

La propagación de las ondas y los circuitos impresos

Artículo cedido por Cemdal

CEMDAL
www.cemdal.com



Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Systeme (ams AG) para España y Portugal

Para seleccionar las mejores prácticas para aplicarlas correctamente en el diseño de las tarjetas de circuito impreso (TCI) de un nuevo equipo es necesario tener una buena comprensión de los principios básicos de diseño electromagnético (EM). Algunos ingenieros que diseñan circuitos digitales, al acometer un nuevo diseño, consideran que, al tener un buen margen de ruido en las señales digitales, no necesitan cuidar su trazado al nivel que lo harían en un circuito analógico. Piensan que es suficiente diseñar más cuidadosamente la zona del reloj del microcontrolador. Cuando consideran las frecuencias de las señales piensan erróneamente que la máxima frecuencia en su TCI es la frecuencia del reloj. Si estos mismos ingenieros debieran diseñar una TCI de radiofrecuencia, seguro que aplicarían varias reglas de buen diseño para evitar los problemas de interferencias electromagnéticas (EMIs), y apantallarían y filtrarían su circuito con esmero al ser conscientes del nivel de las altas frecuencias involucradas.

El problema es que olvidan lo que estudiaron en la escuela de ingenieros sobre las series de Fourier y los armónicos de las señales, es decir, como estimar su ancho de banda.

Si fueran conscientes de esta teoría la podrían aplicar para saber la cantidad de armónicos que tienen las señales digitales y podrían calcular su ancho de banda real, mucho más alto que la simple frecuencia fundamental de cada señal digital en la TCI. Al tener en cuenta las altas frecuencias de las señales diseñarían sus TCIs con el debido esmero desde el punto de vista electromagnético.

Todas las reglas y métodos de las mejores prácticas de diseño electromagnético se basan en la física de las ondas electromagnéticas (EM). Para seleccionar el método más apropiado y aplicarlo correctamente se requiere conocer unos primeros principios de comprensión de la propagación de las ondas EM para considerar sus efectos y tenerlos en cuenta adecuadamente en el diseño de las TCIs.

Ondas guiadas en las pistas

Una TCI está formada por un conjunto de pistas de cobre fijadas en el espacio por un sustrato aislante (dieléctrico, usualmente FR4). Cada pista de cobre es un límite metálico y cuando por ella circula una señal eléctrica genera radiación de campo electromagnético. En todos los límites metálicos (pistas, cables y conductores eléctricos en general) diseñados y realizados correctamente, el campo eléctrico es perpendicular a los límites y el campo magnético es tangencial. Además, la dirección de propagación de la señal es ortogonal a ambos. Todo el tema que sigue está basado en este concepto básico. El ejemplo más simple es una sola pista de cobre en una TCI, como en la figura 1. En ella, la corriente I que fluye a través de la pista establece un campo eléctrico E que se irradia hacia fuera de la pista en todas las direcciones y la abandona en ángulo recto a su superficie. El campo magnético H se establece en la intersección con las líneas de campo E en ángulo recto en todos sus puntos. Esta situación representa el peor de los casos de compatibilidad electromagnética (CEM) debido a que los campos electromagnéticos se irradian sin límite hacia el espacio infinitamente. Esta pista actúa como una antena. La mayoría de las pistas en las TCIs de simple y doble capa entran en esta categoría.

Esta situación se puede mejorar mediante el trazado de una pista de retorno (masa) por debajo de la pista de la señal a una distancia constante como en la figura 2. Gran parte del campo eléctrico E queda ahora confinado en el espacio entre las dos pistas. El confinamiento del campo eléctrico E se puede mejorar aún más si se aumenta la permitividad ϵ_r del sustrato dieléctrico (mayor a la ϵ_0 del vacío = 1, y ϵ_r del aire = 1,0006). En el caso del usual dieléctrico FR4, su $\epsilon_r = 4,7$.

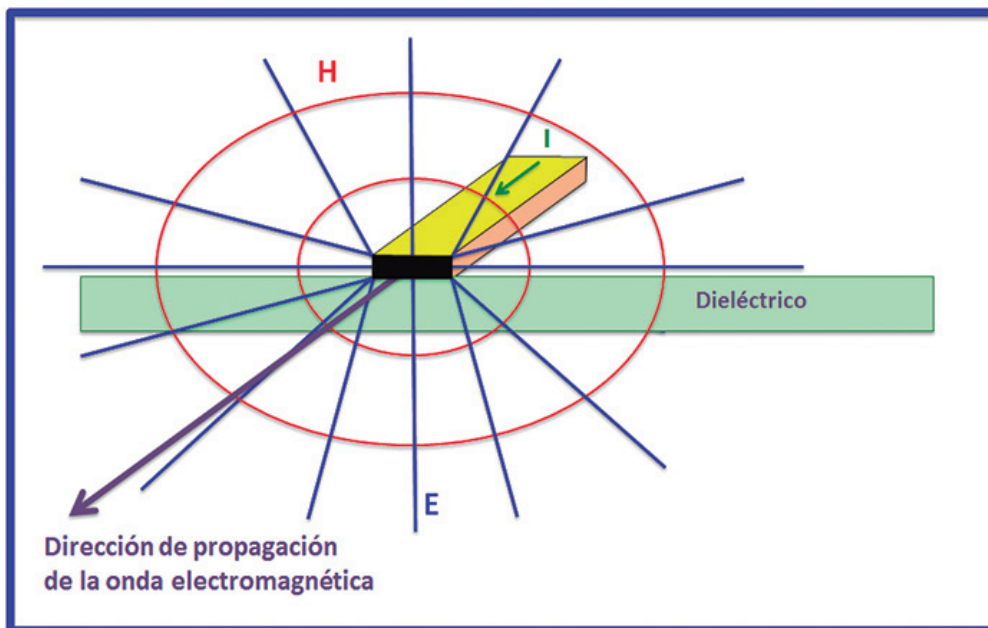


Figura 1: Pista sobre sustrato dieléctrico en una tarjeta de circuito impreso mostrando los campos magnético H y eléctrico E

Además, si las dimensiones y la separación de las pistas permanece constante esta pista se comportará como una línea de transmisión de impedancia constante. Las líneas de transmisión se utilizan para llevar señales rápidas de alta frecuencia entre dos puntos de una TCI. No obstante, esta forma de línea de transmisión se utiliza muy poco en TCIs.

Es más común y eficaz trazar líneas de transmisión con un plano de referencia (masa), como en la figura 3. Esta configuración se llama "microstrip". Una vez más, la mayor parte del campo eléctrico E está confinado dentro del sustrato, entre la pista y el plano de masa. Además, hay muy poca radiación debajo del plano de masa (idealmente ninguna). La razón principal para el uso de un plano de masa de referencia es que permite trazar muchas líneas de transmisión en una TCI, cada una con un camino de retorno compartido en el plano de masa.

Si la TCI fuera una multicapa de 4 capas como mínimo y la pista se trazara entre dos planos de referencia se llama "stripline" (figura 4). Los planos de referencia pueden ser masa y masa o alimentación y masa. En esta configuración, los dos planos de referencia actúan como blindajes, confinando los campos eléctrico E y magnético H en su interior. Las líneas de transmisión tienen una impedancia constante a lo largo de su longitud, independientemente de su trazado

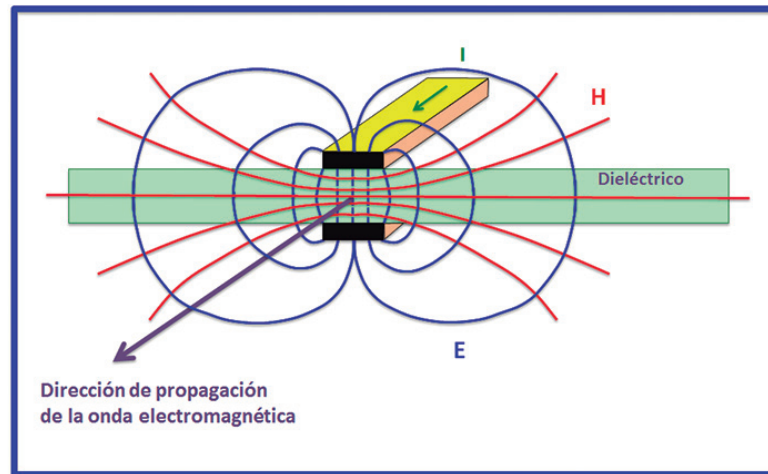


Figura 2: Dos pistas (señal y su retorno) en el sustrato dieléctrico en una tarjeta de circuito impreso mostrando los campos magnético H y eléctrico E

y de su longitud. Esta propiedad es muy deseable. Pero esto no es así para las más altas frecuencias en las que, esquinas abruptas en una pista pueden causar reflexiones. La impedancia característica Z_0 de una línea de transmisión depende del grosor de cobre, el ancho de pista, la distancia al plano de masa y la permitividad del material dieléctrico entre la pista y el plano. Para que la impedancia de la línea sea constante todas estas propiedades deben permanecer constantes. Si hay un cambio brusco en la impedancia característica se producirá una falta de coincidencia, lo que resultará en que una parte de la señal transmitida se reflejará de nuevo en la pista. Para evitar esto, los cambios de dirección de las pistas se deben redondear o hacer un chaflán a 45° (figura 5).

Las líneas de campo cambian abruptamente en una vía en una

pista. Por lo tanto, las vías son una fuente de reflexiones, en particular, si la pista cambia de capa a través de una vía, porque tiene distintas distancias de separación al plano de masa y cambia su impedancia característica Z_0 . Por esta razón, en las pistas con señales de alta frecuencia conviene minimizar al máximo los cambios de capa y siempre trazarlos junto a un plano de referencia (figura 6) para reducir al máximo la variación de la Z_0 .

Los planos de referencia

La figura 7 presenta los campos asociados a dos planos de referencia paralelos en una TCI. Estos planos de referencia pueden ser masa y masa o alimentación y masa. Ambos campos eléctrico E y magnético H quedan confinados entre los dos planos, con algunas aberraciones que ocurren sólo en los límites de los planos. Por esta razón, los planos de referencia son apreciados por los diseñadores de TCIs, pero se debe tener cuidado en su diseño porque algunas veces no cumplen con las expectativas.

Si se asume que los planos de referencia de alimentación y de masa están acoplados a un circuito integrado (CI) en un único punto de origen en la vía que se conecta a la patilla de alimentación. La alimentación de los CIs digitales se puede modelar como una fuente de impulsos de ruido (EMI) (figura 8). Los cortos impulsos de corriente se generan cuando las salidas digitales cambian de estado, debido a la configuración de los transistores

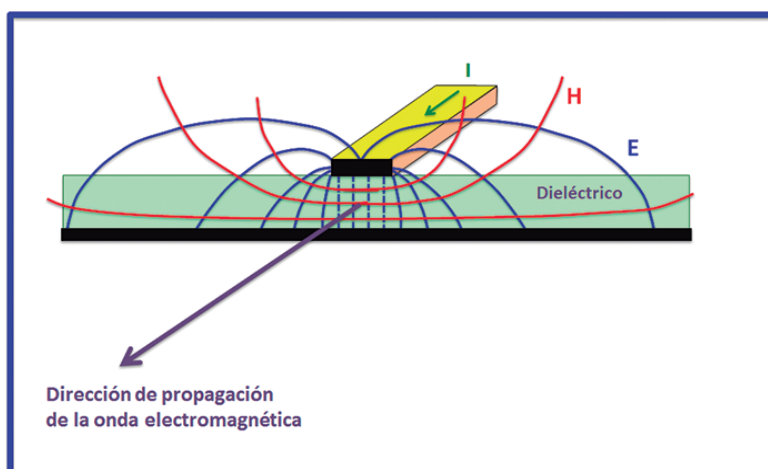


Figura 3: Pista sobre sustrato dieléctrico en una tarjeta de circuito impreso ("microstrip"), con un plano de referencia (masa) mostrando los campos magnético H y eléctrico E

Figura 4: Pista en una tarjeta de circuito impreso, entre dos planos de referencia, mostrando los campos magnético H y eléctrico E. Los planos de referencia pueden ser masa y masa o alimentación y masa.

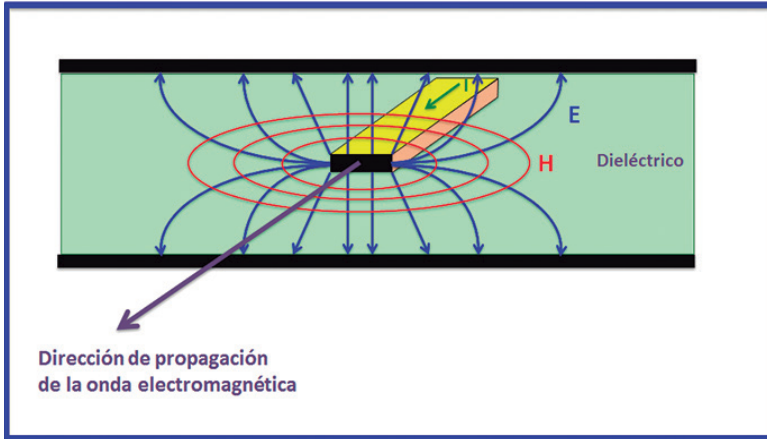


Figura 5: Como realizar el trazado de los cambios de dirección de las pistas.

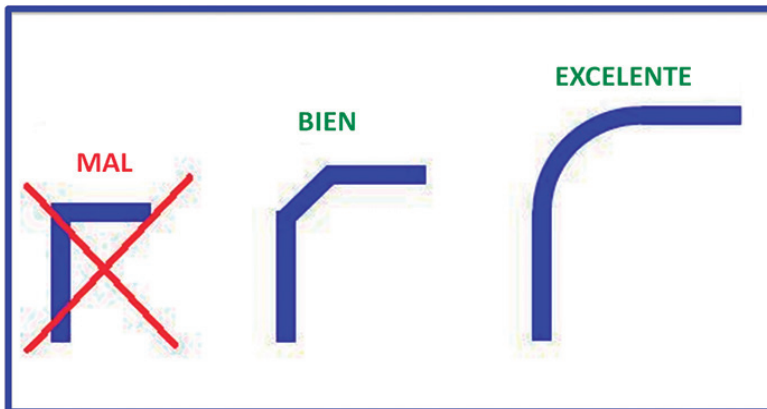
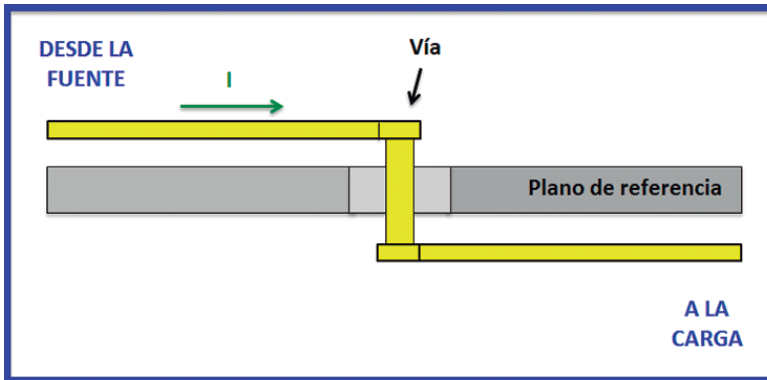


Figura 6: Cambio de capa de una pista junto a un plano de referencia. Esta solución es válida para cualquier plano de referencia, sea masa o alimentación.



de salida (tipo push-pull) (figura 9). Durante la conmutación de los dos transistores, en un período muy corto de tiempo, ambos transistores están conduciendo, lo que provoca brevemente un gran pico de corriente. Éste se propaga por los planos de alimentación y de masa en todas las direcciones.

El frente de onda se propaga de una forma similar a las ondas cuando se lanza una piedra en un estanque. Mientras el frente de onda se expande, su energía se extiende sobre un área cada vez mayor. Por lo tanto, aunque los planos paralelos están actuando como

una línea de transmisión, la energía transmitida se disipa rápidamente. Los dos planos forman un condensador. El aumento de la capacidad entre los dos planos puede mejorar este efecto deseable. La forma más fácil de aumentar la capacidad, asumiendo que ambos planos ya son suficientemente grandes, es reducir el espesor del dieléctrico entre ellos. Por esta razón los planos de alimentación y masa generalmente se colocan en las capas internas de una TCI multicapa.

Hasta el momento todo parece correcto en los planos de alimentación y de masa, pero es bueno

ver un ejemplo práctico (figura 10). Los planos de alimentación y masa (capas interiores) alimentan a muchas fuentes de impulsos a la vez, es decir, a varias patillas de alimentación y masa de diversos CIs digitales distribuidos en la TCI. En cualquier punto en el plano de alimentación o de masa aparece una tensión instantánea equivalente a la suma de todos los frentes de onda incidentes en ese punto. El efecto capacitivo de los dos planos no filtra totalmente estas tensiones porque el "condensador" formado por los dos planos es realmente una línea de transmisión con una baja impedancia Z_0 . Para la mayoría de las TCIs reales esto significa que los planos de alimentación están lejos de estar "limpios" de ruido (EMI). Es peor; los campos EM asociados a la capa 1 de pistas de señales 1 no están acoplados en absoluto a la masa. De hecho, están realmente acoplados al plano de alimentación. Además, el campo eléctrico E establecido entre los dos planos se extiende más allá de sus bordes, en el material dieléctrico de la TCI. Los condensadores de desacoplo adosados a los CIs no presentan este fenómeno porque sus dieléctricos no están acoplados al dieléctrico de la TCI ni están físicamente en el mismo plano. El otro efecto secundario deseable del plano de alimentación, es decir, su capacidad se puede calcular para una TCI típica de ejemplo de 10 cm² de este modo:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$$

ϵ_0 : permitividad del vacío = $8,8541 \times 10^{-12}$ F/m

ϵ_r : permitividad relativa de la fibra de vidrio FR4 = 4,7

A: área = 10 cm²

d: distancia entre planos de cobre = 0,2 mm

$$C = 8,8541 \times 10^{-12} \times 4,7 \times 10^{-4} / 2 \times 10^{-3} = 2,081 \times 10^{-12} = 2,08 \text{ pF}$$

No es una gran capacidad para 10 cm² de planos de cobre. Hay sustratos dieléctricos que permiten aumentar esta capacidad entre planos, pero los fabricantes de TCI en España no los suelen ofrecer en sus procesos de fabricación. El uso

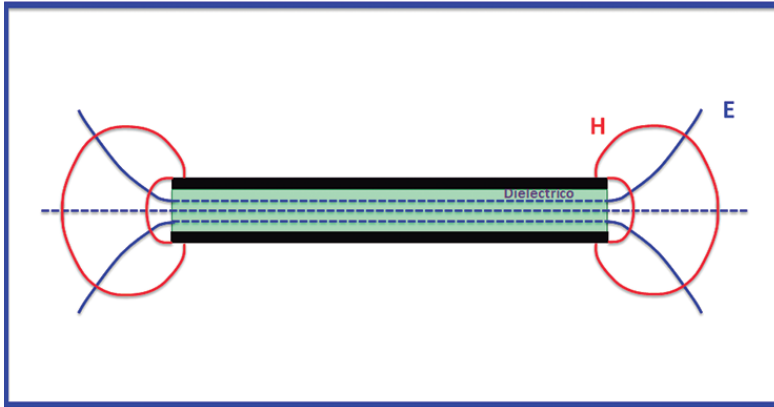


Figura 7: Dos planos de referencia encorados con un sustrato dieléctrico entre ellos. Pueden ser masa y masa o alimentación y masa.

de estos sustratos para obtener mayor capacidad entre planos sirve para reducir el número de condensadores de desacoplo, pero no los puede eliminar totalmente. Solo se justifica su uso en TCIs de muy alta frecuencia, del orden de los GHz.

Partición del circuito impreso

Las mejores prácticas de diseño de equipos electrónicos aconsejan considerar los aspectos de la compatibilidad electromagnética en todas las etapas del proceso de diseño. Pero sobre todo es conveniente considerarlos desde el principio del diseño, ya a nivel de la redacción de las especificaciones. La primera consideración, en la primera etapa del diseño es pensar en la partición de bloques. Normalmente, al empezar un nuevo equipo, se diseña un diagrama de bloques. Los bloques son generalmente sub-unidades funcionales. Pero, se debe dividir el equipo en bloques con diferentes criterios de CEM:

- Circuitos "ruidosos" (que generan EMIs indeseadas)
- Circuitos "limpios de ruido" (que necesitan protección contra las EMIs indeseadas)
- Circuitos pasivos (que son indiferentes a las EMIs deseadas)
- Circuitos de comunicaciones que llevan señales electromagnéticas deseadas desde el equipo hacia fuera y desde el mundo exterior hacia dentro.

A efectos electromagnéticos, el mundo exterior es externo al equipo o TCI. Los circuitos ruidosos son

generalmente los circuitos digitales y de potencia, como las fuentes de alimentación conmutadas, los inversores de frecuencia o todo tipo de convertidor de potencia. Los circuitos limpios de ruido son los circuitos analógicos, que también pueden ser pasivos. Determinar qué nodos de un circuito analógico serán sensibles a las EMIs no siempre es sencillo. Por ejemplo, los amplificadores y los reguladores lineales de potencia son a menudo susceptibles a perturbaciones EM, con frecuencias muy por encima de su límite de frecuencia de funcionamiento especificado.

Una vez que se ha dividido el circuito en bloques con criterio de CEM, podemos después determinar que protecciones deben adoptarse para garantizar la conformidad de CEM del producto. Por ejemplo: filtrar los bloques ruidosos para reducir sus EMIs generadas (siempre es lo más eficaz) o filtrar los circuitos sensibles contra las EMIs externas.

Barreras contra las interferencias

Después de haber clasificado los bloques del circuito según el criterio expuesto antes, se deben crear particiones en la TCI, poniendo barreras a las EMIs entre los bloques. En el ejemplo de TCI de la figura 11 hay varios bloques: fuente de alimentación desde los 220 V a 24 V para los actuadores y el convertidor de potencia, luego hay una fuente de alimentación para los 5V y 3,3 V para el microcontrolador y el control digital. Se ha asignado una partición tranquila de ruido para las entradas de sensores y una partición de salida para los actuadores. El bloque de la parte analógica recoge las señales de entrada y después de procesarlas las entrega al bloque del microcontrolador. Las líneas negras son líneas aislantes que dividen eléctricamente las particiones. Los pequeños cuadros en azul (1 a 4) son filtros adecuados que permiten pasar las señales entre las particiones debidamente filtradas según las necesidades de ancho de banda y atenuación de las EMIs previstas.

La división del plano de masa

Generalmente todos los bloques en una TCI tienen planos de masa, salvo en algunas zonas donde no conviene tener estos planos, como en el caso de filtros inductivos para no contribuir al aumento de capacidades parásitas, lo que reduciría sus prestaciones. La cuestión entonces es si se debe o no dividir el plano de masa entre bloques o particiones.

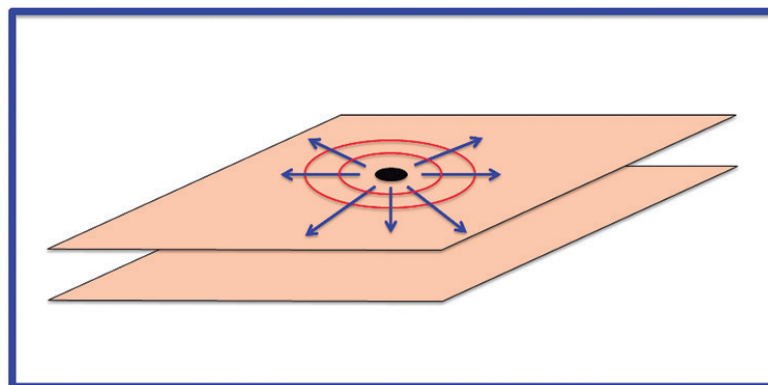


Figura 8: Propagación electromagnética desde un punto fuente de ruido.

La división de los planos de masa muchas veces es un concepto confuso. Depende mucho del tipo de circuito. Una de las razones para dividir el plano de masa es el confinamiento de los picos de corriente y sobretensiones en una zona aislada determinada. Si los bloques deben tener planos separados, se debe asegurar que hay un único punto

de contacto entre las dos particiones, pudiendo ser una pista directa entre planos o un condensador en el caso en que la masa puede tener una cierta diferencia de potencial. También puede ser una ferrita, a modo de filtro entre planos de masa. Al trazar las pistas de señal entre las particiones se debe evitar trazarlas sobrepasando las zonas

aisladas entre bloques. Algunas líneas de señal y de alimentación, inevitablemente, tienen que cruzar de un bloque a otro. Es conveniente poner un filtro en dicha pista. Para señales de alta impedancia se puede utilizar un filtro RC. Si la señal tiene baja impedancia es mejor utilizar un filtro LC.

Figura 9: Transistores de salida de un CI CMOS en conexión tipo "push-pull"

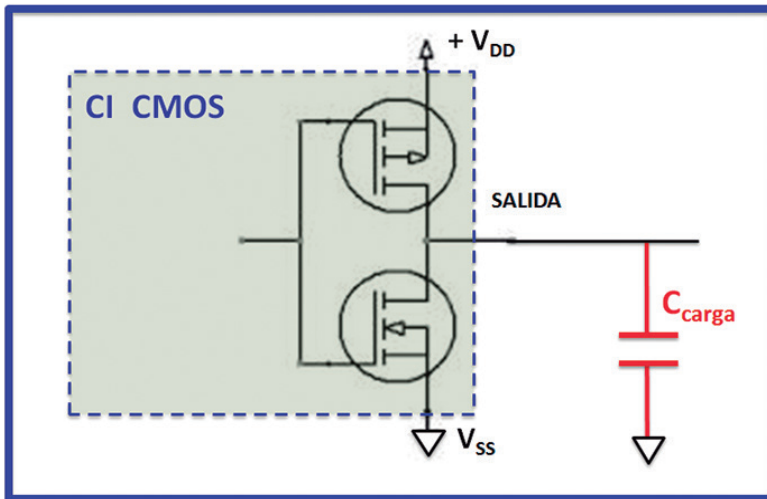


Figura 10: Ejemplo de una TCI de 4 capas.

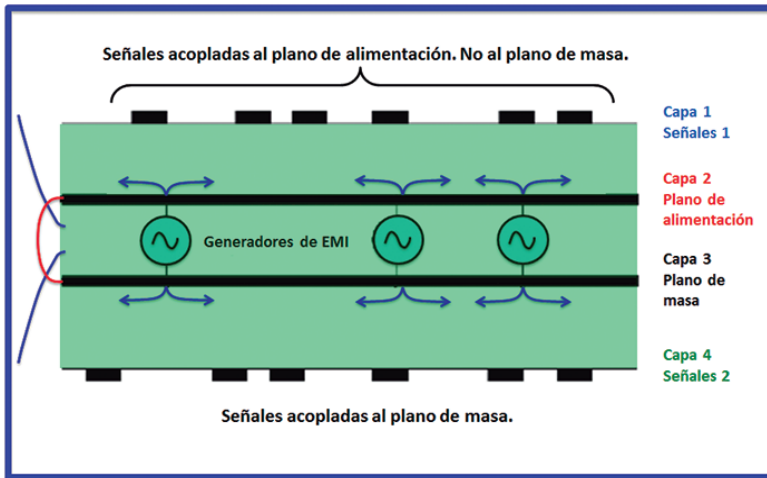
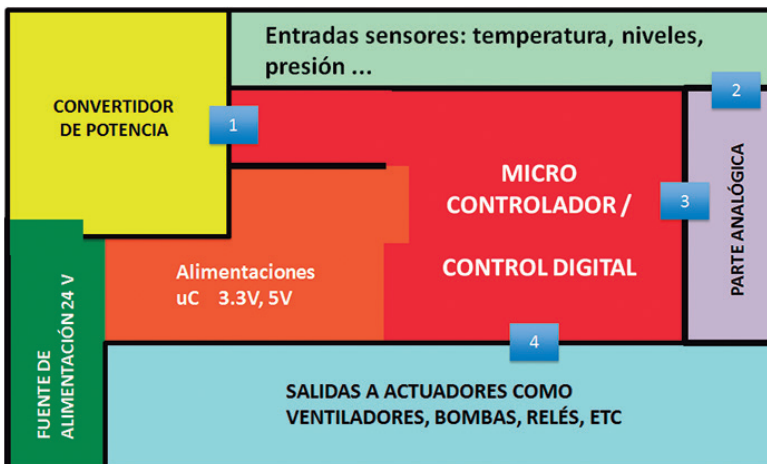


Figura 11: Ejemplo de partición de una TCI. Los cuadros 1, 2, 3 y 4 son filtros que conectan los diferentes bloques adecuadamente.



Pensar en 3D

En el diseño de particiones o barreras siempre se debe pensar en el equipo en todo su conjunto. Las TCIs esencialmente se diseñan en 2 dimensiones, mientras que el equipo es en 3D. Los mazos de cables, los conectores, la carcasa o chasis, los filtros de red y otras TCIs pueden afectar el espacio cercano a su lado, por encima o por debajo de una TCI e influir negativamente en la TCI bien diseñada electromagnéticamente.

Generalmente es bueno mantener los componentes (distintos a los filtros de barrera) lejos de la frontera entre los bloques y prestar especial atención a los grandes componentes que pueden actuar como antena. Se debe tener especial cuidado con los componentes magnéticos. Estos, en particular las inductancias, crean campos magnéticos H que se irradian hasta una distancia considerable. Estos mismos componentes magnéticos también pueden ser susceptibles a captar campos externos y convertirlos de nuevo incorrectamente en señales eléctricas en el circuito.

Para evitar efectos indeseables conviene añadir blindajes magnéticos a las inductancias, mejor que dejarlas abiertas sin blindaje para evitar que las EMIs magnéticas sean un problema.

Disposición de componentes y prioridad de trazado

Cuando los componentes ya han sido colocados en la TCI la cuestión es que pistas trazar en primer lugar. Antes de entrar en este tema hay tres puntos importantes a recordar:

- Colocar los componentes manualmente. Los colocadores automáticos son notoriamente indiferentes a los problemas de CEM.

- Colocar los componentes con sensatez para que las pistas puedan ser cortas donde tengan que serlo.
- Estar preparado para recolocar los componentes durante el proceso de trazado.
- Es mejor realizar el trazado manual de pistas que usar el "auto-router".

Conviene trazar primero las pistas que conforman la arquitectura de la alimentación y la masa de la TCI, incluyendo los planos de alimentación y masa correspondientes. Luego se trazan las pistas entre los CIs y sus asociados condensadores de desacoplo.

Estas pistas tienen que ser muy cortas y necesitan estar cerca de las patillas de masa y alimentación de los CIs. En tercer lugar se deben trazar las pistas de los relojes de alta velocidad.

En cuarto lugar se deben trazar las pistas correspondientes a los buses de datos y direcciones, si existen. Finalmente se traza el resto de las pistas. En el trazado de las pistas conviene reducir el número de cambios de capa minimizando el número de vías, sobre todo en


las pistas con señales de alta frecuencia. Como ya se ha visto, cada vía introduce una discontinuidad en la línea de transmisión y es una fuente de potenciales problemas de reflexiones.

Conclusiones

Para el buen diseño de una TCI es importante considerar el ancho de banda de las señales que deben circular por sus pistas.

Luego se debe comprender como funcionan los campos electromagnéticos de las diferentes disposiciones de las pistas y planos de referencia.

La partición correcta de bloques desde el punto de vista de la CEM

es una buena solución para evitar problemas de EMIs, aplicando los filtros adecuados entre ellos. Posteriormente se debe pensar en como partir los planos de masa. Por último, es bueno seguir el orden adecuado de trazado de la TCI. 

Fe de Erratas

En el pasado mes de Septiembre se publicó por error la fórmula de la página 105

$$C_{total} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + \dots + \frac{1}{Cn}$$

Cuando debiera ser:

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + \dots + \frac{1}{Cn}$$

REFERENCIAS

- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Keith Armstrong, *EMC for Printed Circuit Boards*, 2010, Armstrong/Nutwood UK publication.
- Francesc Daura, "El ancho de banda y la compatibilidad electromagnética", *Revista española de Electrónica*, Abril 2014
- Francesc Daura, "Campos electromagnéticos para "ingenieros digitales", *Revista española de Electrónica*, Marzo 2014