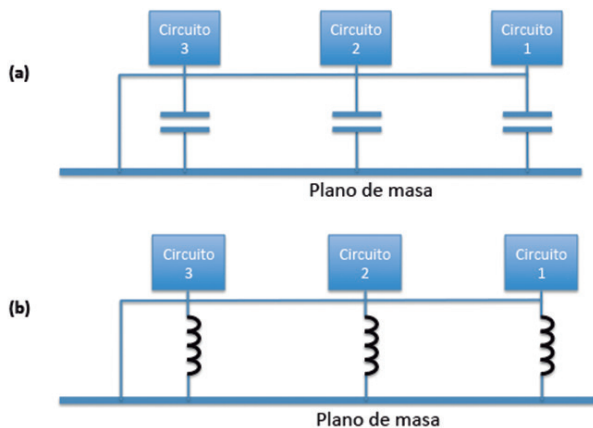


Figura 5. (a) Conexión de masa híbrida capacitiva: se comporta como masa de simple punto a bajas frecuencias y como masa multipunto a altas frecuencias. (b) Conexión de masa híbrida inductiva: se comporta como masa multipunto a bajas frecuencias y como masa de simple punto a altas frecuencias.

se cuando debemos conectar varios armarios a tierra, por seguridad. Las inductancias a masa son caminos de masa de seguridad a 50 Hz, pero son como un filtro a más alta frecuencia. El valor de inductancia aconsejado es de unos 25 μH para tener una baja impedancia a 50 Hz y mucha mayor impedancia a mayores frecuencias.

Metodología de diseño de la arquitectura de masas y tierras

Se presenta seguidamente un procedimiento de diseño de la arquitectura de masas y tierras en un sistema electrónico complejo que consta de diversos circuitos analógicos y digitales, circuitos de alta potencia y de RF. El objetivo principal de este ejemplo es presentar, paso a paso todos los detalles. En la práctica, el diseño del “árbol de conexiones de masas y tierras” se lleva a cabo en dos niveles:

1. “Arquitectura de masas y tierras inter-circuitos” en la que las conexiones de masas y tierras de un sistema integrado en su conjunto se lleva a cabo teniendo en cuenta todos los circuitos y módulos como “cajas negras”.
2. “Arquitectura de masas y tierras intra-circuitos” en la que se presta atención a las conexiones internas de masa en los módulos del circuito.

Paso 1: Identificar la arquitectura del sistema

Examinemos el sistema representado en la figura 6. La primera restricción en una arquitectura de masas es su disposición física. Debemos identificar en el sistema los módulos o bloques funcionales. En este ejemplo, el sistema consta de seis módulos:

1. Una fuente de alimentación conmutada (FAC) que genera las tensiones de alimentación necesarias, convirtiendo la tensión de entrada de red de CA de 230V a varias salidas de alimentación de CC. La FAC es un módulo integrado dentro de una caja metálica.
2. Un CONTROL PRINCIPAL con la unidad central de proceso. Integra un microcontrolador que sirve como control del sistema. Se compone principalmente de cir-

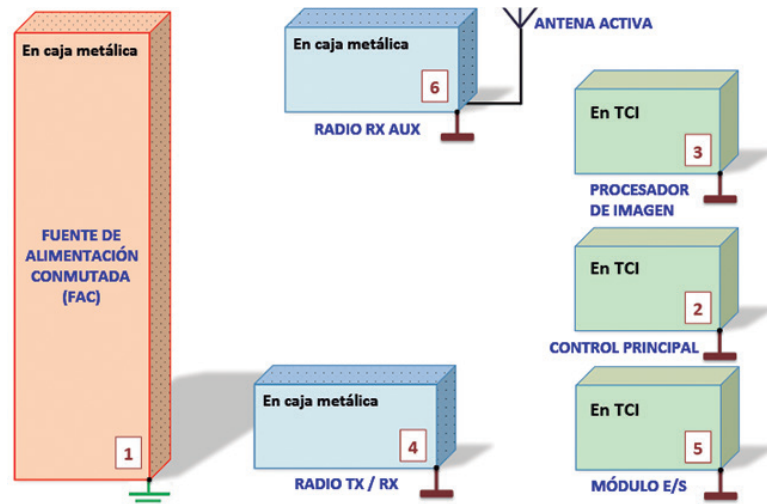


Figura 6. Pasos 1 y 2 – Identificar la arquitectura del sistema y definir las conexiones al chasis a nivel de módulo.

TCI: Tarjeta de Circuito Impreso

cuitos digitales, pero también podría contener circuitos analógicos, principalmente para la gestión de señales de sensores. Este bloque se implementa en una TCI separada.

3. Un PROCESADOR DE IMAGEN, para procesar información de vídeo. Consta de circuitos digitales de alta velocidad y de circuitos de vídeo analógico (tanto de baja como de alta frecuencia). El procesador de imagen se dispone en una TCI separada.
4. Un módulo de radio (RADIO TX/RX) que proporciona una transmisión/recepción de RF de alta potencia. Las transmisiones son digitales, lo que resulta en impulsos de alta corriente durante la transmisión. El módulo RADIO TX/RX se implementa como un módulo en una caja metálica separada.
5. Un módulo de entradas y salidas (MÓDULO E/S) sirve de interfaz entre el sistema y el mundo exterior. Este bloque integra también una interfaz para controlar el módulo 4 de radio (RADIO TX/RX). El circuito de E/S se integra en una TCI separada.
6. Un módulo radio receptor auxiliar (RADIO RX AUX) proporciona la capacidad de recibir un canal de radio con una frecuencia distinta de la sintonizada en el módulo 4, RADIO TX/RX. Es un receptor muy sensible que utiliza una antena activa (es decir, una antena con un amplificador de bajo ruido incorporado (LNA: “Low Noise

Amplifier”). La alimentación de CC para el funcionamiento del LNA se superpone a la señal de RF introducida por la línea coaxial de bajada. El bloque RADIO RX AUX se integra en una caja metálica dedicada.

Paso 2: Definir las conexiones al chasis a nivel de módulo

Cuando un módulo se integra dentro de un recinto metálico, es aconsejable conectar todo a la masa de CC. Los elementos metálicos flotantes eléctricamente en un sistema pueden comprometer potencialmente la inmunidad del sistema contra las descargas electrostáticas (ESD) y transitorios rápidos (EFT) cuando existen altas tensiones, éstas también pueden comprometer la seguridad eléctrica del equipo.

Las conexiones a masa de las partes metálicas internas, tales como las cajas metálicas de los módulos pueden tener un impacto en la arquitectura de masas del sistema y, por lo tanto, deben tenerse en cuenta en las primeras fases del diseño de las masas. En el ejemplo presentado en la figura 6, las cajas metálicas de los módulos (FAC (1), RADIO TX/RX (4) y RADIO RX AUX (6)) están unidas al chasis del sistema, que también sirve como referencia para las señales. Los otros tres módulos (PROCESADOR PRINCIPAL (2), PROCESADOR DE IMAGEN (3) y MÓDULO E/S (5)) no

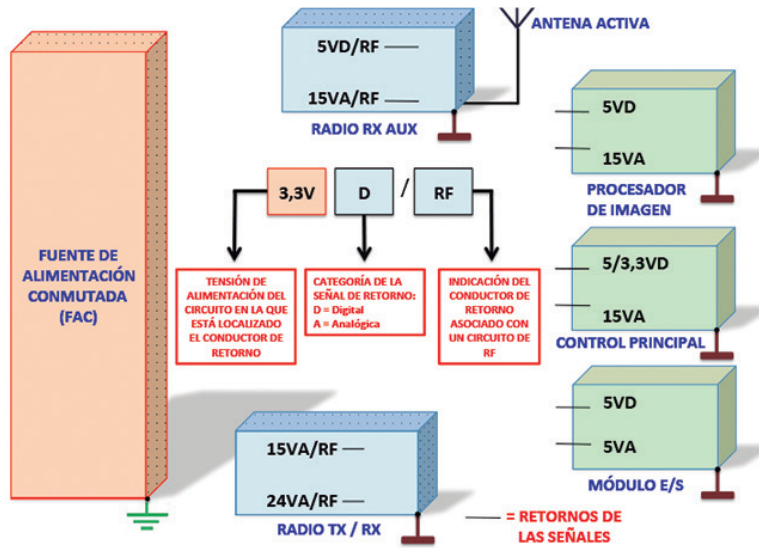


Figura 7. Paso 3 – Definir los requisitos de los retornos de señal de cada módulo.

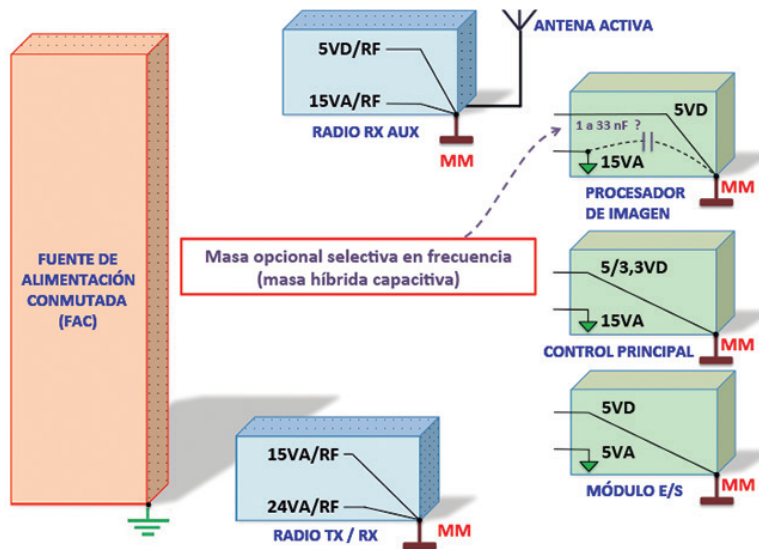


Figura 8. Paso 4 – Identificar los requisitos de aislamiento y conexión al chasis. MM: Masa Multipunto.

están montados en una caja metálica. Sin embargo, su construcción puede incluir un disipador de calor, que, para tener una mejor transferencia de calor se acostumbra a unir térmica y eléctricamente a la envolvente metálica del sistema.

Paso 3: Definir los requisitos de los retornos de señal de cada módulo

Los retornos de las señales de los módulos se asignan en cada circuito en la figura 7, siguiendo la notación presentada en el centro de la misma figura. Usando esta notación, por

ejemplo, el conductor de retorno 5V se interpreta como el conductor de retorno para el circuito digital alimentado a 5V, mientras que 15 VA / RF se interpreta como el retorno del circuito de RF analógico alimentado desde una fuente de alimentación de 15 V. Todos los conductores de retorno o referencia necesarios para el funcionamiento de los diferentes circuitos y módulos se añaden al diagrama.

En el diseño específico de las masas en las TCI, usualmente se usan planos de masa que sirven como caminos de retorno para las señales digitales y analógicas. En estos casos

se deben aplicar las reglas de diseño de los planos de masa considerando los retornos para cada tipo de señal, sin separarlos.

Paso 4: Identificar los requisitos de aislamiento y conexión al chasis

En la figura 7 todos los conductores de retorno se representan sin indicación de su punto de conexión a la estructura del chasis o del punto de referencia de las señales. Sin embargo, en los circuitos digitales de alta velocidad, a nivel de TCI, la masa debe ser multipunto. En la figura 8 se muestran las conexiones al chasis implementadas localmente a nivel de módulo usando la topología de conexión a masa multipunto (MM): Masa Multipunto). Los conductores de retorno analógico no están conectados al chasis a nivel de la TCI. Esto también se aplica en los retornos de las señales de vídeo, que contienen tanto señales de baja como de alta frecuencia. Para estos tipos de circuitos, se podrían aplicar conexiones a masa selectivas en frecuencia por medio de pequeños condensadores (de 1 a 33 nF), proporcionando conexiones a masa multipunto para alta frecuencia y de punto único (o estrella) para la baja frecuencia, es decir, una masa híbrida capacitiva.

Paso 5: Definir la toma de tierra de seguridad (PE)

Una topología de conexión a masa debe proporcionar una referencia común con muy baja diferencia de potencial entre los puntos de masa, para obtener un bajo nivel de EMI en modo común para las señales que se comunican entre partes específicas del sistema

Una vez que la forma de conexión a masa se define para cada uno de los conductores de retorno, se debe definir un punto de tierra común de seguridad a nivel de sistema. En la figura 9 se muestra la posición de diferentes opciones para la asignación de la toma de tierra común, que sirve como punto único de toma de tierra. Puede haber casos en los que la conexión a una tierra multipunto sea una mejor opción en todo el sistema, sobre todo si el sistema comprende

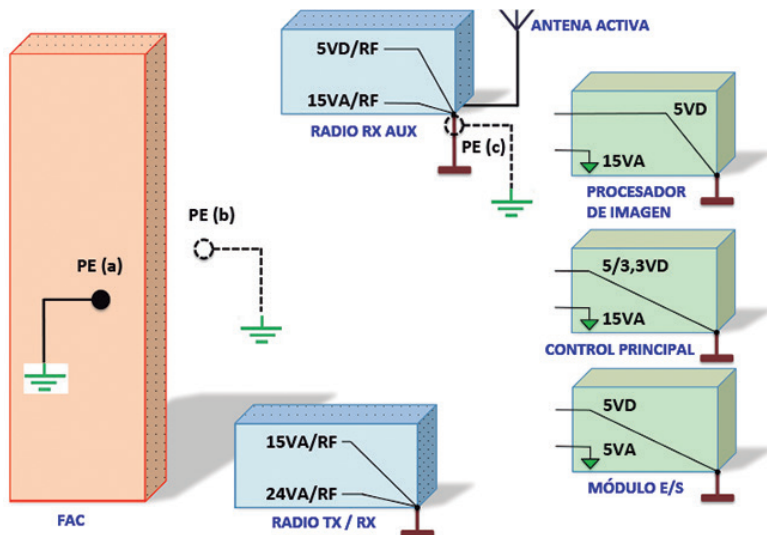


Figura 9. Paso 5 – Definir la ubicación de la toma de tierra de seguridad (PE). Opción (a): cerca de la fuente de alimentación. Opción (b): dentro de la FAC. Opción (c): cerca del módulo más sensible

muchos circuitos de alta frecuencia. Sin embargo, cuando se refiere a sistemas mixtos, se aplica a menudo una topología de tierra mixta. Puede haber casos en los que pueden usarse otras topologías a nivel de sistema, tales como la conexión en serie (margarita), aún considerando sus limitaciones de baja corriente y frecuencia.

El punto de conexión de toma de tierra PE proporciona la conexión común entre todos los conductores de retorno del sistema. La ubicación del punto PE se determina en función de varios factores decisivos, como:

1. Longitud del conductor
2. Disposición física de los módulos en el sistema
3. Sensibilidad de los componentes del sistema
4. Requisitos de la conexión de la tierra de seguridad funcional

Normalmente se consideran tres posiciones principales para el punto PE:

1. Cerca de la fuente de alimentación
2. Dentro de la fuente de alimentación
3. Cerca de los módulos más sensibles

Veamos las tres opciones anteriores que tenemos representadas en la figura 9:

a) Localización del punto PE dentro de la fuente de alimentación. Si hay confianza con respecto a la ubicación del punto PE en las proximidades

de la fuente de alimentación y, en particular, si es una FAC con múltiples salidas, con una caja metálica, la ubicación del punto PE dentro de la FAC es una muy buena opción, ya que el recinto de la FAC se puede unir fácilmente al chasis metálico del sistema, si existe. Esto, de nuevo, asegurará una impedancia mínima de conexión a tierra para los circuitos de baja y alta frecuencia.

b) Localización del punto PE cerca de la fuente de alimentación. La localización más frecuente para el punto PE consiste en estar tan cerca como sea posible de la FAC. Normalmente todos los cables de alimentación se ramifican a partir de la FAC y los conductores de retorno normalmente se conectan a los terminales de retorno respectivos. Por lo tanto, la localización del punto PE lo más cerca posible a la FAC garantiza tener en realidad conductores cortos, lo que es de gran importancia cuando se considera la aplicación de un solo punto de conexión a tierra (en estrella).

Común a las alternativas (a) y (b) y, en especial, cuando el equipo no tiene un chasis metálico que lo envuelva, es el hecho de que la conexión a tierra sólo se puede realizar a través del conductor de tierra de seguridad eléctrica (cable verde/amarillo). La colocación del punto PE dentro de la fuente de alimentación reduce al mínimo la longitud de este cable de conexión de tierra, reduciendo su impedancia.

c) Localización del punto PE cerca del módulo más sensible. Cuando se aplica la topología de conexión a tierra de un solo punto (en estrella), la conexión real del sistema de referencia de la señal, que sirve de punto PE, puede estar situada lo más cerca posible al módulo o circuito más sensible del sistema. En este ejemplo particular, el módulo RADIO RX AUX puede ser el componente más sensible y, por lo tanto, el punto PE se coloca en el punto más cercano a este módulo y, de hecho, comparte esta conexión al chasis.

En la figura 9, el punto PE se sitúa dentro de la fuente de alimentación (opción (a)) como preferible. A partir de aquí, únicamente se tratará el punto PE dentro de la FAC (opción (a)). Además, la caja metálica de la FAC se conecta también internamente a este punto PE interno.

Paso 6: Determinar las conexiones de retorno de los conductores de los módulos con el punto PE

Una vez que se determina la ubicación del punto PE, todo lo que queda es conectar los diferentes conductores de retorno al punto PE. Como se observa en la figura 10, los conductores de retorno de la mayoría de los módulos están efectivamente conectados al punto PE. Si los módulos están compuestos por TCI, estas interconexiones normalmente se realizan en forma de amplios planos de masa. Si no se pueden usar planos de masa, las conexiones de masa pueden tener una inaceptable alta impedancia de masa a altas frecuencias, lo que puede causar problemas de CEM. Cuando no pueden haber planos de masa, las conexiones de retorno se deben realizar utilizando un conductor.

En este caso, se debe tener cuidado para asegurar que la impedancia de los conductores de masa sea tan baja como sea posible, utilizando anchas trenzas de cobre en lugar de cables redondos. En la figura 10, el punto PE sirve también como punto de referencia para los terminales de retorno de los módulos de alimentación, lo que demuestra que realmente sirve como punto de referencia común del sistema.

Figura 10. Paso 6 – Determinar las conexiones de retorno de los conductores de los módulos con el punto PE.

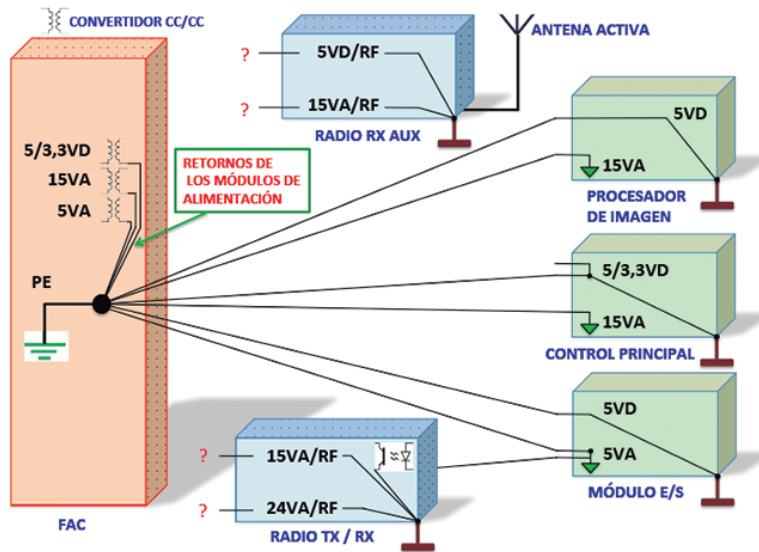


Figura 11. Paso 7 – Identificar los bucles de masa.

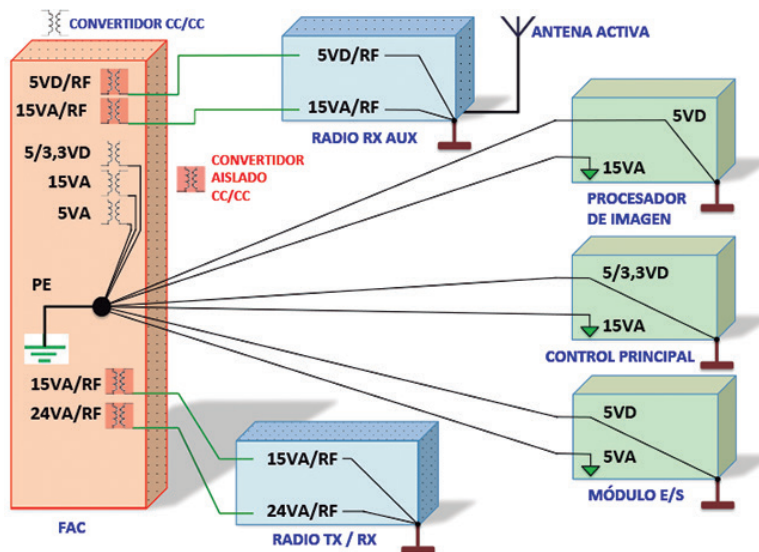
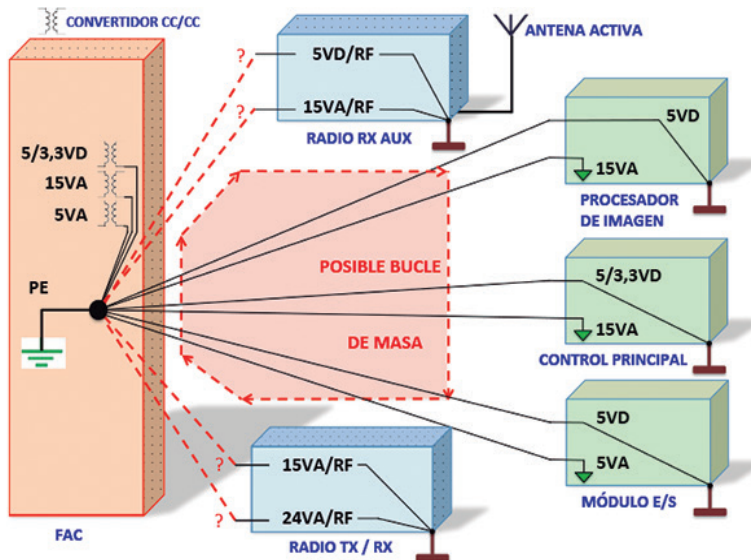


Figura 12. Se necesitan módulos convertidores CC/CC para los circuitos de RF, para evitar los bucles de masa

Se debe recordar que en la figura solo se representa los conductores de retorno del sistema de alimentación, o sea los polos negativos de la FAC; los cables de tensión positiva se omiten en el dibujo para mayor claridad. Varios conductores de retorno no están conectados al punto PE y están señalados con el signo de interrogación "?". Veamos la razón en el siguiente paso.

Paso 7: Identificar los bucles de masa

El denominador común entre estos cuatro interrogantes en la figura anterior es que todos están en los módulos de RF, conectados a masa internamente dentro de su caja metálica que, a su vez, está conectada a tierra a través del chasis del sistema. Pero esto no justifica la exclusión de su conexión al punto PE. Obviamente, si estos retornos fueran a ser conectados al punto PE, en la práctica se llevaría a cabo posiblemente usando un conductor eléctricamente largo (Longitud > $\lambda/10$, con λ = longitud de onda de la mayor frecuencia en el cable), teniendo en cuenta el contenido de muy alta frecuencia utilizado en las señales en estos módulos. Además, realizando esta conexión, estos circuitos se conectarían a masa en dos lugares diferentes en el sistema, formando bucles de masa. Como se ve en la figura 11, el bucle de masa resultante podría potencialmente emitir o captar corrientes de EMI que circularían entre los circuitos y podrían provocar problemas de CEM.

Normalmente los circuitos de RF, como los módulos RADIO TX/RX y RADIO RX AUX, se conectan a una masa multipunto (MM). Sin embargo, en el caso particular de este ejemplo, la potencia de salida del transmisor TX podría ser por ejemplo de +50 dBm (100 W), mientras que el receptor RX, así como el módulo RADIO RX AUX podrían tener una alta sensibilidad (mayor de -120 dBm). Se desea tener un buen aislamiento, del orden de 170 dB a fin de evitar el inaceptable acoplamiento entre los circuitos de RF. A pesar de que la mayor parte de la corriente de retorno de alta frecuencia circularía por los cables de alimentación (camino con menor inductancia), una pequeña parte de la corriente de retorno podría circular

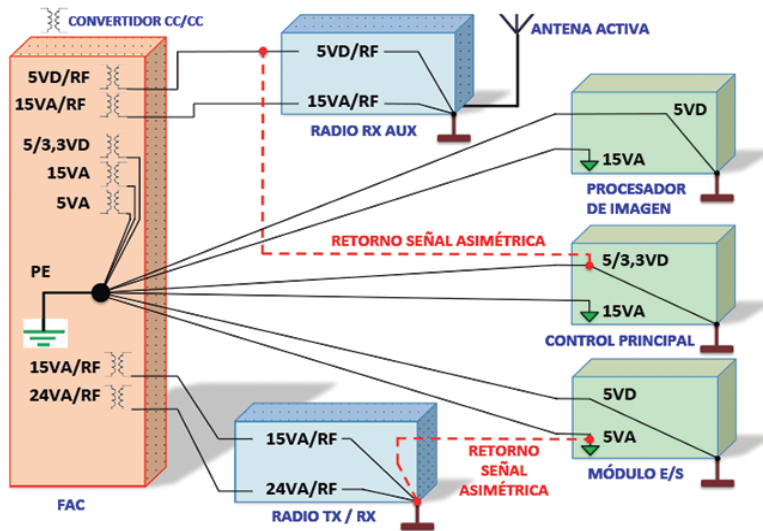


Figura 13. Paso 8: Casos especiales que potencialmente pueden tener problemas con las masas.

por el sistema, acoplándose a través del punto PE al chasis y a los receptores sensibles, causando un problema en su funcionalidad.

Por lo tanto, los bloques RADIO TX/RX y RADIO RX AUX no pueden conectarse a tierra en el punto PE y se deben dejar flotando. Esto da lugar a la necesidad de usar módulos de alimentación (convertidores aislados CC/CC) dedicados a este fin (Figura 12). Observar que sus salidas, tienen terminales dedicados con una notación especial (XX/RF). Es importante que los convertidores CC/CC tengan un buen aislamiento galvánico entre su entrada y su salida, y que estén flotantes entre ellos. Esto se logra fácilmente cuando los convertidores CC/CC son módulos de conmutación CC/CC tipo "flyback", al incorporar un transformador de aislamiento. No obstante, estos convertidores no proporcionan un aislamiento absoluto a las altas frecuencias de RF, debido a las capacidades parásitas entre el primario y el secundario de su transformador, pero se puede lograr un buen control del bucle de masa mediante un adecuado filtrado para proporcionar un buen aislamiento a más baja frecuencia.

Paso 8: Considerar los casos especiales de aislamiento galvánico

En algunos casos, los requisitos de aislamiento galvánico específicos de un sistema pueden requerir una atención especial.

En nuestro ejemplo, se requiere que el circuito del MÓDULO E/S controle el módulo RADIO TX/RX, mientras que el módulo CONTROL PRINCIPAL controla el módulo RADIO RX AUX. Si las señales son asimétricas (no diferenciales) (líneas de trazos en la figura 13), los bucles de masa resultantes son evidentes. Además, cualquier requisito de aislamiento del sistema se opone a cualquier conexión galvánica entre los circuitos externos (los circuitos externos al sistema que hacen de interfaz con el MÓDULO E/S) y los circuitos internos. Este requisito sería violado por la forma en que el MÓDULO E/S esté conectado al módulo RADIO TX/RX. Una problema similar se puede tener en la conexión entre el módulo CON-

TROL PRINCIPAL y módulo RADIO RX AUX, debido al bucle de masa, debido a la muy alta sensibilidad del bloque RADIO RX AUX.

Paso 9: Incorporar medidas de aislamiento para evitar los bucles de masa

Se deben incorporar soluciones para evitar los bucles de masa identificados en el anterior Paso 8. Tales medidas pueden ser, por ejemplo, el uso de transformadores de aislamiento, optoacopladores o el uso de "drivers" y receptores de señal diferenciales. En la figura 14 se observa el módulo de RADIO TX/RX y su conexión al MÓDULO E/S (sólo se presentan los conductores de retorno). La conexión de la señal entre el MÓDULO E/S y el módulo RADIO TX/RX se lleva a cabo a través de optoacopladores, eliminando así la necesidad de cualquier referencia galvánica común entre los dos circuitos.

En el caso de la conexión entre el CONTROL PRINCIPAL y RADIO RX AUX en la misma figura, se utiliza una interfaz digital diferencial, balanceada y aislada de alta velocidad tipo RS-422, que exhibe un alto rechazo en modo común y, por lo tanto, una alta inmunidad a los bucles de masa. Se podrían usar otras soluciones como el uso de choques en modo común (aislamiento no galvánico), muy usados en los filtros de red AC o también en las entradas de alimentación en CC, o el uso de aisladores capacitivos.

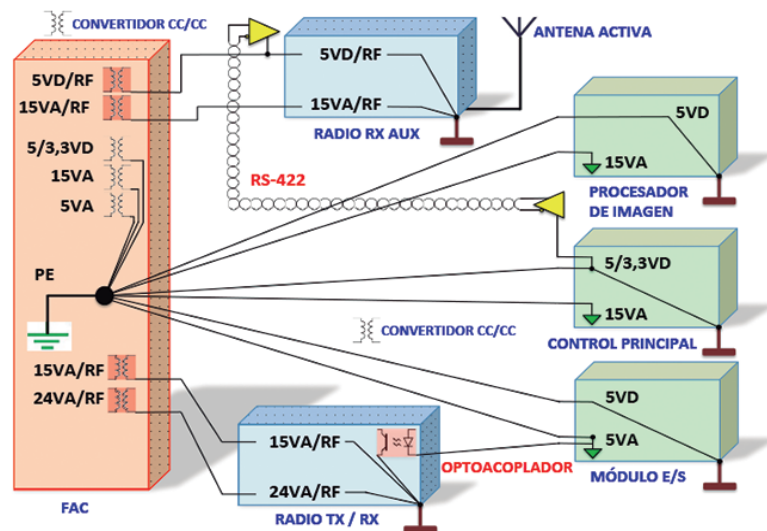


Figura 14. Paso 9 - Incorporar las medidas de aislamiento para evitar bucles de masa indeseados.

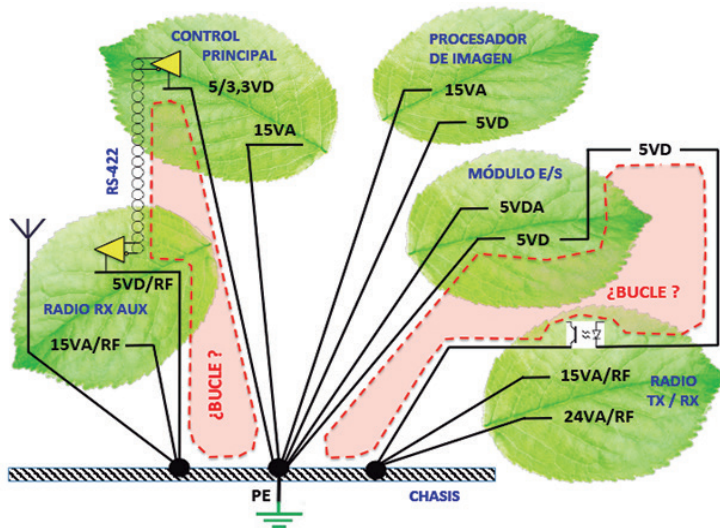


Figura 15. Paso 10 – esquema de la arquitectura de las masas y las tierras.

Paso 10: Arquitectura del árbol de masas y tierras

Una vez que se han ejecutado todos los pasos anteriores, se debe preparar un croquis de la arquitectura de las conexiones de las masas y las tierras. Esto se realiza normalmente mediante la identificación de las conexiones de masa y los conductores de retorno más allá del punto PE, que en este caso se encuentra dentro de la FAC. Por diseño, la FAC consiste en salidas de tensión aisladas. Aplicando esto a nuestro ejemplo, la anterior figura 14 se puede transformar en el esquema de la figura 15. Ahora es fácil ver todas las conexiones de masa y tierra e identificar los posibles bucles de masa u otras conexiones a masa o tierra anormales. Incluso si los bucles no se han identificado en los pasos anteriores, en este diagrama se pondrán en evidencia, lo que permitirá la aplicación de las medidas correctivas.

El esquema de la arquitectura de las conexiones de las masas y las tierras resultante ilustrado en la Figura 15 claramente no forma una topología de punto único de conexión a tierra. Esta arquitectura de conexión a tierra se conoce como conexión de tierra distribuida de punto único, comprendiendo un sistema de múltiples puntos a tierra aislados comunes a un conjunto aislado de circuitos o equipos referenciado a una gran estructura conductora común, es decir, una estructura equipotencial del equipo.

Paso 11: Considerar la arquitectura intra-circuitos de las masas

Ahora debemos examinar el módulo RADIO TX/RX. Hasta aquí, todos los circuitos de masa de este módulo se representan conectados directamente al chasis, utilizando una topología multipunto. En la práctica, sin embargo, resulta que los retornos de los circuitos digitales no pueden ser conectados directamente al chasis simultáneamente junto con los retornos de los circuitos analógicos, debido a las limitaciones de los circuitos internos. Por lo tanto, tenemos dos alternativas para llevar a cabo la conexión a masa y tierra del módulo. En la figura 16 se representa un esquema parcial del sistema de conexión de las masas del módulo RADIO TX/RX.

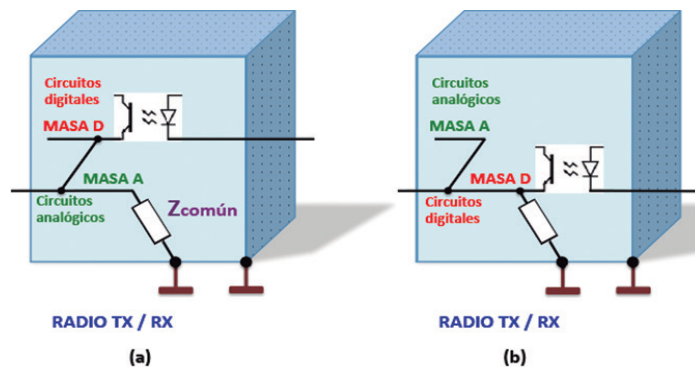


Figura 16. Paso 11 - El dilema de la masa del módulo RADIO TX / RX.
 (a) La masa digital (MASA D) referenciada al retorno analógico (aceptable)
 (b) La masa analógica (MASA A) referenciada al retorno digital (posible problemas).
 Zcomún es la impedancia común de la conexión al chasis

Debido a la limitación en el número de patillas del módulo RADIO TX/RX, no es posible proporcionar al mismo tiempo las alimentaciones digital y analógica con sus conductores de retorno. Sólo se puede conectar un conductor de retorno, digital o analógico. ¿Cuál debería ser? La figura 16(a) muestra la opción digital, en realidad la usada hasta ahora. En este caso, el conductor de retorno analógico (MASA A) está conectado directamente al chasis del módulo RADIO TX/RX, usando la conexión de menor impedancia posible. Mientras, el conductor de retorno digital (MASA D) también está referido al chasis del módulo a través de la masa analógica MASA A. La conexión de la MASA A al chasis forma una unión con una impedancia común ($Z_{común}$) entre el plano de la MASA A y el chasis.

El riesgo de esta configuración es que cualquier EMI digital circulando a través de la $Z_{común}$ al chasis también aparecerá en el circuito analógico como “ruido de fondo” y podría deteriorar su buen funcionamiento. Sin embargo, si la $Z_{común}$ (en particular, la inductancia) se mantiene en un mínimo absoluto, se minimizará al máximo el acoplamiento. Pero, si por otra parte, se utiliza la conexión representada en la figura 16(b), los circuitos analógicos irán sobre el plano ruidoso de la masa digital (MASA D) hacia el chasis.

Incluso si la conexión al chasis es de baja impedancia, existe una alta probabilidad de acoplamiento de las EMI debidas a la $Z_{común}$ ruidosa del retorno digital. En conclusión, en estos casos en los que existe un dilema

en cuanto a la interconexión entre los conductores de retorno analógico y digital, el conductor de retorno de los circuitos sensibles (por ejemplo, la MASA A) debe ser siempre el que esté directamente conectado a la referencia de la señal.

Debemos tener en cuenta que esto constituye un caso especial de masa tipo margarita. En consecuencia, debe incluirse la interconexión entre la MASA A y la MASA D dentro del módulo (arquitectura intra-circuitos), en la arquitectura inter-circuitos de las conexiones de masa.

Paso 12: Definir las especificaciones de las salidas de la FAC

La definición de las especificaciones de las salidas de la FAC se deriva directamente de las restricciones de las conexiones de masa y tierra del sistema.

En nuestro ejemplo, se deduce que la FAC deberá tener:

- Un convertidor CC/CC de 3,3 V / 5 V con un retorno digital común para todos los circuitos digitales.
- Un convertidor CC/CC de 5 V para el MÓDULO E/S.
- Un convertidor CC/CC \pm 15 V para los circuitos analógicos, con un retorno común analógico.

Sin embargo, el módulo RADIO TX/RX requiere:

- Un convertidor CC/CC +/- 15 V con un retorno común analógico para los circuitos de RF analógicos.
- Un convertidor CC/CC de 24 V para los circuitos analógicos de RF.

Por último, el módulo RADIO RX AUX requiere dos salidas adicionales en la FAC:

- Un convertidor CC/CC de 5 V para los circuitos digitales de RADIO RX AUX
- Un convertidor CC/CC de 15 V para los circuitos analógicos de RADIO RX AUX

Paso 13: Definir las conexiones de las masas y tierra en los esquemas electrónicos


Por último, dependiendo de la complejidad del sistema y de su arquitectura de masas y tierras, se debe definir correctamente las conexiones de las masas y tierras en los esquemas electrónicos de todos los módulos que conforman el sistema. Las masas en los esquemas deben ser coherentes con su arquitectura definida en el proceso anterior.

Conclusiones

En el diseño de un sistema, se debe tener cuidado para asegurar que las EMI de alto nivel no deseadas no se acoplen en los circuitos sensibles que comparten la misma masa de referencia. Es importante establecer correctamente los "retornos de la señal". La masa no es un sumidero universal para todas las corrientes.

La construcción de la arquitectura de las conexiones de las masas y las tierras de un sistema complejo debe ser realizada de manera sistemática, paso a paso, teniendo en cuenta la disposición del sistema, los requisitos

de sus circuitos y los requisitos especiales del sistema (por ejemplo, el aislamiento galvánico de algún módulo). El árbol de conexiones de masas y tierras debe ser ampliado para incluir interacciones intra-circuitos además de las interacciones inter-circuitos.

Al final obtendremos un esquema de la arquitectura de conexiones de las masas y las tierras del sistema que deberemos traspasar a los esquemas electrónicos de forma coherente y clara. Esto facilitará el trazado de las TCI y el diseño del cableado del sistema de forma correcta para evitar problemas de CEM. 

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", IEEE Press, Wiley, 2010
- Francesc Daura Luna, "El mito de las conexiones de masa, tierra y chasis", Revista Española de Electrónica, Marzo 2013
- Francesc Daura Luna, "El choque en modo común y las EMI", Revista Española de Electrónica", Marzo 2015
- Todd H. Hubing, Clemson University, "Grounding", 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility
- Bill Whitlock, "Understanding, Finding, & Eliminating Ground Loops", Jensen Transformers, Inc CEDIA Class EST016



www.cemdal.com

CONTACTO:
Francesc Daura
fdaura@cemdal.com
 Taronger 12
 08192, Sant Quirze del Vallès
 T: 93 600 455 492



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

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