

El mito del coste del número de capas de un circuito impreso y la compatibilidad electromagnética

Artículo cedido por Cemdal



www.cemdal.com



Autor: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Systeme (ams) para España y Portugal. www.cemdal.com fdaura@cemdal.com

Cuando se debe decidir el número de capas de una tarjeta de circuito impreso (TCI) para un nuevo equipo, muchas veces se decide solo en base a su menor coste o a la densidad de sus conexiones. Desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética (CEM), esta decisión puede llegar a ser un error estratégico importante que puede determinar una serie de consecuencias posteriores, que pueden encarecer todo el equipo. La discusión siempre surge entre las necesidades técnicas y las económicas y llega a la categoría de mito en relación al número de capas a seleccionar. Esta discusión sería muchas veces innecesaria si se consideraran todas las variables involucradas desde el inicio del proyecto y se tuviera en cuenta la CEM. Con una mayor información sobre el tema, esta discusión inicial se zanjaría con un buen acuerdo satisfactorio para ambas partes. Con este artículo pretendemos aclarar algunos conceptos que facilitarían este acuerdo.

Para tener un buen diseño de la TCI, que facilite el cumplimiento de las normas de CEM por parte del equipo, sin incurrir en sobrecostes innecesarios, debemos ser conscientes de que la TCI es la fuente principal de problemas de CEM, sobre todo de emisiones radiadas y de inmunidad radiada. La experiencia determina que entre el 70% y el 80% de los problemas de CEM los provoca un mal diseño de la TCI del equipo. Los sobrecostes asociados al incumplimiento de la CEM se incrementan a medida que el tiempo de desarrollo del equipo avanza y se van tomando decisiones que pueden ser incorrectas desde el punto de vista de la CEM. Las técnicas de diseño de la CEM se deben decidir al principio del diseño. En caso contrario, a medida que pasa el tiempo de desarrollo, éstas técnicas van quedando limitadas y se encarecen. Puede ocurrir que diseñemos una TCI de dos capas (una TCI muy crítica desde el punto de vista de la

CEM) por su bajo coste y que luego nos veamos forzados a añadir ferritas a los cables conectados a ella para cumplir con la CEM. El uso correcto de más capas llega a evitar el uso de ferritas en los cables, más caras que el cambio de la TCI de 2 a 4 capas, por ejemplo.

Decisiones Iniciales

Como hemos dicho, muchas veces, erróneamente se decide directamente un número mínimo de capas (1, 2 o 4 capas) por su coste mínimo sin considerar otros aspectos importantes de la CEM y solo se acepta el aumento del número de capas por la falta de espacio para el trazado de las pistas. Usando una TCI de 1, 2 ó 4 capas (mejor) conseguimos un bajo coste de la TCI, pero seguramente provocaremos un coste mayor global del equipo, al tener que añadir filtros que hubiéramos evitado si el número de capas hubiera sido mayor. El uso del número de capas adecuado a las necesidades de la CEM del equipo asegura un nivel menor de interferencias electromagnéticas (EMI) ra-

diadas debidas a los bucles en la TCI (emisiones diferenciales) y a los cables conectados y excitados por el ruido excesivo en modo común en la masa de la TCI.

Normalmente se da demasiada importancia al número de capas en su aspecto económico, sin considerar los demás aspectos definitorios de una TCI. En la definición de una TCI hay más aspectos a considerar: la densidad del circuito a trazar, las frecuencias de las señales, el nivel de exigencia en el cumplimiento de las normas de emisiones (por ej. en CISPR22, la clase A es $-10 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ menos exigente que la clase B), si el equipo va a instalarse dentro de una caja metálica o no, el tipo de cables que van a conectarse y el nivel de experiencia en CEM del diseñador de la TCI. En las TCIs de 1 o 2 capas no se tiene en cuenta sus malas prestaciones electromagnéticas, al no tener planos de referencia (masa o alimentación). En una TCI de 2 capas, si se traza una buena rejilla de pistas de masa y se aporta un nivel suficiente de desacoplo en cada circuito integrado, se puede limitar el nivel de



Figura 1: Las decisiones iniciales correctas en la definición de una TCI no se pueden tomar solo en función de su coste

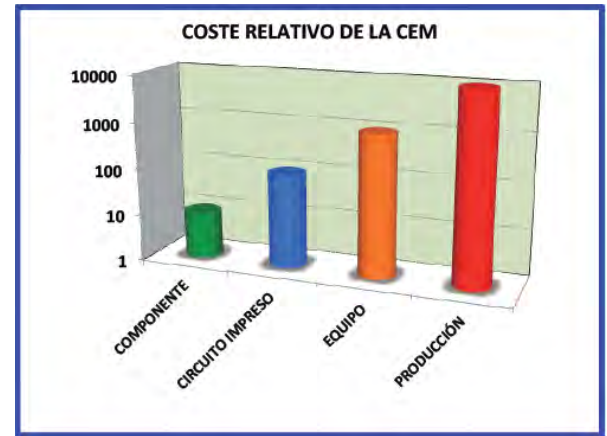
emisiones radiadas. Pero los cables conectados pueden ser críticos. Un buen diseñador de TCIs puede llegar a cumplir con la normativa usando sólo dos capas, si las frecuencias de las señales son bajas con tiempos de conmutación superiores a 5 ns y con un buen filtrado en la TCI en los cables conectados a ella. Pero este tipo de diseño está normalmente al límite usando microcontroladores con frecuencias de reloj de 5 a 10 MHz, al considerar que las frecuencias de los armónicos 13º y 15º pueden llegar con suficiente energía a frecuencia de 150 MHz.

Cuando estimamos que el diseño del equipo va a ser crítico desde el punto de vista de la CEM, es muy recomendable desestimar el uso de TCIs de 2 capas y seleccionar una TCI de 4 o más capas. La principal razón por la que el comportamiento electromagnético de una TCI de 4 o más capas es mejor es que el plano de masa y/o el plano de alimentación (los dos actúan como planos de referencia) aportan una reducción significativa de las emisiones radiadas (unos -20 dB con respecto a una TCI de 2 capas), manteniendo igual el resto del diseño. Las razones son: en una TCI de 4 o más capas, las pistas de señal son pistas "microstrip" o "stripline". En estas pistas, la impedancia característica está más controlada, el retorno de corriente circula por los planos adyacentes de referencia (masa o alimentación) y el plano de masa hace decrecer la impedancia de masa de forma importante. La suma de todo ello reduce las EMI radiadas.

La figura 1 muestra el orden de las decisiones iniciales correctas a tomar en la definición de una TCI según la CEM. Debemos destacar que la última decisión a tomar es el coste. Primero: debemos estimar el número de capas de señal que vamos a necesitar en función de la densidad del circuito a trazar, asignando las capas de señales de alta frecuencia y de baja frecuencia. Segundo: dependiendo del número de tensiones de alimentación del circuito a trazar, debemos asignar cuántos planos de alimentación sea conveniente usar y su arquitectura. Es usual tener tensiones de 3,3V y 5V en circuitos de alta velocidad. Normalmente la tensión de 12 V no alimenta a circuitos de alta velocidad. Tercero: debemos asignar

los pares de capas de señal referidos a un plano de referencia (masa o alimentación, ver luego el objetivo 6). Cuarto: debemos asignar la posición de los planos de masa y de alimentación. Quinto: determinaremos el número de capas total y su orden en la distribución funcional de capas de la TCI, asignando los espesores adecuados entre capas. Sexto: debemos decidir si vamos a usar TCIs estándar con vías pasantes o alguna tecnología HDI (High Density Interconnect), más densa, con microvías. Cuando todo esto ya está decidido técnicamente, con las alternativas definidas correctamente podemos, por último, solicitar oferta a varios fabricantes para analizar sus costes. Insisto que desde el punto de vista de la CEM, decidir técnicamente el tipo de TCI solo por este último punto es un error que nos puede costar al final mucho más dinero de lo esperado. Además, al analizar los costes solicitados podemos tener sorpresas agradables según se verá en el análisis de costes.

Los diseñadores electrónicos no plantean a menudo el incremento del número de capas debido a la alta presión de control de costes que reciben que sus jefes. Pero muchas veces es la mejor forma de evitar problemas de CEM desde el inicio. Aceptando que una TCI con más capas puede costar algo más, los costes reales del equipo completo cumpliendo con la CEM serán menores, al poder descartar el



uso de demasiados filtros en la salida de los cables. La figura 2 muestra los costes relativos debidos a problemas de CEM, dependiendo del lugar donde la solución al problema debe ubicarse: a nivel de componente, a nivel de TCI, o a nivel de equipo. El peor caso es cuando se retorna un equipo en garantía cuando ya está en producción. Su mejora es costosísima.

Figura 2. Coste relativo de la CEM a varios niveles. El coste más alto es cuando nos retornan un equipo por problemas de calidad relacionados con la CEM

Los Espesores

La reducción del espesor entre las capas de señal y sus planos de referencia asociados permite el efecto de plano imagen en una pista. Este efecto reduce las emisiones y mejora la inmunidad. Esta disposición forma una antena en forma de L invertida (figura 3). La eficiencia de radiación de una pista-antena como ésta de-

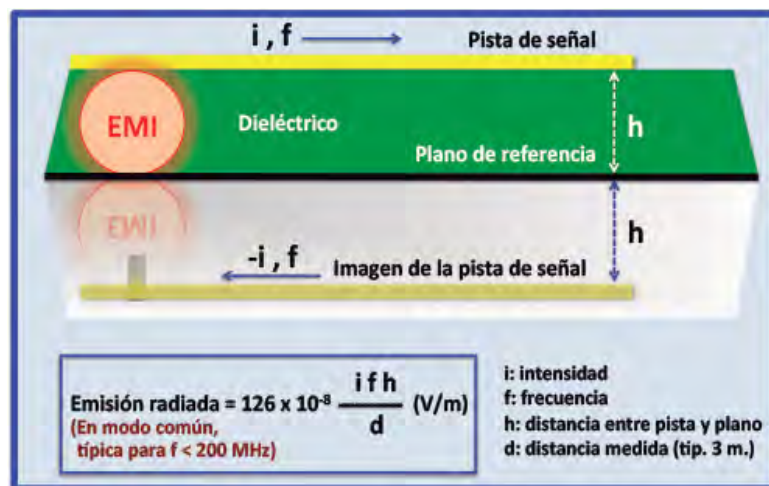


Figura 3. Cuando una pista se traza muy cerca de un plano de referencia, el campo igual pero opuesto radiado por la imagen de la pista radiante cercana cancela prácticamente la radiación de la pista. Para una intensidad i y una frecuencia f dadas, solo podemos reducir la emisión reduciendo la distancia h , porque la distancia de medida del campo d la determina la norma a aplicar.

pende directamente de la altura h (espesor) de la parte que sobresale con respecto al plano de referencia. Cuando la pista-antena se dispone muy cerca del plano de referencia, el campo igual pero opuesto radiado por la imagen de la pista radiante cercana cancela el campo de la pista. Así, una buena práctica de diseño es disponer las capas de señal cerca de un plano de referencia en la misma TCI.

Una causa importante de las emisiones en una TCI es la conversión de las señales deseadas en modo diferencial a ruido (EMI) no deseado en modo común. Cuando la anchura de la pista es comparable al espesor entre la capa de la pista y el plano de referencia, la conversión de modo diferencial a modo común empieza reducirse mejorando las emisiones y la inmunidad. Si el espesor se reduce a la mitad, las emisiones en modo común generalmente se reducen a la mitad (-6dB). Si se incrementan las dimensiones del plano de referencia las emisiones en modo común se reducen proporcionalmente a la mitad. Reduciendo el espacio entre los componentes y el plano de referencia permite que el efecto imagen del plano reduzca las emisiones y mejore la inmunidad de los componentes. También se reducen las longitudes de las vías entre el componente o el condensador de desacoplo y el plano de referencia, reduciendo al mismo tiempo el bucle de corriente creado entre el componente y su condensador de desacoplo, lo cual también reduce las EMI.

Actualmente la anchura típica de una pista de señal es como máximo de 0,25 mm. Por tanto es recomendable tener un espesor entre la capa de señales y el plano de referencia de 0,25 mm o menos. Lo ideal sería un espesor de 0,125 mm (la mitad) para pistas de 0,25 mm. Usualmente, en TCIs muy densas se hace necesario llegar a usar pistas externas de 0,125 mm (35 μm de espesor de cobre) y pistas internas de 0,1 mm (17 μm de espesor de cobre). Con estas pistas conviene reducir la distancia entre capas a un máximo de 0,1 mm.

Un posible problema con espesores demasiado pequeños entre capas es su efecto en las impedancias características de las pistas, si éstas se deben tratar como líneas de

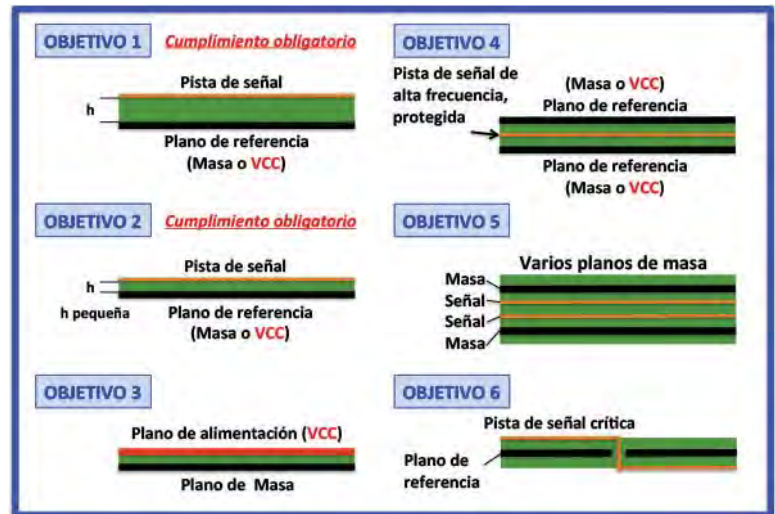


Figura 4: Objetivos de diseño para una buena distribución funcional de las capas de una TCI multicapa para obtener los mejores resultados de CEM.

transmisión. La razón es que los pequeños espesores provocan mayores dificultades para obtener impedancias características altas y evitar tener que usar pistas muy estrechas, lo cual puede incrementar el coste de la TCI. Por ejemplo, una pista microstrip con una anchura de 0,2 milímetros con 35 μm de espesor cobre con una distancia de 0,15 mm con respecto al plano de referencia tendría unos 58 Ω de impedancia. Si queremos tener 80 Ω , necesitaríamos una anchura de pista menor a 0,1 mm, usando 17,5 μm de espesor cobre.

Objetivos de un buen diseño electromagnético

Desde el punto de vista electromagnético, una TCI bien diseñada debería idealmente cumplir los seis objetivos siguientes:

1. Toda capa de señales debe trazarse siempre adyacente a un plano de referencia (masa o alimentación). Esto reduce las emisiones gracias al efecto de plano imagen (siempre se debe cumplir).
2. Las capas de señal deben estar bien acopladas a sus planos de referencia para facilitar el camino de retorno de la señal (siempre se debe cumplir).
3. Los planos de alimentación y masa deben estar muy bien acoplados, muy juntos, para reducir su impedancia como BUS de alimentación.
4. Las señales de alta frecuencia deben trazarse en las capas internas

localizadas entre planos de referencia. Así los planos de referencia actúan como blindajes y contienen las emisiones de las pistas de señal de alta velocidad.

5. La disponibilidad de varios planos de masa en una TCI es muy recomendable debido a que ello reduce la impedancia del plano masa de la TCI y reduce así las emisiones radiadas en modo común.

6. Cuando se deben trazar pistas de señales críticas en más de una capa, éstas deben trazarse en dos capas de señales adyacentes a un mismo plano de referencia para asegurar un buen camino de retorno de la señal.

La figura 4 muestra estos objetivos en forma gráfica para entenderlos mejor. El no cumplimiento de estos objetivos no quiere decir que obligatoriamente se va a incumplir con las pruebas de CEM. Solo quiere decir que nos deberemos esforzar más en realizar un buen trazado de la TCI o aumentar el nivel de filtrado de la TCI y el equipo en general.

La mayoría de los diseños de TCIs no puede cumplir los seis objetivos por falta de capas suficientes. Por ello se requiere siempre llegar a un compromiso. Por ejemplo, debemos decidir a veces entre trazar la pista cercana al plano de referencia para facilitar el camino de retorno de la señal (objetivo 2) o tener el plano de alimentación VCC cercano al plano de masa, para facilitar tener una baja impedancia del BUS de alimentación y una buena integridad de la alimentación (objetivo 3). Los objetivos 1 y

2 siempre se deben cumplir y nunca deben comprometerse. Por tanto, en el caso anterior gana el objetivo 2 sobre el 3. Otro usual compromiso es trazar las señales adyacentes al mismo plano (objetivo 6) o blindar las capas de señal disponiéndolas entre planos (objetivo 4). Si el número de capas lo permite, uno de los dos objetivos (6 o 4) se debe cumplir. Desde el punto de vista de la CEM es más eficiente cumplir el objetivo 6 que el objetivo 4.

Muchas TClS solo cumplen 3 objetivos y puede ser aceptable. Difícilmente se cumplen los 6 objetivos. El mínimo número de capas que permite cumplir con los 6 objetivos es una TCl de 10 capas. Con 8 capas solo se pueden cumplir 5 objetivos.

Ello no significa que no se puedan obtener buenos resultados de CEM, solo se deben tomar más compromisos y cuidar más el diseño. Además del número de capas y de su asignación funcional, es importante también determinar el espesor entre capas y la asignación ortogonal de las pistas de señal para evitar diafonía entre ellas.

Una buena construcción de la TCl contribuye a reducir las EMI, mejorar la integridad de la señal y ayuda a mejorar el desacoplo, mejorando la integridad de la alimentación. Se van a analizar seguidamente aquí las mejores distribuciones funcionales de las TClS multicapa según la CEM, empezando por la primera que cumple los 6 objetivos (una TCl de 10 capas), hasta llegar a una TCl de 4 capas. Las TClS de 2 capas no cumplen ningún objetivo y por ello no se van a considerar.

Otro aspecto a considerar desde el punto de vista mecánico y térmico es que la distribución funcional de la TCl debe ser simétrica para evitar el pandeo. También conviene tener un número par de capas desde el punto de vista del proceso de fabricación y por consiguiente para un menor coste de la TCl.

La mejor TCl: 10 Capas

No se puede decir que exista una construcción ideal. Como ya se ha dicho, una TCl de 10 capas es la primera que puede cumplir con los 6 objetivos. Una TCl de 12 capas o más

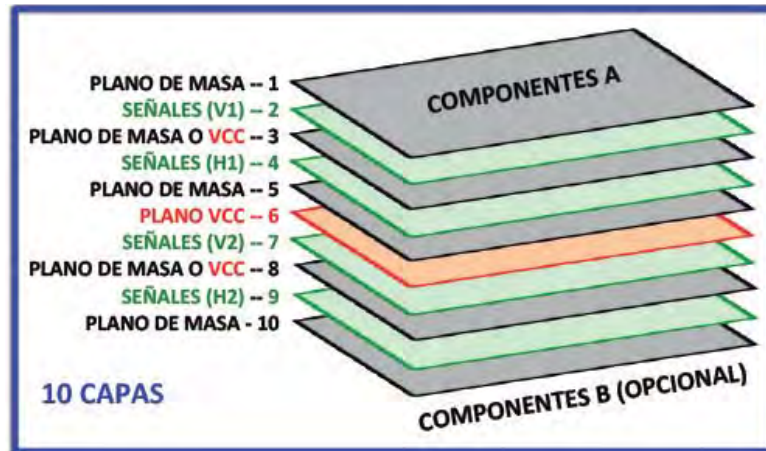


Figura 5: Tarjeta de circuito impreso de 10 capas que cumple con los 6 objetivos, con 4 capas de pistas. V1 y V2: pistas verticales. H1 y H2: pistas horizontales. Las capas 3 y 8 pueden ser indistintamente masa o alimentación VCC.

también los podrá cumplir, si se define bien su distribución funcional de capas. Si no, también se podría dejar de cumplir alguno de los objetivos. La figura 5 muestra una TCl de 10 capas con una muy buena distribución funcional de capas para la CEM y la integridad de la señal porque cumple con los 6 objetivos. Aunque las TClS de 10 capas usualmente incorporan 6 capas de señales, la limitación de esta distribución es que solo tiene 4 capas de señales para poder cumplir con los 6 objetivos.

Los planos de masa externos blindan todas las capas de señales. Las pistas ortogonales de señal (horizontales y verticales) quedan referenciadas al mismo plano, tanto en la parte alta como en la parte baja de la TCl (objetivo 6).

Es una muy buena distribución en el caso de usar cajas no metálicas gracias a sus planos de masa exteriores. Para aumentar el número de capas de señales y seguir cumpliendo con los 6 objetivos al mismo tiempo, necesitaríamos usar una TCl de 12 capas

o más. Esta TCl se podría mejorar todavía más si se usara material capacitivo empotrado entre los planos de masa y de alimentación (capas 5 y 6), lo cual mejoraría el desacoplo a alta frecuencia. Incluso ello aumentaría la zona de la TCl utilizable porque permitiría la eliminación de muchos condensadores de desacoplo, sus vías y pads de soldadura asociados. Así, mejoraría la integridad de la alimentación mediante la reducción de ruido del BUS de alimentación, reduciendo su impedancia y las resonancias que producen EMI.

TClS de 8 Capas

La figura 6 muestra una excelente configuración de 8 capas donde las pistas ortogonales de señal quedan referenciadas al mismo plano en la parte alta y en la parte baja de la TCl (objetivo 6).

Se dispone de un par de planos (masa y alimentación) con un espesor entre ellos muy pequeño. Esta configuración es muy buena para

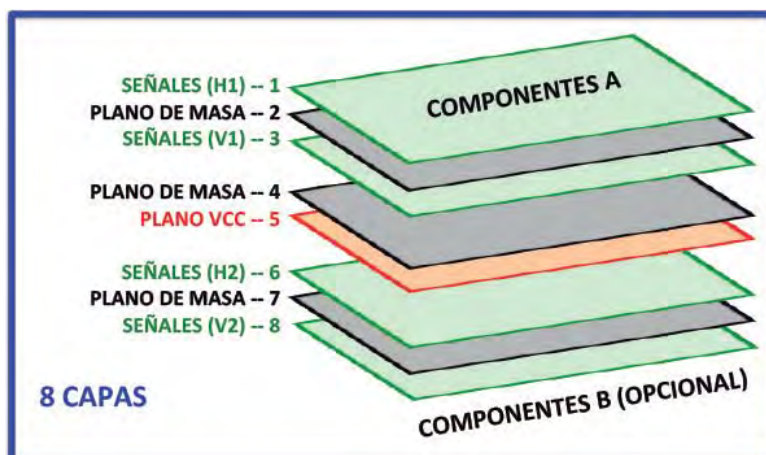


Figura 6: Tarjeta de circuito impreso de 8 capas que cumple con 5 objetivos, con 4 capas de pistas. Sólo incumple el objetivo número 4. V1 y V2: pistas verticales. H1 y H2: pistas horizontales.

Figura 7: Tarjeta de circuito impreso de 6 capas que cumple con 3 objetivos (1,2 y 4), con 4 capas de pistas. No cumple con los objetivos números 3, 5 y 6. V1 y H1: pistas verticales y horizontales.

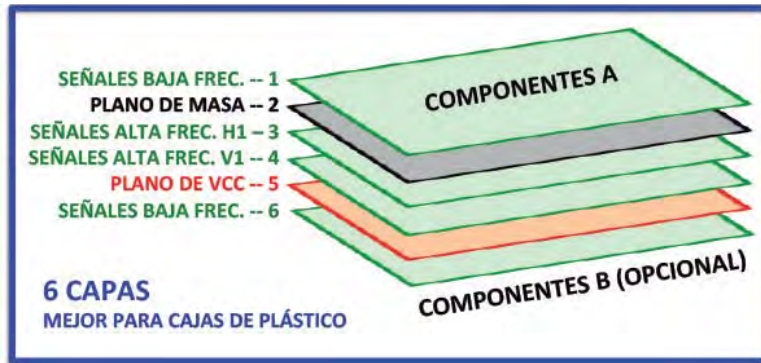


Figura 8: Tarjeta de circuito impreso de 6 capas que cumple con 3 objetivos (1,2 y 6) con 4 capas de pistas. No cumple con los objetivos números 3, 4 y 5. V1 y V2: pistas verticales. H1 y H2: pistas horizontales. Todas las capas de señales pueden ser de alta frecuencia.

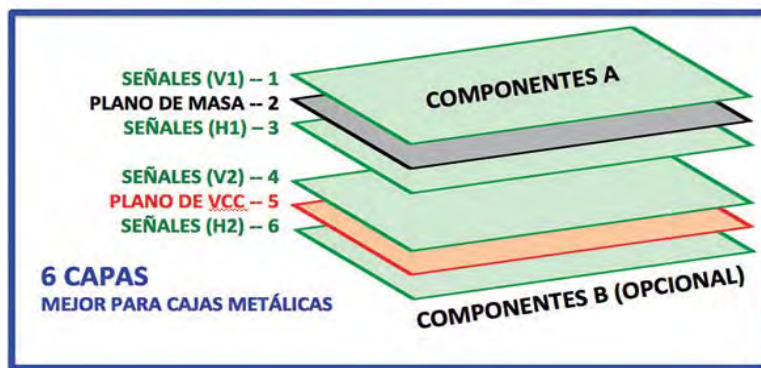
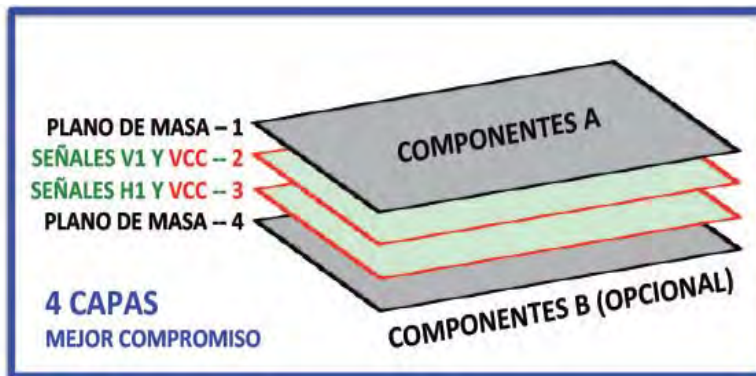


Figura 9: Tarjeta de circuito impreso de 4 capas que cumple con 4 objetivos (1,2, 4 y 5) con 2 capas de pistas compartidas con alimentación VCC. No cumple con los objetivos números 3 y 6. V1 : pistas verticales. H1 : pistas horizontales.



frecuencias con armónicos mayores a 500 MHz y solo incumple el objetivo 4 en las capas 1 y 8. Es buena para la integridad de la señal. Aquí también se podría mejorar usando material capacitivo empotrado entre los planos de masa y de alimentación (capas 4 y 5).

Esta configuración no sería la mejor en el caso de usar cajas de plástico, al no disponer de los planos de masa blindando las capas de señales. Pero podemos evitar problemas de emisiones excesivas si intentamos trazar la mayoría de las pistas de señales de alta frecuencia en las capas internas 3 y 6.

Si debemos usar pistas de señales de alta frecuencia en las capas 1 y 8 deben ser lo más cortas que sea

posible para evitar problemas de EMI radiadas.

TCLs de 6 Capas

Para TCLs de 6 capas vamos a presentar dos distribuciones funcionales. Con seis capas disponibles, el principio de tener dos capas enterradas para señales de alta velocidad se puede aplicar adecuadamente como se presenta en la figura 7. Adicionalmente a estas dos capas de señales de alta velocidad disponemos de dos capas exteriores más de señales de baja frecuencia. Esta configuración común para 6 capas puede ser efectiva para controlar las EMI, pero no cumple con los objetivos 3, 5 y 6. Su principal inconveniente, pero no

grave, es la separación de los planos de masa y alimentación. Debido a esta separación no hay suficiente capacidad inter-planos y su impedancia como BUS de alimentación es alta. Por ello se debe diseñar cuidadosamente el sistema de desacoplo de la alimentación. Esta configuración es mejor que la configuración siguiente para ser usada en cajas de plástico debido a que en las capas externas 1 y 6 no hay señales de alta frecuencia.

No es tan común, pero también tiene unas buenas prestaciones la construcción de la figura 8. Es una TCL de 6 capas con el orden de funcionalidad de las capas distinto para aportar unas mejores prestaciones de CEM en comparación a la anterior distribución de la figura 7. Aquí se asignan dos pares de capas de señales ortogonales, cada par junto a un mismo plano de referencia (masa o alimentación), y todas pueden ser de alta frecuencia. La desventaja es que las capas 1 y 6 no están blindadas. Esta configuración no cumple con los objetivos 3, 4 y 5. Esta configuración es mejor que la anterior para ser usada en cajas metálicas por poder tener las capas 1 y 6 señales de alta frecuencia.

La TCL más crítica: 4 Capas

La clásica TCL de 4 capas, con las 2 capas de señales en el exterior y los planos de masa y alimentación en el interior puede cumplir con la CEM, si se diseña adecuadamente, aunque solo cumple los objetivos 1 y 2. La figura 9 muestra una mejor TCL de 4 capas con una distribución poco usual, pero menos radiante que la anterior. En ella los dos planos de masa son externos y la alimentación se distribuye en las mismas 2 capas de señales internas. En ellas la alimentación se puede trazar como una rejilla, usando pistas anchas (mínimo 1 mm). Una ventaja adicional de esta configuración es que los dos planos de masa producen una menor impedancia de masa y por se tiene una menor radiación de modo común a través de los cables conectados a ella. Otra ventaja es que, al disponer de masa en los dos lados externos, podemos rodear de vías la TCL, conectando los dos planos perimetralmente para encerrar todas las señales en una

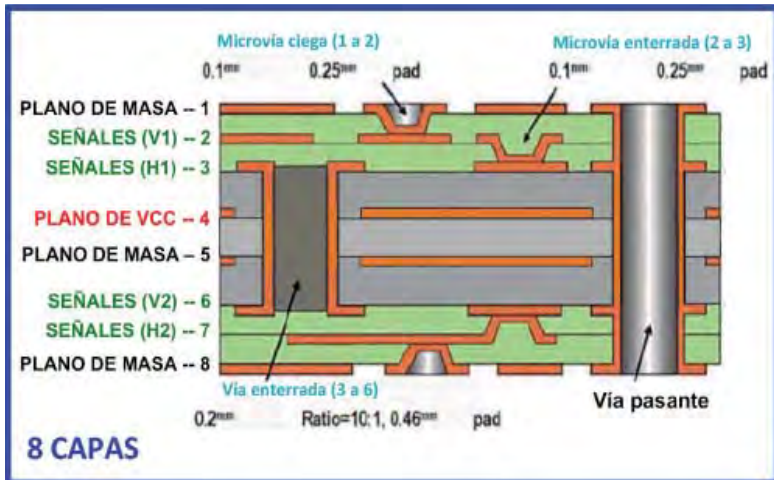


Figura 11: Construcción HDI tipo III de 8 capas. Con 2 niveles de microvías escalonadas. No cumple los objetivos 4 y 6. V1 y V2: pistas verticales. H1 y H2: pistas horizontales.

jaula de Faraday. Esta configuración no cumple con los objetivos 3 y 6 pero puede ser buena para la CEM al cumplir con los objetivos 1,2, 4 y 5.

Tecnología HDI: Microvías

La tecnología HDI (High Density Interconnect) usa microvías con diámetros de 0,10 a 0,075 mm o menos que no necesitan atravesar todas las capas. Las microvías pueden ser enterradas o ciegas. Usando tecnología HDI, en comparación a una TCI con vías pasantes, se puede reducir el área requerida en un 40%, manteniendo del número de capas o también se puede reducir el número de capas en un 30%, manteniendo las dimensiones de la TCI, facilitando el diseño.

Algunas de las ventajas de la tecnología HDI son que, en general, al tener tamaños más pequeños en las vías y las pistas, permiten una mayor densidad de trazado. El uso eficaz de las microvías abre caminos de trazado entre ellas, facilitando la posibilidad de necesitar un menor número de capas. Es la única forma práctica para diseñar con grandes encapsulados BGA con paso menor a 0,8 mm y muchas patillas. La tecnología HDI es la mejor alternativa para las TCIs multicapa estándar con muchas capas, necesarias por la alta densidad de trazado.

En cuanto a la CEM, el uso de la tecnología HDI reduce el ruido en general. La menor longitud de las pistas aumenta la calidad de la señal y reduce la diafonía. El pequeño

tamaño de las microvías aumenta la calidad de la señal y reduce el ruido de conmutación. El pequeño espesor entre capas y la pequeña anchura de las pistas reduce el ruido de conmutación y el nivel de las EMI radiadas.

La tecnología HDI comprende actualmente unos 20 procesos de fabricación diferentes, dependiendo del material dieléctrico (8 materiales), la distancia intersticial entre las vías (7 métodos productivos) y el método de metalización de las vías (4 métodos productivos). Pero aquí nos vamos a centrar en la especificación IPC/JPCA-2315, que define 6 tipos de construcciones HDI y de ellos solo entraremos en detalle en los tipos I, II y III. Los otros tres son mucho más caros y no son necesarios para grandes y densas TCIs. La figura 10 muestra las construcciones HDI de los tipos I y II. La construcción I utiliza tanto microvías ciegas como vías pasantes en una estructura que consiste en

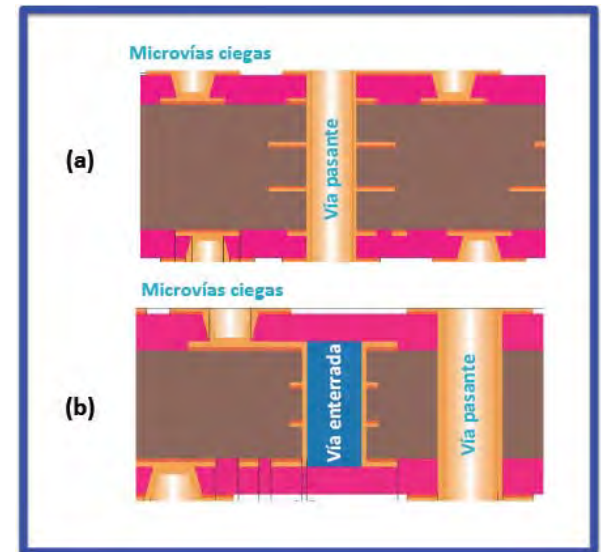


Figura 10 (a) Construcción HDI tipo I. (b) Construcción HDI tipo II

un núcleo laminado y una capa de microvías ciegas en al menos un lado. En el contexto de grandes y densas TCIs con múltiples BGAs con muchas patillas, esta construcción no es significativamente mejor que las TCIs laminadas estándar. Es mejor usar la construcción de tipo II, aunque no es adecuada para los diseños más difíciles. La construcción tipo II utiliza microvías ciegas, vías enterradas (es una ventaja significativa) y vías pasantes a la vez. Usa una capa de microvías en al menos un lado.

Tecnología HDI Tipo III

La construcción HDI de tipo III utiliza microvías ciegas, vías enterradas y vías pasantes. Tiene como mínimo dos capas de microvías, al menos en un lado. La construcción HDI tipo III es la mejor configuración para grandes y densas TCIs con múltiples y grandes BGAs. Con dos capas de

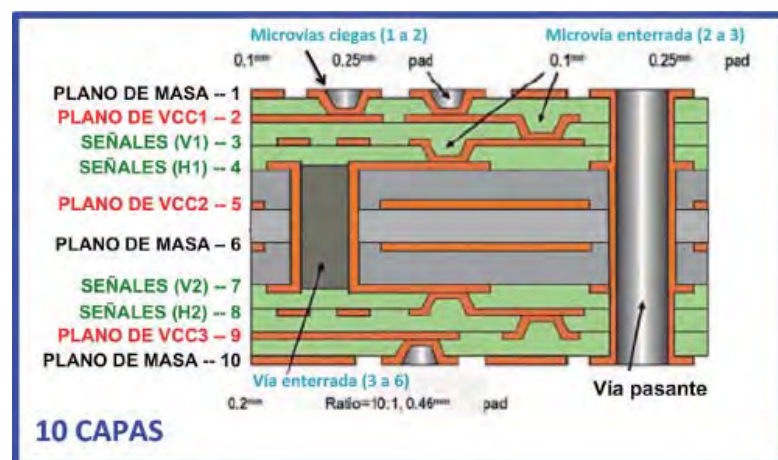
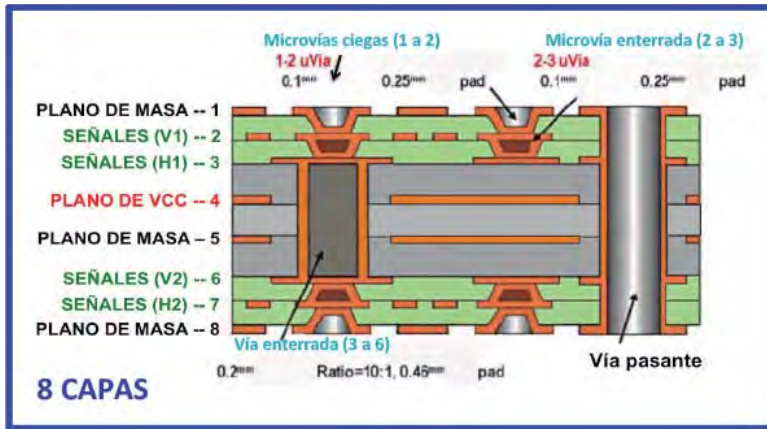


Figura 12: Construcción HDI tipo III de 10 capas. Con 3 niveles de microvías escalonadas. No cumple los objetivos 4 y 6. V1 y V2: pistas verticales. H1 y H2: pistas horizontales.

Figura 13: Construcción HDI tipo III de 8 capas. Con 2 niveles de microvías apiladas. No cumple los objetivos 4 y 6. V1 y V2: pistas verticales. H1 y H2: pistas horizontales.



microvías en uno o dos lados de la TCI existe una gran área de trazado usando las microvías y las pistas más pequeñas. Es factible el uso de las capas externas como planos de masa porque hay suficientes capas de microvías disponibles para el trazado de las señales. Utilizando microvías apiladas permite una mayor densidad de trazado, aunque el costo es más alto que si se usan microvías escalonadas.

¿Cuáles son las mejores construcciones HDI de tipo III? Depende de las prioridades, pero aquí presentamos tres propuestas con un buen equilibrio de coste, densidad de trazado e integridad de la señal y de la alimentación. La figura 11 presenta una TCI de 8 capas con tecnología HDI tipo III con microvías escalonadas en dos niveles. Este diseño tiene un buen promedio de las variables y es una buena construcción para empezar, si es el primer intento de uso de la tecnología HDI. Los planos de masa en las capas externas proporcionan una reducida EMI radiada. Aunque no cumple los objetivos 4 y 6, no es un obstáculo para tener buenas prestaciones de CEM. La figura 12 presenta una TCI de 10 capas con tecnología HDI de tipo III con mi-

crovías escalonadas en tres niveles. Los planos de masa y alimentación en las capas externas proporcionan una mejor integridad de señal y de alimentación, respecto a la figura 11.

La capa adicional de microvías aumenta el coste, pero mejora la densidad de trazado a costa de perder dos posibles capas de trazado de señales HDI, debido a los dos planos de alimentación adicionales respecto al anterior diseño de 8 capas. La disponibilidad de tres planos de alimentación es una buena opción en el caso de tener un circuito con 3 tensiones de alimentación distintas. Aunque no cumple los objetivos 4 y 6 no es un obstáculo para tener buenas prestaciones de CEM. Por último, la figura 13 presenta una TCI de 8 capas con tecnología HDI tipo III con microvías apiladas en dos niveles. Las vías apiladas permiten una mayor densidad de trazado, pero aumenta el costo y pueden limitar el número de fabricantes capaces de producirla. Los planos de masa en las capas externas proporcionan una reducida EMI radiada. Aunque no cumple los objetivos 4 y 6 no es un obstáculo para tener buenas prestaciones de CEM.

Hay otras opciones, pero ya no son

tan equilibradas en cuanto a coste y prestaciones. La tabla 1 muestra un resumen de todas las configuraciones de TCI presentadas, con y sin tecnología HDI.

Los costes comparados según el número de capas

Cuando un diseñador propone usar más capas en una TCI solicita a su departamento de compras una cotización. Muchas veces esta cotización excede la previsión de costes y preocupa al jefe de proyecto. Pero esta preocupación es inicialmente infundada porque se debe considerar los costes completos del equipo y no solo los costes de la TCI. Es importante tener en cuenta que, excepto los fabricantes de TCIs especializados en bajos volúmenes de producción, todos los fabricantes de TCIs están especializados en producir TCIs con el número de capas en las que tienen el menor coste efectivo. Así, cada fabricante sólo puede ofrecer la mejor cotización para las TCIs con el número de capas en las que sus máquinas trabajan de forma más óptima.

Añadir planos de masa o de alimentación a una TCI es una de las medidas de CEM más efectivas, tanto nivel técnico como de coste global. Esta medida es a menudo rechazada de entrada a nivel económico debido a una falta de información sobre los fabricantes de TCIs por parte de los departamentos de compras y los jefes de proyecto, demasiado enfocados a los costes de materiales y con conocimientos limitados sobre los costes reales asociados al correcto cumplimiento de las normas de CEM en producción. Puede ocurrir que al aumentar el número de capas y pedir oferta al mismo fabricante, el incremento de coste sea excesivo, debido a que este fabricante no tiene los costes optimizados para la nueva TCI con más capas. Es conveniente pues solicitar oferta a otros fabricantes cuyos procesos de fabricación estén optimizados para ese mayor número de capas. Puede ocurrir, por ejemplo, que para altas producciones, una TCI de 6 capas cueste aproximadamente un 20% o más que una TCI de 4 capas en el mismo fabricante, pero que pueda llegar a costar lo mismo en otro fabricante. Algunos comprado-

Tabla 1: Comparativa de las TCIs multicapa óptimas para la CEM.

	NÚMERO DE CAPAS	CAPAS DE SEÑALES	PLANOS DE MASA O VCC	OBJETIVOS CEM		FIGURA	NOTAS
				CUMPLIDOS	NO CUMPLIDOS		
ESTÁNDAR	10	4	6	todos	ninguno	5	La mejor distribución de capas
	8	4	4	1,2,3,5,6	4	6	bueno para 500 MHz o más
	6	4	2	1,2,4	3,5,6	7	para caja metálica
	6	4	2	1,2,6	3,4,5	8	para caja no metálica
	4	2	2	1,2,4,5	3,6	9	El mejor compromiso (4 capas)
HDI III	8	4	4	1,2,3,5	4,6	11	2 niveles de microvías escalonadas
	10	4	6	1,2,3,5	4,6	12	3 niveles de microvías escalonadas
	8	4	4	1,2,3,5	4,6	13	2 niveles de microvías apiladas

CAPAS	COSTE RELATIVO ENTRE NÚMERO DE CAPAS								
	100 Unidades			500 Unidades			5000 Unidades		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
2	1,2 €	2,1 €	4,3 €	1,1 €	1,7 €	4,2 €	1,0 €	1,5 €	4,0 €
	33,3%	80,2%	118,6%	36,4%	-56,4%	47,6%	42,5%	60,9%	50,0%
4	1,6 €	3,9 €	9,4 €	1,5 €	2,6 €	6,2 €	1,4 €	2,5 €	6,0 €
	56,3%	23,1%	-2,1%	56,7%	24,0%	17,7%	47,4%	21,5%	11,7%
6	2,5 €	4,8 €	9,2 €	2,4 €	3,3 €	7,3 €	2,1 €	3,0 €	6,7 €
	28,0%	-4,1%	28,3%	28,7%	-31,7%	21,9%	38,8%	34,3%	-22,4%
8	3,2 €	4,9 €	11,8 €	3,0 €	4,3 €	8,9 €	2,9 €	4,0 €	8,2 €
	9,5%	17,0%	11,3%	9,7%	8,5%	8,9%	7,9%	8,2%	8,4%
10	3,5 €	5,8 €	13,1 €	3,3 €	4,6 €	9,7 €	3,1 €	4,4 €	8,9 €
									: Referencia
	media de todos los niveles			media de todos los niveles			media de todos los niveles		
media de cada nivel de coste	31,8%	34,0%	39,0%	32,9%	29,0%	24,0%	34,1%	29,5%	23,1%
		31,1%			30,2%			31,2%	
		-67,9%			-61,9%			-61,9%	
	media de Alto a Bajo			media de Alto a Bajo			media de Alto a Bajo		
	100 Unidades			500 Unidades			5000 Unidades		

Tabla 2: Coste relativo comparativo del número de capas de las TCI normalizado al coste mínimo de referencia: el coste Bajo de la TCI de 2 capas.

res no tienen cuenta esta posibilidad. También es bueno considerar si el fabricante está bien preparado para hacer series cortas a un coste aceptable o si solo tiene buenos precios para altas producciones.

A partir de varias referencias (adjuntas al final) y solicitudes de oferta realizadas en línea en las webs de varios fabricantes de TCIs, hemos realizado un estudio de costes para una TCI con un mismo tamaño (135 x 50 mm) pero con 2, 4, 6, 8 y 10 capas. Hemos considerado los costes para 100, 500 y 5000 unidades. La tabla 2 muestra los valores obtenidos con el coste Bajo, Medio y Alto para cada cantidad. Todos los valores se han normalizado al valor más bajo obtenido, en este caso, es el coste Bajo para 5000 unidades. Ello nos permite independizarnos del coste real del momento y de las dimensiones de la TCI. En todos los diseños se utilizan las mismas reglas de diseño para las pistas y separaciones, dentro de los límites de diseño "convencional" para todos los proveedores involucrados. Todas las TCIs usan vías pasantes, dieléctrico FR4, el mismo tipo de pistas y espesores y sin ninguna capa de material capacitivo. Así tenemos una tecnología coherente para la comparación de todas las opciones.

Si nos centramos en los valores Medio para cada cantidad solicitada, vemos que la TCI de 2 capas para 5000 unidades es la más barata. Su

valor Bajo es la referencia (= 1). Si analizamos la columna Bajo de cada cantidad solicitada, entre cada dos valores de coste vemos el porcentaje de variación del cambio de capas (2 a 4 capas, 4 a 6 capas, 6 a 8 capas y 8 a 10 capas) en color verde. Lo mismo es aplicable a las columnas Medio y Alto. En las columnas del valor Medio también es lo mismo para los porcentajes en su línea superior en color verde. Pero aquí la línea inferior en color gris muestra el porcentaje de reducción cruzada entre el valor Alto del número de capas 2 y el valor Bajo del número de capas 4 y así sucesivamente de forma similar para el resto de la tabla 2 (Alto de 4 capas a Bajo a 6 capas, Alto de 6 capas a Bajo a 8 capas y Alto de 8 capas a Bajo a 10 capas). Esto demuestra que es necesario comparar costes entre varios fabricantes para obtener el menor coste y que ello no es impedimento para poder usar TCIs con más capas a un menor coste. A priori podríamos pensar que usar más capas sería más caro. Según vemos en la tabla 2 esto no es siempre así. Además se debe considerar que, si para reducir las dimensiones de la TCI, nos vemos forzados a aumentar el número de capas, incluso podremos obtener un menor coste porque la superficie es un factor muy determinante en el coste, como veremos más adelante en la tabla 3.

Analicemos los datos. El aumento

más elevado se produce cuando pasamos de 2 a 4 capas en la columna Alto con la cantidad solicitada de 100 unidades, al costar un 118,6% más, pero aumenta solo en un 33,3% en la columna Bajo. En cambio, el menor aumento es un 7,9% en el cambio de 8 a 10 capas para 5000 unidades. Si nuestro proveedor de TCIs está en la parte alta de costes, menos competitiva, el cambio de 2 a 4 capas es prohibitivo. Pero, si cambiamos el proveedor no competitivo por uno competitivo en este aumento de capas, sin cambiar la cantidad solicitada de 100 unidades, podemos saltar de 2 a 4 capas con una buena reducción de costes del -62,8%.

En general, las reducciones de coste cruzadas de Alto a Bajo en todos los saltos de capa de un solo nivel (2 a 4 capas o 4 a 6 capas, etc.) son similares y están entre el -56,5% (paso de 6 a 8 capas para 5000 unidades) y el -73,4% (paso de 4 a 6 capas para 100 unidades). En la columna Alto para 100 unidades el paso de 4 a 6 capas se produce un extraño ahorro aparente de -2,1%. Es debido a las diferencias de coste entre los proveedores de costes en la columna Alto. Es un caso puntual.

En la parte baja de la tabla 2, para cada nivel de cantidad solicitada (100, 500 y 5000 unidades) podemos ver que la media del valor de aumento de coste por nivel de cantidad solicitada es similar (entre el 29,5% y el 34%, en color rojo). Cada media de cada cantidad proviene de las medias de sus columnas Bajo, Medio y Alto (en color verde). La media (en color gris) del valor de reducción cruzada de coste (Alto a Bajo) por nivel de cantidad solicitada es igual a un -61,9% para 500 y 5000 unidades, mejorando la reducción a un -67,9% para 100 unidades.

Esta media de las reducciones cruzadas proviene de los valores cruzados (en color gris) de cada cambio cruzado en cada nivel de cantidad solicitada. En cada grupo de cantidad solicitada, el valor Alto de la TCI de 2 capas supera el valor Bajo de TCI de 10 capas y se consigue además una reducción aproximada de un -20%. Por ejemplo, para 5000 unidades: TCI 2 capas con 4,0 Euros a TCI de 10 capas con 3,1 Euros. La figura 14 muestra la tabla 2 en forma gráfica. Este análisis nos aporta la idea

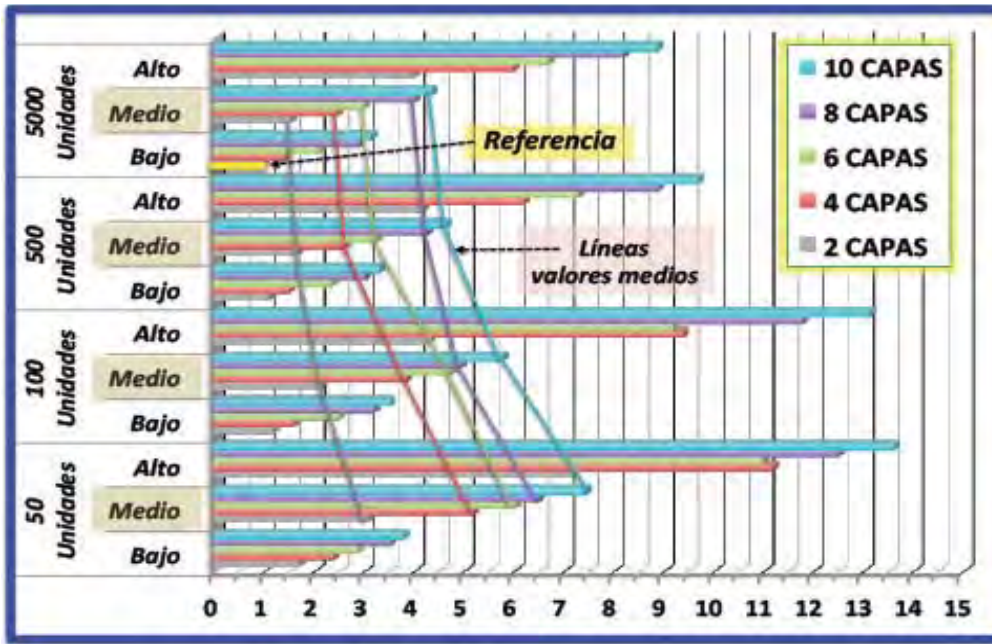


Figura 14: Gráfico de la tabla 2 del coste relativo comparativo del número de capas.

de que no debemos tener prejuicios sobre que el mayor número de capas es necesariamente más caro. Incluso se puede reducir costes cambiando de fabricante, aun aumentando el número de capas. Debemos consultar a varios fabricantes para obtener el mejor coste, valorando la misma TCI con diferente número de capas y varias dimensiones para encontrar el coste óptimo.

Los costes comparados según la tecnología HDI o Estandar

La razón principal para usar la tecnología HDI es obtener suficiente densidad de trazado para reducir el número de capas. Hay cuatro aspectos que determinan el costo de fabricación de las TCIs con tecnología HDI:

- Los materiales: afecta el tipo de material dieléctrico utilizado y la superficie usada.
- Laminados: Cuantos más pasos de laminación, mayor será el costo.
- Taladros: Cuantas más perforaciones se requieran, mayor será el costo. Una microvía, una vía enterrada y una vía pasante, cada una cuenta como un taladro.

El número de variables a tener en cuenta para poder realizar una comparación de costes entre una TCI estándar con vías pasantes y una TCI con tecnología HDI es muy elevado. Por ello, aquí la comparación se ha limitado. A partir de varias referencias

(adjuntas al final) y solicitudes de oferta realizadas en webs de fabricantes de TCIs, hemos realizado un estudio de costes para cuatro diseños, dos con TCI estándar con vías pasantes y dos con tecnología HDI. Todas las TCIs usan dieléctrico FR4, sin ninguna capa de material capacitivo.

La tabla 3 muestra los valores obtenidos con el coste Bajo, Medio y Alto para una única cantidad. Todos los valores se han normalizado al valor más bajo obtenido, en este caso, es el coste Bajo para el Diseño 3. Ello nos permite independizarnos del coste real del momento y de la cantidad solicitada. Así la comparación es coherente. Partamos del

Diseño 1 como inicio del estudio. Es una TCI estándar de 6 capas con 800 vías pasantes con unas dimensiones de 135 x 50 mm. El Diseño 2 es una TCI con HDI tipo 1-2+2-1, que utiliza 200 vías pasantes y 1100 microvías con las mismas dimensiones que el Diseño 1. El Diseño 3 tiene la misma funcionalidad que el Diseño 1 inicial, pero con unas dimensiones un -33 % más pequeñas (90 x 50 mm) y usa el mismo número de vías y microvías que el Diseño 2. El Diseño 4 consigue la misma funcionalidad con el mismo tamaño de TCI del Diseño 3 pero sin usar tecnología HDI, y usa una TCI estándar de 8 capas. En todos los diseños se utilizan las mismas reglas de diseño para las pistas y separaciones dentro de los límites de diseño "convencional" para todos los proveedores involucrados.

El Diseño 3, es el más denso y es el más barato. Se podría esperar este resultado al ser más pequeño en superficie, pero no es intuitivo. De hecho, en promedio, el Diseño 3, aunque más denso es más barato que el Diseño 1. En la tabla 3, si nos centramos en los valores Medio para cada diseño vemos que el Diseño 2 cuesta más que el Diseño 1 con las mismas medidas, pero el Diseño 4 cuesta lo mismo que el Diseño 2, más grande. Si analizamos la columna Bajo, entre cada dos valores de coste vemos el porcentaje de variación de paso de un diseño a otro (Diseño 1 a 2, 2 a 3 y 3 a 4) en color verde. Lo mismo es aplicable a la columna Alto. En la columna del valor Medio también es

COSTE RELATIVO TCI ESTÁNDAR - HDI				
DISEÑOS	CAPAS	Bajo	Medio	Alto
DISEÑO 1	6 CAPAS 135 x 50mm ESTÁNDAR 800 vías pasantes	1,2 €	1,4 €	1,6 €
		19,9%	40,0% -7,3%	61,4%
DISEÑO 2	6 CAPAS 135 x 50mm 1-2+2-1 HDI 200 vías pasantes 1100 µvías	1,5 €	1,9 €	2,6 €
		-32,3%	-34,5% -155,8%	-40,4%
DISEÑO 3	6 CAPAS 90 x 50 mm 1-2+2-1 HDI 200 vías pasantes 1100 µvías	1,0 €	1,2 €	1,5 €
		73,1%	52,9% 11,9%	42,9%
DISEÑO 4	8 CAPAS 90 x 50 mm ESTÁNDAR 200 vías pasantes 900 µvías ciegas	1,7 €	1,9 €	2,2 €
			: Referencia	

6 CAPAS CON HDI

HDI 1-2+2-1

1 : VÍA PASANTE
2 : µVÍA ENTERRADA
3 : µVÍA CIEGA

— : CAPAS DE COBRE

— : DIELÉCTRICOS

Tabla 3: Coste relativo comparativo de las TCI estándar y tarjetas HDI normalizado al coste mínimo de referencia: el coste Bajo del DISEÑO 3.

lo mismo para los porcentajes en su línea superior en verde. Pero aquí la línea inferior en color gris muestra el porcentaje de variación entre el valor Alto del Diseño 1 y el valor Bajo del Diseño 2 y así sucesivamente de forma similar para el resto de la tabla 3 (Alto del Diseño 2 a Bajo del Diseño 3 y (Alto del Diseño 3 a Bajo del Diseño 4). Esto demuestra que es necesario comparar costes entre varios fabricantes para obtener el menor coste y que ello no es impedimento para poder usar la tecnología más densa a un menor coste.

A priori podríamos pensar que el Diseño 3 más denso sería el más caro, cuando la realidad se demuestra que es el más barato. La mayor reducción (-155,8%) la obtenemos entre el valor Alto del Diseño 2 y el valor Bajo del Diseño 3, al reducir las dimensiones, manteniendo la tecnología HDI. Al cambiar al Diseño 4, aumentando a 8 capas para poder mantener las dimensiones pequeñas y la misma densidad, el coste aumenta por encima del Diseño 1. El Diseño 4 es el más desfavorable, al tener los mayores costes comparativos de todos los diseños. Es claro que en este análisis, el Diseño 3 es el más óptimo en costes y prestaciones.

La figura 15 muestra la tabla 3 en forma de gráfico. Este análisis nos aporta la idea de que no debemos tener prejuicios económicos en contra de la alta tecnología más densa por creer que es más cara. En los análisis de costos, deberemos considerar el uso de la tecnología HDI. Deberemos dejarnos aconsejar por los fabricantes de TCIs para definir la mejor opción tecnológica en cuanto a costes y prestaciones. Se pueden reducir costes cambiando de fabricante aun usando la tecnología HDI más densa.

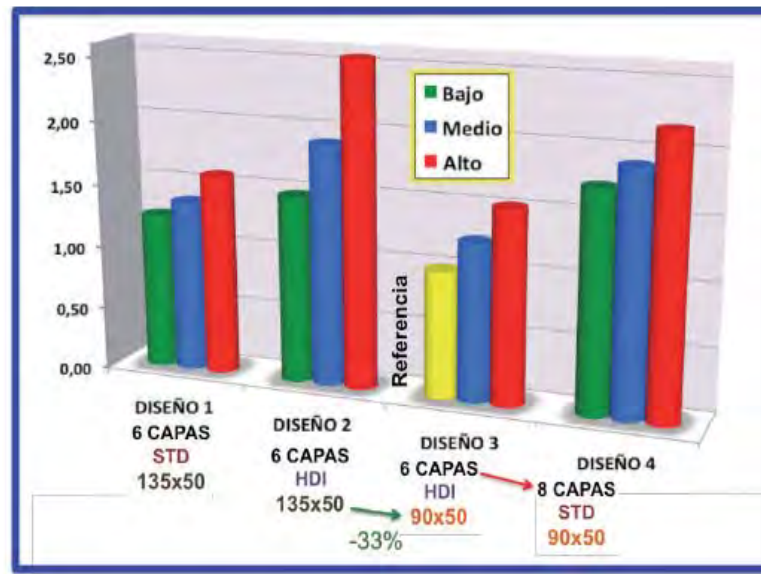


Figura 15 : Gráfico de la tabla 3: Coste relativo comparativo de las TCI estándar con respecto a las tarjetas HDI

Conclusiones

No conviene decidir el número de capas de una TCI sólo considerando su coste. Sus parámetros técnicos influyen en el cumplimiento del equipo con la CEM y el coste final. Desde el punto de vista electromagnético, una TCI bien diseñada debe idealmente cumplir los seis objetivos referenciados, debiendo llegar a compromisos si no se pueden usar suficientes capas.

Pero con un diseño cuidadoso se puede igualmente cumplir con la CEM, aunque se dejen de cumplir algunos objetivos. Conviene considerar en el análisis la posibilidad de usar la tecnología HDI para poder reducir el tamaño y aumentar la densidad del trazado de la TCI. La reducción de tamaño contribuye a reducir los costes y también a reducir el tamaño de los bucles de señal. Las microvías no agujerean todas las capas y por ello no agujerean los planos de

masa y ello contribuye a tener una baja impedancia. En conjunto así se mejora el comportamiento a nivel de CEM y de integridad de las señales y la alimentación. En cuanto a los análisis de costes y tecnologías a aplicar en nuestra TCI, a partir de los datos de los fabricantes deberemos preparar unas tablas similares a las aquí presentadas, pero centradas en las alternativas de nuestro diseño para tomar la mejor decisión, sin tener en cuenta los prejuicios iniciales en cuanto al aumento de capas o al uso de la tecnología HDI. En conclusión, se deben tener en cuenta los costos globales de la CEM del equipo completo y no solo del coste aislado de la TCI. Con ello se podrá tomar la mejor decisión para determinar el número de capas más adecuado al diseño. ☑

REFERENCIAS

- Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility engineering", John Wiley & Sons, 2009
- Keith Armstrong, "EMC for Printed Circuit Boards", Armstrong/Nutwood UK publication, 2010
- "Design Guide for High Density Interconnects (HDI) and Microvias", IPC/JPCA-2315, June 2000
- Happy Holden and Diane Neer "The HDI Handbook", , 2009
- Charles Pfeil and Happy Holden, "HDI Layer Stackups", Mentor Graphics
- Happy Holden, "HDI Via Structures Effect on PCB Design Flexibility, Constraints and Cost", Printed Circuit Design & Fab, November 2007
- Kevin Arledge and Tom Swirbel, "Microvias in Printed Circuit Design", Motorola – Land Mobile Products Sector Plantation, FL, EET Asia, Feb 2000
- Francesc Daura, "El mito de las vías en los circuitos impresos", Revista Española de Electrónica, Enero 2014
- Datos de diversos fabricantes de circuitos impresos

Las corrientes de alta frecuencia sólo circulan cerca de la superficie del metal

FRECUENCIA	PROFUNDIDAD
10 kHz	0,66 mm
100 kHz	0,21 mm
1 MHz	0,066 mm
10 MHz	0,021 mm
100 MHz	0,0066 mm
1 GHz	0,0021 mm

$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$

f = frecuencia,
 μ = permeabilidad magnética = $\mu_0 \mu_r$,
 μ_r = permeabilidad magnética relativa,
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, y
 σ = conductividad eléctrica en $\Omega^{-1}m^{-1}$.

Fe de erratas

En la edición del mes de Enero se publicó el artículo "El mito de las vías en los circuitos impresos". Erroneamente se publicó por duplicado la figura 5 en lugar de la figura 4. A la izquierda pueden encontrar la figura correcta.

$R_{via} = \rho * l / S$ Ohm donde ρ es la resistividad de la metalización plateada ($1,9 \times 10^{-8} \Omega$ metro), l es su longitud en m y S es la sección en m^2 . Al ser un cilindro, la sección de la vía es $S = D * \pi * g$ siendo D el diámetro del cilindro y g el grosor de la metalización de la vía.

www.cemdal.com



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



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

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

SERVICIOS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS DE CEM



SERVICIO
PREVENTIVO



COMPLETO:
MERCADO CE



EMISIONES E
IMMUNIDAD

