

Electromagnética en la automoción



Francesc Daura

Día a día es más importante considerar correctamente la compatibilidad electromagnética (CEM) en el sector de la automoción. Ello es debido al aumento constante de la complejidad electrónica en los vehículos al añadir nuevas funciones para aumentar la seguridad y la confortabilidad del conductor. Se presenta aquí una introducción a la CEM en el mundo de la automoción y se plantea la metodología a seguir para obtener buenos resultados durante el desarrollo de los proyectos de automoción.

UN POCO DE HISTORIA

Primero veamos en la figura 1 algunos de los acrónimos más comunes en el mundo de la compatibilidad electromagnética (CEM). Se trata de acrónimos muy usados por todos los expertos de CEM. Si revisamos la historia para entender como hemos llegado a la situación actual, debemos remontarnos a los pioneros que experimentaron por primera vez con los campos electromagnéticos. Durante los siglos XVIII y XIX, en la ejecución de los primeros experimentos electromagnéticos se usaron chispas. James Clerk Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas a nivel matemático. Maxwell unificó la teoría electromagnética con sus ecuaciones y su gran contribución fue reunir en sus ecuaciones largos años de resultados experimentales, debidos a Coulomb, Gauss, Ampere, Faraday, Lenz y otros, unificando los campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto: el campo electromagnético. Luego, 20 años más tarde de la formulación de las ecuaciones de Maxwell, Heinrich Hertz descubrió

- **EMC:** ElectroMagnetic Compatibility
- **CEM:** Compatibilidad ElectroMagnética
- **EMI:** ElectroMagnetic Interference = INTERFERENCIAS
- **EMS:** ElectroMagnetic Susceptibility = INMUNIDAD
- **ESD:** ElectroStatic Discharge = Descarga Electrostática
- **EFT:** Electrical Fast Transient = Transitorio Eléctrico Rápido
- **EMP:** ElectroMagnetic Pulse = Impulso Electromagnético

Figura 1: Algunos acrónimos comunes.

experimentalmente las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell.

Otro pionero importante para la CEM fue Jean-Baptiste Joseph Fourier, al enunciar su transformada de Fourier, expresión matemática muy importante para el análisis de los problemas de CEM. Las perturbaciones o interferencias electromagnéticas (EMI), como en el caso de cualquier otro tipo de señales, pueden ser caracterizadas en el dominio temporal o en el frecuencial. En el dominio temporal, la interferencia se define en términos de amplitud en función del tiempo (se mide con un osciloscopio). Para estudiar la EMI en el dominio frecuencial, se hace uso de la descomposición de la misma en una suma de perturbaciones senoidales de distintas frecuencias (llamadas también armónicos), según el método de desarrollo en serie de Fourier (para perturbaciones periódicas) o mediante la integral de Fourier (para perturbaciones no periódicas). Por lo tanto, a efectos prácticos, la perturbación se

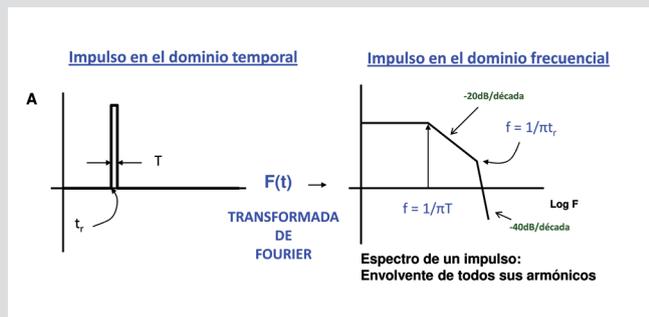


Figura 2: Transformada de Fourier: Espectro de un impulso.

define únicamente en términos de las amplitudes y frecuencias de sus componentes frecuenciales, tal y como se observará en un analizador de espectros.

En la figura 2 se muestra como ejemplo un impulso en el dominio temporal que se transforma en su espectro frecuencial en el que destacan dos puntos o frecuencias de inflexión en su envolvente. Esta envolvente limita el máximo nivel de cualquiera de los armónicos correspondientes al impulso. El segundo punto de inflexión es el más importante, al determinar la frecuencia límite máxima de esta envolvente. Las frecuencias superiores quedan atenuadas con una pendiente de -40 dB/década y tienen mucha menos energía. Es importante destacar según la fórmula:

$$f = 1 / p t_r$$

que de las dos variables del impulso temporal t_r y T , t_r es la más importante, al determinar la frecuencia máxima de la envolvente. Este valor afecta mucho en las emisiones de interferencias electromagnéticas (EMI).

En el inicio de las aplicaciones de los sucesivos descubrimientos relativos a la electricidad, hacia 1830, los primeros telégrafos ya empezaron a tener problemas de EMI. Luego, estos problemas fueron más importantes cuando se extendió la telefonía y las redes eléctricas hacia 1900, debido a la diafonía entre cables, sobre todo, cuando se aumentó la tensión en la distribución de energía eléctrica. En 1895 Marconi logró enviar por primera vez señales inalámbricas a una distancia de 3 km, convirtiéndose así prácticamente en el inventor del primer sistema de telegrafía sin cables. Cabe destacar, no obstante, que en 1943, la Corte Suprema de los Estados Unidos acreditó a Nikola Tesla como el verdadero inventor de la radio, al haber tenido la idea antes que Marconi.

En 1901, Marconi efectuó la primera transmisión transatlántica usando una gran malla de cables de cobre. Entonces todavía habían pocos receptores de radio y estaban muy alejados por lo que, en la práctica, los problemas de interferencias no se manifestaban. La primera demostración pública de interferencias ocurrió durante la Copa de América de Vela en 1901, cuando tres compañías telegráficas intentaron retransmitir en directo la competición. Al transmitir los resultados las tres compañías a la vez, se interfirieron continuamente entre ellas, provocando muchas deficiencias de comunicación.

Durante la 1ª Guerra Mundial, las radiocomunicaciones tuvieron problemas con los sistemas de ignición de los motores en los vehículos militares. Después, en la 2ª Guerra Mundial, el uso intensivo de las radiocomunicaciones y los radares, provocó un

gran desarrollo de la CEM en el ámbito militar. En los años 60, los problemas de CEM se centraron en la protección de la difusión de la TV. Con el avance de la electrónica y su uso en todos los aspectos de la vida diaria, se hizo necesario el desarrollo de las Directivas y Normas para el control de las emisiones electromagnéticas, para proteger así el espectro radioeléctrico y el buen funcionamiento de todos los equipos electrónicos. La actual Directiva Europea de compatibilidad electromagnética general en vigor, de obligado cumplimiento, es la 2004/108/CE (deroga la anterior 89/336/CEE). En la automoción, la directiva en vigor es la 2004/104/CE.

Uno de los accidentes importantes debidos a problemas de EMI ocurrió en 1937, al explotar el dirigible Hindenburg debido a una descarga electrostática (ESD) entre la cola y su poste de amarre en tierra. El zeppelin se había cargado electrostáticamente en demasía al navegar entre las nubes de tormenta y la chispa de la descarga provocó el incendio y explosión de su hidrógeno interno, además de provocar una reacción de aluminotermia, altamente exotérmica en su superficie externa (con aluminio y óxido de hierro). Otro incidente tuvo lugar en 1967. La alta energía de radiofrecuencia generada por el radar del portaviones Forrestal iluminó un misil de un avión aterrizando, disparándose y alcanzando un avión en cubierta y explotando sus dos bombas. Fue un fallo de inmunidad electromagnética en el misil.

El incremento continuo del número de transmisores y también de las frecuencias de funcionamiento de los sistemas electrónicos, provocó una mayor necesidad del control de la CEM. En 1934, en EEUU, se creó la FCC (Federal Communications Commission) para regular el uso de las comunicaciones. En el mismo año siguió la creación de la VDE (Verband Der Elektrotechnik) alemana y el CISPR (Comité International Special des Perturbations Radioelectriques) con sede en Suiza, dependiente de la IEC (International Electrotechnical Commission). En España, AENOR (Asociación Española de Normalización y certificación) se creó en 1986, para elaborar las normas técnicas españolas (UNE). La agencia ISO se fundó en 1947 y su central está en Suiza. Una agencia importante para la automoción, la SAE, se fundó en 1905 y su sede está en EEUU.

Más recientemente, en 1982, durante la Guerra de las Malvinas, el destructor HMS Sheffield fue destruido por un misil Exocet. Este problema se debió a que el sistema anti-misiles se debía desconectar cada vez que se era necesario comunicar con los aviones Harrier, debido a que su generación de EMI, impedía las comunicaciones. En 1987, en Alemania, un helicóptero Sikorsky Blackhawk experimentó movimientos incontrolados de los estabilizadores mientras volaba cerca de una antena de radio de alta potencia.

TENDENCIAS TECNOLÓGICAS

La dependencia de los productos electrónicos es cada día mayor. Los vehículos no escapan a esta tendencia tecnológica y actualmente usan mucha electrónica para controlar su funcionamiento y para aportar seguridad y comodidad al conductor. Al usar más electrónica tenemos la consecuencia de una mayor contaminación electromagnética. Día a día los equipos electrónicos tienden a tener mayor complejidad, miniaturización y menores distancias entre componentes. Para aumentar la velocidad de los proce-

sadores y de las comunicaciones, así como su mayor nivel de integración, los circuitos integrados necesitan reducir sus dimensiones internas. Internamente, su longitud de puerta de transistor (canal) ha pasado desde las μ a los nm. Esta reducción de las dimensiones del canal conlleva menores distancias internas y con ello una mayor intensidad de campo eléctrico interno. Para disminuir esta intensidad de campo, que podría ser destructiva internamente, es necesario disminuir la tensión de alimentación de los circuitos integrados. Por ello los valores típicos de tensión de alimentación han ido disminuyendo desde los primeros CI's: 12V, 5V, 3V3, 3V, 2V85, 2V5, 1V8, 1V2 y... bajando.

Esta tabla muestra estas tendencias en los circuitos integrados:

	2000	2005	2010	2015
Longitud puerta Transistor (nm)	130	80	45	25
Frecuencia reloj interno (GHz)	1.2	5	15	33
Flanco de conmutación (ps)	455	106	32	11
Tensión de alimentación (V)	1.9	1.1	1.0	0.8

La relación directa de estas tendencias con la CEM provoca que el incremento de la frecuencia y el incremento de los tiempos de subida y bajada o flancos de conmutación (t_r y t_f), provoca mayores niveles de emisión electromagnética (recordar la transformada de Fourier y la envolvente generada). Por el contrario, con la disminución de la tensión de alimentación aparece un problema de CEM: al disminuir la tensión de alimentación, disminuye el margen de ruido y con ello la inmunidad a las interferencias electromagnéticas. Este conjunto de tendencias provoca problemas de integridad en la alimentación y en las señales.

Como ejemplo de esta evolución tan rápida, Intel, en su primer microprocesador 4004 en 1971 tenía un canal de 10m y una frecuencia de reloj de tan solo 108 kHz, con un nivel de integración de 2.500 transistores. El primer Pentium, en 1993, tenía un canal de 0,8m y una frecuencia de reloj de 66 MHz y 3,1 millones de transistores. Ya en 2011, el microprocesador Intel Core 2 Duo E8500 tiene 3160Mhz de reloj, un canal de 45 nm y 410 millones de transistores. Estos datos demuestran que hasta hoy se ha cumplido la ley de Moore, que expresa que aproximadamente cada 2 años se duplica el número de transistores dentro de un circuito integrado. Es una ley empírica formulada por el co-fundador de Intel, Gordon Moore en 1965.

Más centrados en la automoción, las consecuencias de estas tendencias provocan en los vehículos el uso de un mayor número de microcontroladores, funciones y componentes electrónicos. Ello necesita de más buses de comunicación con mayor velocidad y nuevas localizaciones físicas de esas nuevas funciones en los vehículos. Esto conlleva un mayor nivel de complejidad electrónica y en consecuencia más problemas de EMI. Para tener una idea del nivel de complejidad funcional al que se ha llegado, se puede comparar el número de líneas de código en el software

entre un vehículo de alta gama, con 100 millones de líneas, un avión militar F-35 Joint Strike Fighter con 5,7 millones de líneas y un avión comercial Boeing 787 Dreamliner con 6,5 millones de líneas de código. Se debe considerar que aunque no se es muy consciente, el software también puede afectar a la compatibilidad electromagnética.

Además de todo esto, se debe el considerar el necesario incremento de la complejidad electrónica en los vehículos híbridos y eléctricos, en los que se añaden las altas intensidades eléctricas y altas frecuencias de conmutación en los cargadores de las baterías, en los inversores y en los motores eléctricos de tracción.

AMBIENTE ELECTROMAGNÉTICO

Cualquier producto electrónico debe estar diseñado para funcionar correctamente en el ambiente electromagnético donde trabajará. Cada tipo de ambiente electromagnético tiene sus normas de CEM correspondientes, de obligado cumplimiento. El ambiente electromagnético en un vehículo es uno de los más ruidosos, incluso más ruidoso que el ambiente industrial. Por orden de severidad, el ambiente electromagnético más severo es el militar, seguido del de la automoción, el aéreo / espacial, el ferroviario, el médico / hospitalario, el industrial y por último el doméstico. En el análisis de la CEM en la automoción, podemos considerar los componentes de automoción electrónicos integrados en origen en los vehículos y los equipos electrónicos usados dentro de los vehículos por sus usuarios. Ambos tipos deben trabajar dentro del ambiente electromagnético del vehículo sin problemas de CEM. Hoy los vehículos contienen una acumulación de 200 años de tecnología desde sus ancestros. Empezando por los motores de combustión interna, pasando por los motores eléctricos y las funciones electrónicas de control y seguridad más complejas. Desde las bujías a los más avanzados sistemas de ayuda al conductor con cámaras digitales y radares (funciones ADAS: "Advanced Driver Assistance Systems") radian campos electromagnéticos y pueden ser susceptibles a ellos. Además, los reproductores MP3, los teléfonos móviles, las tabletas, las consolas de juegos y todos los artilugios electrónicos que se puedan usar dentro de un vehículo también deben ser "compatibles" electromagnéticamente con todas las funciones electrónicas integradas en el vehículo, por seguridad y por comodidad para sus usuarios.

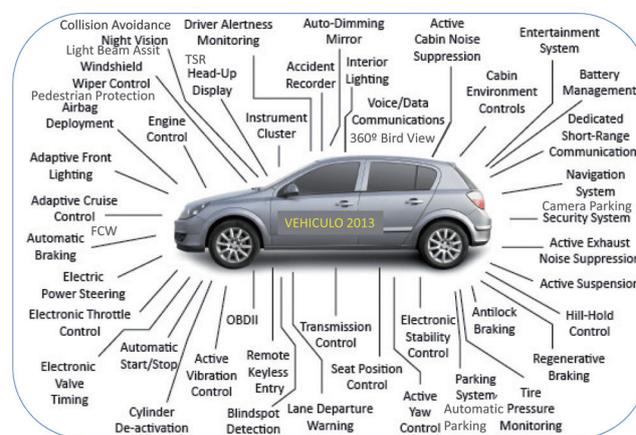


Figura 3: La complejidad actual dificulta la compatibilidad electromagnética.

Pongamos algunos ejemplos de esta complejidad. Un BMW serie 7 o un Mercedes clase S llevan unos 100 microcontroladores. Un Volvo S40 lleva unos 60 microcontroladores. Todos estos microcontroladores son necesarios para controlar todas sus funciones electrónicas inteligentes a nivel de control y confort. El número de pequeños motores de corriente continua es de unos 12 en un vehículo actual. También se usan motores de corriente alterna cuando se necesita más potencia. La figura 3 da una idea muy gráfica del nivel de complejidad de un vehículo actual, si contar con los productos electrónicos de uso habitual dentro del vehículo pero no integrados en él.

Por último, debemos considerar que los requerimientos más exigentes en la automoción son la robustez a errores, con alta calidad, seguridad y alto margen de temperatura ambiente (-40° a +85°C) y todo ello con bajas emisiones y alta inmunidad electromagnética, a nivel de CEM.

DEFINICIONES

Para entrar en materia es necesario revisar las definiciones básicas. La compatibilidad electromagnética (CEM ó EMC) es la habilidad de un sistema, equipo o producto de funcionar correctamente, sin causar interferencias electromagnéticas a otros equipos pero, al mismo tiempo, ser insensible a las emisiones que puedan causarle otros sistemas. Las interferencias electromagnéticas (EMI) se definen como la energía electromagnética proveniente de sus generadores que afecta adversamente en su entorno, creando respuestas indeseables como funcionamiento degradado del sistema receptor. Pueden ser continuas o transitorias. La susceptibilidad electromagnética es la falta de habilidad de un sistema electrónico para funcionar correctamente sin degradación en presencia de una interferencia electromagnética. La susceptibilidad se caracteriza como una falta de inmunidad.

El Marcado CE o marca CE o de Conformidad Europea es la marca europea para ciertos grupos de servicios o productos industriales. Se apoya en la actual directiva 2004/108/CE. Es el testimonio por parte del fabricante de que su producto cumple con los mínimos requisitos legales y técnicos en materia de seguridad de los Estados miembros de la Unión Europea. Pero, tradicionalmente la industria de la automoción ha usado la marca e en la homologación de los vehículos vendidos en la Unión Europea. Desde el 1 de octubre de 2002, los fabricantes de accesorios electrónicos usados en vehículos también están obligados a obtener la homologación e antes de ponerlos en el mercado. La marca e incluye las pruebas de CEM.

Otras definiciones son: Pre-certificación: Comprobación del cumplimiento de una normativa con ensayos realizados en una entidad NO OFICIAL a tales efectos. Ejemplos: Laboratorios y empresas que dispongan de la instrumentación adecuada. Certificación: Comprobación del cumplimiento de una normativa con ensayos realizados en una ENTIDAD OFICIAL a tales efectos. Homologación: Aprobación oficial de un producto, que "cumple" unas normativas aplicables en el país que se vende. La homologación la realiza una AGENCIA OFICIAL. Ejemplo: Ministerio de Industria.

Las tres reglas básicas del buen diseño de un equipo electromagnéticamente compatible son:

- El equipo no es susceptible a las emisiones de otros equipos.
- El equipo no se causa interferencias a si mismo.
- El equipo no causa interferencias a otros equipos.



Figura 4: Esquema básico de cualquier problema de CEM.

ESQUEMA BÁSICO

La figura 4 muestra el esquema básico a considerar en cualquier problema de CEM, donde siempre se puede identificar uno o más generadores de EMI, uno o más receptores de EMI y uno o más acoplamientos entre los generadores y los receptores de EMI. Los acoplamientos pueden ser: acoplamiento por conducción o acoplamiento inductivo o acoplamiento capacitivo o acoplamiento por radiación.

Para analizar cualquier problema de CEM se deben considerar todas la componentes frecuenciales de las señales involucradas. Para ello se deben considerar las distintas componentes frecuenciales de una perturbación electromagnética o EMI que se propagarán por los diferentes mecanismos de acoplamiento con una atenuación diferente en función de la frecuencia de la misma. Esto es debido a la variación de la impedancia del medio de propagación en función de la frecuencia. Por otra parte, la susceptibilidad de los circuitos y dispositivos electrónicos depende en gran medida de la frecuencia de la perturbación recibida. Esto lleva, por lo tanto, a la conclusión de que para los estudios de CEM es más conveniente la representación de las EMI en el dominio frecuencial (figura 5). De todas formas, las medidas temporales son útiles para identificar el origen y los fenómenos involucrados en la generación y la propagación de las EMI. El margen de frecuencias considerado en las pruebas en el ámbito de la CEM se expande desde los 20 Hz a los 40 GHz.

En el contexto de la CEM se deben considerar todos los niveles de integración de cualquier sistema electrónico: el interior de los circuitos integrados, los componentes en general, las tarjetas de circuito impreso, los cableados, los equipos y los sistemas formados por los equipos.

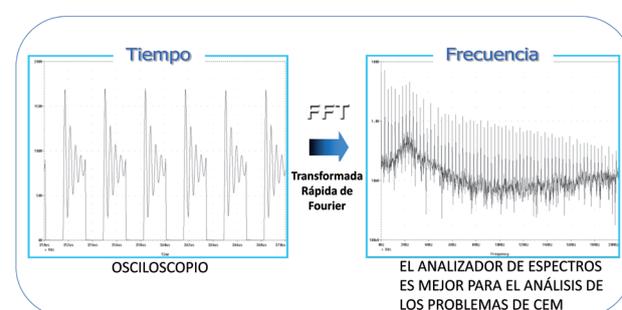


Figura 5: Tiempo/Frecuencia.

GENERADORES, RECEPTORES Y ACOPLAMIENTOS

Un emisor o generador de interferencias (EMI) es un radiador electromagnético interno o externo al sistema, natural o artificial, con suficiente intensidad como para afectar a elementos de va-

rios sistemas electrónicos (receptores o víctimas), provocando un mal funcionamiento. Los generadores pueden ser naturales (rayos, descargas electrostáticas, relámpagos, ...) o artificiales no intencionales (bujías, motores DC y AC, ...) o artificiales intencionales (transmisor de radio, TV, comunicaciones,...).

En un vehículo hay fuentes de EMI tanto internas como externas. Sus frecuencias van desde 1 Hz a las microondas, con altas intensidades de campo eléctrico y magnético. Se llega a medir internamente campos desde 1 a 100V/m. Y algunos campos exteriores pueden llegar también a más de 110V/m. Estamos rodeados de antenas de telecomunicaciones. Aparte de las emisoras de Radio y TV, en poco tiempo la telefonía móvil ha llegado a todas partes y los vehículos deben circular entre transmisores muy potentes y pueden quedar afectados. En el entorno o en el interior de un vehículo, los usuarios pueden usar el mando a distancia de la puerta del garaje, la llave de la puerta del vehículo, aparatos con Bluetooth, reproductores MP3 con wifi y bluetooth, consolas de juegos con wifi, navegadores no integrados y teléfonos móviles con Bluetooth. Los teléfonos móviles son fuentes de EMI importantes por su potencia y por estar cercanos a los posibles elementos receptores de EMI. Su uso está prohibido en los aviones debido a que pueden afectar a los instrumentos de control de navegación. En los vehículos no deben afectar a las funciones integradas de seguridad ni de confort. Todos estos elementos generan EMI de banda estrecha con alta energía a frecuencias determinadas. Por contra, los motores de corriente continua y las bujías generan chispas y con ello EMI de banda ancha, es decir, energía repartida en un amplio espectro de frecuencias, con baja densidad de energía en frecuencias concretas.

Los transitorios en las conmutaciones de cargas pueden generar tensiones 5-15 veces mayores a la tensión de batería (unos 180V para 12V y unos 360 V para 24 V). Son la consecuencia de muchas cargas inductivas en el vehículo. Deben protegerse todas las líneas de alimentación y las líneas de E/S sensibles. También son necesarias las protecciones en la alimentación contra el "load dump" (desconexión de la batería desde 28V a 70V) y la inversión de la conexión de la batería. Un receptor de interferencias (EMI) es un componente o circuito de un sistema electrónico que recibe las interferencias no deseadas del emisor de interferencias, de forma conducida o radiada, afectando al buen funcionamiento del sistema. Una primera clasificación de los acoplamientos es la siguiente. El

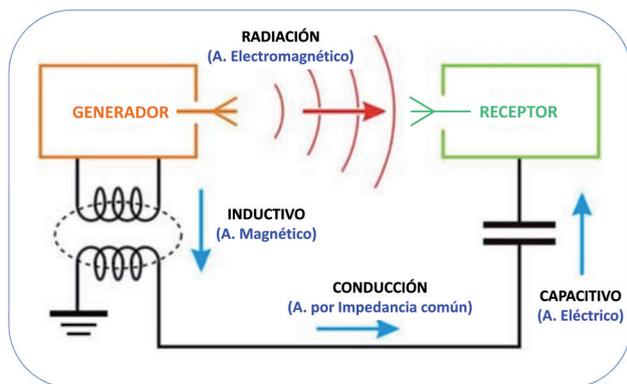


Figura 6: Esquema de los mecanismos de acoplamiento.

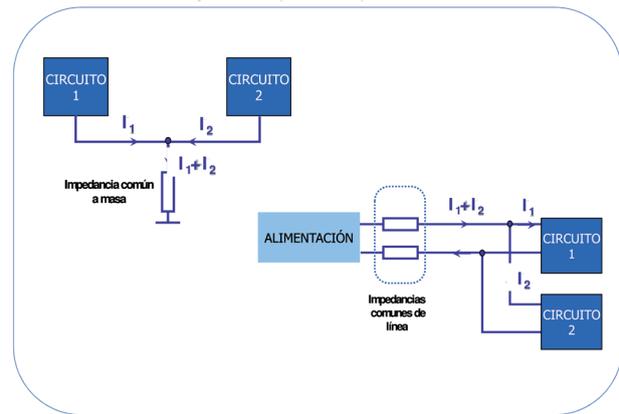


Figura 7: Acoplamiento por conducción.

acoplamiento intrasistema se produce entre partes o componentes de un mismo equipo. Ej: entre un motor y su control digital. En el acoplamiento intersistema la interferencia aparece entre dos equipos que pertenecen a un mismo sistema. Ej: Entre un microcontrolador en la consola y el visualizador de mensajes. Y en el acoplamiento entre equipos independientes, el problema aparece entre dos equipos totalmente independientes. Ej: entre un teléfono móvil y el navegador integrado en la consola.

La figura 6 muestra un esquema simplificado de los mecanismos de acoplamiento. El acoplamiento por conducción puede ser de dos tipos: acoplamiento por impedancia común a masa o acoplamiento por impedancias comunes en las líneas (figura 7). Cuando en ambos tipos de acoplamiento por conducción, en cualquiera de los dos circuitos 1 o 2, tenemos un pico de corriente I_1 o I_2 , debido a uno de los dos circuitos, se puede producir una caída de tensión transitoria en el punto común de conexión, que puede afectar al correcto funcionamiento del otro circuito, si éste es sensible.

Es importante conocer la longitud de onda, l , de una señal para el análisis de varios aspectos de la CEM:

$$l = C / f$$

l (m) longitud de onda, C (km/s) la velocidad de la luz y f (kHz) la frecuencia de la señal.

Cerca del generador de EMI está el llamado campo cercano. A una distancia mayor de $l/2\pi$, se sitúa el llamado campo lejano o campo electromagnético (también llamada zona de ondas planas). El cociente E/H (campo eléctrico/campo magnético)

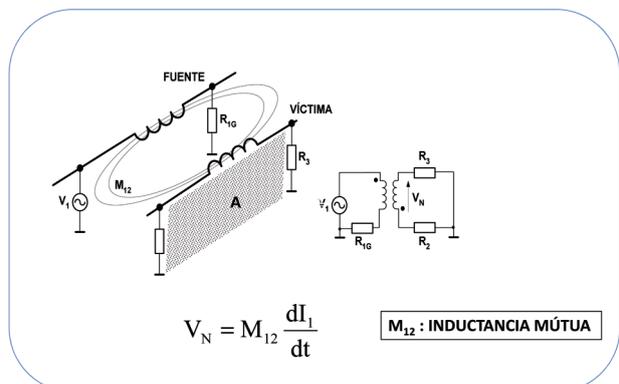


Figura 8: Acoplamiento inductivo.

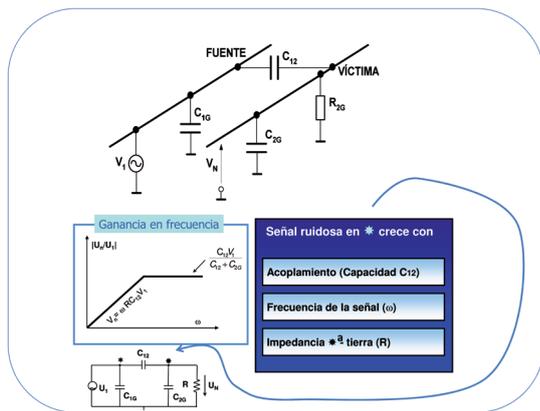


Figura 9: Acoplamiento capacitivo.

tiene unidades de impedancia y se llama impedancia de onda. $E/H = Z_0 = 377 \text{ W}$ en el aire. En el campo cercano esta impedancia está determinada por las características del generador. Los acoplamientos de campo cercano son el acoplamiento inductivo y el capacitivo. La figura 8 muestra el esquema de un acoplamiento inductivo o de campo magnético. En él, dos cables cercanos con sus inductancias equivalentes tienen una inductancia mutua no deseada $M_{1,2}$. En un transformador, esta inductancia mutua entre el primario y el secundario es deseada para cumplir su función. Pero si se trata de un acoplamiento no deseado, en el circuito receptor se induce una tensión interferente no deseada debido a un transitorio de corriente en el circuito generador. Este acoplamiento es más común a bajas frecuencias y con bajas impedancias en los circuitos. Para evitarlo se debe reducir la inductancia mutua aumentando la distancia entre circuitos.

La figura 9 muestra el esquema de un acoplamiento capacitivo o de campo eléctrico. En él, dos conductores cercanos tienen entre ellos una capacidad parásita indeseada $C_{1,2}$. Aquí, si en el generador de EMI hay un transitorio de tensión, se transmite un transitorio de corriente al conductor víctima a través de la capacidad parásita. Este acoplamiento es más común a altas frecuencias y con altas impedancias en los circuitos. Para evitarlo se debe reducir la capacidad mutua separando los circuitos.

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio, transportando energía de un lugar a otro. Su expresión es el vector de Poynting:

$$S \text{ (W/m}^2\text{)} = E \times H = (E \times B) / \mu$$

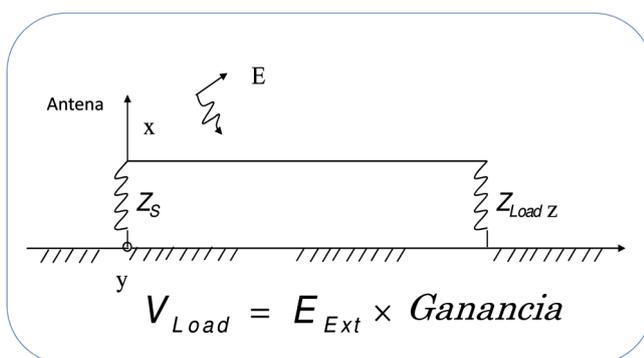


Figura 10: Acoplamiento por radiación (campo electromagnético).

E es el vector de campo eléctrico, H es el vector campo magnético, B es el vector Inducción magnética y μ es la permeabilidad magnética. Más sencillamente, en la figura 10 se muestra el esquema del acoplamiento por radiación o de campo electromagnético, donde la tensión de la señal recibida en el receptor es directamente proporcional a la intensidad de campo en el emisor y a la ganancia. Esta ganancia se estima mediante la teoría de líneas de transmisión y la teoría de antenas.

Otro tipo de problema de CEM son las descargas electrostáticas (ESD). Las cargas electrostáticas se generan en los aislantes por rozamiento. Las ESD provocan fallos sobre los equipos y una posible destrucción a través del efecto "latch-up" en los semiconductores. El cuerpo humano puede llegar a cargarse a 35 kV solo caminando por una moqueta en un ambiente seco con un 20% o 30% de humedad. Las descargas electrostáticas provocan la creación de campo eléctrico muy intenso y corrientes de descarga de arco.

Los posibles efectos de las ESD son: una posible ruptura de dieléctricos, un mal funcionamiento de los equipos y su posible destrucción. Podemos tener efectos de las ESD, con pequeñas chispas al cargar combustible (se han dado casos de incendio), especialmente en días secos y fríos. (ver video en <http://www.youtube.com/watch?v=GWC8F-89zZU>). Deberíamos descargarlos antes de coger la manguera de combustible y no entrar de nuevo dentro del vehículo mientras la manguera está cargando combustible. Algunos vehículos llevan unas tiras rozantes con el suelo para ir descargándolo. Últimamente los neumáticos pueden llevar carga metálica para ir descargando la carga del vehículo. En los asientos se usan materiales antiestáticos para evitar la carga. Depende del tipo de tejido en nuestra vestimenta tendremos más o menos propensión a cargarnos estáticamente.

EL CABLEADO EN EL AUTOMOVIL

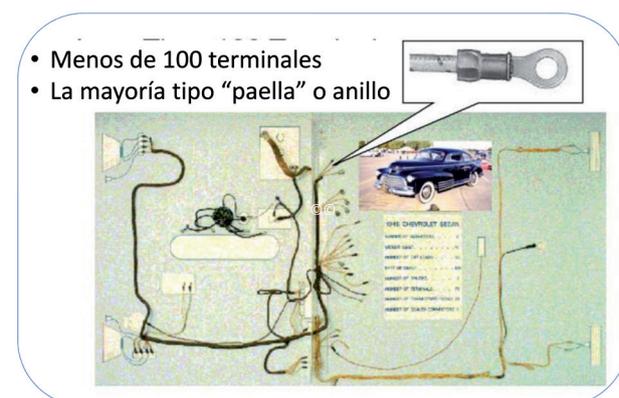


Figura 11: Arquitectura típica de un vehículo de 1946.

La figura 11 muestra la arquitectura típica del cableado de un vehículo de 1946. Era muy simple y usaba menos de 100 terminales tipo anillo o "paella". No usaba conectores específicos para cada tipo de función. A nivel eléctrico prácticamente solo tenía la dinamo de carga de la batería y el sistema de distribución del encendido de las bujías. En aquel tiempo prácticamente no habían problemas de CEM en el interior del vehículo. Sólo era un generador de EMI hacia el exterior cuando solo podía afectar a la recepción de las radios que pudieran estar muy cerca. Empezaron a haber problemas de CEM al instalar una radio de AM en su interior.

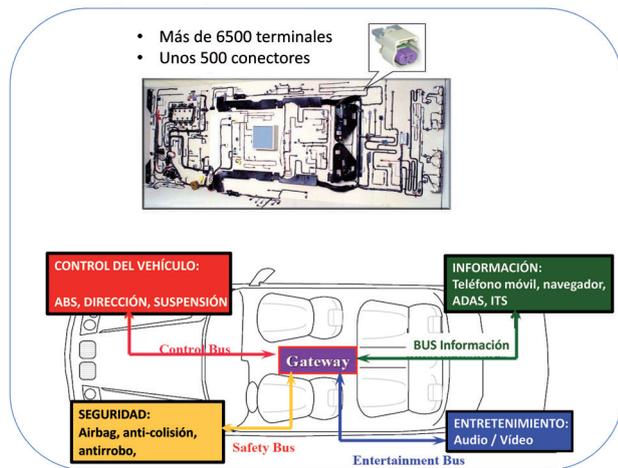


Figura 12: Arquitectura actual de un vehículo.

La figura 12 presenta la arquitectura del cableado de un vehículo actual. El cambio es radical: más de 6500 terminales y unos 500 conectores para unir muchas funciones de control, seguridad, información y entretenimiento, usando varios buses de comunicación de alta y baja velocidad. Aquí pueden surgir bastantes más problemas de CEM.

Un aspecto importante a considerar es la conexión de las masas. La masa es el retorno de todas las señales para cerrar los circuitos. A veces todavía se piensa que la masa puede ser el mismo chasis del vehículo. El conexionado de las masas debe estar bien diseñado para evitar problemas de CEM. Cada señal debe tener su retorno bien definido. El chasis del vehículo no debe ser nunca el retorno de las señales. Se debe evitar que circulen corrientes por el chasis porque no podemos asegurar tener una baja impedancia en todo el chasis.

Históricamente ha habido un aumento continuo de la longitud del cableado en los vehículos. En un vehículo de 1920 se podía tener una longitud de pocos metros de cable. En 1970 se podían tener unos 200 metros. A partir de los 70 hubo un cambio de tendencia y el incremento de longitud año a año fue importante, llegando en 1980 a los 600 metros, en 1990 a los 1000 metros y actualmente ya se llega a más de 1500 metros de cables.

El diseño del cableado es importante porque su ruteado afecta a la CEM, al afectar a los acoplamientos de las interferencias con sus capacidades e inductancias parásitas. Debe entenderse cuales pueden ser las fuentes y los receptores de EMI conectados a través de los cables. El cableado debe clasificarse correctamente, según el tipo de señales que lleve: más o menos corriente o tensión, más o menos frecuencia y el tipo de cable.

Se deben considerar también los tipos de protocolo a usar en los buses de comunicación, tales como los más usados LIN (10 kbps) y CAN (desde 50 kbps a 1 Mbps), el más rápido FLEXRAY (10 Mbps) y el más reciente incorporado en la automoción, el protocolo ETHERNET (10 Gbps) y asignarles el tipo de cable y conectores adecuados (par trenzado con pantalla o sin, cable coaxial, etc...).

PROBLEMAS EN LOS VEHÍCULOS

En los inicios del cambio tecnológico de los vehículos, cuando se empezó a introducir la electrónica en ellos, ya hubieron proble-

mas de CEM. Por ejemplo, en sus inicios, los sistemas ABS eran susceptibles a las EMI. Hubieron accidentes cuando los frenos funcionaron incorrectamente debido a las EMI que interrumpieron el control del sistema ABS. Algunos vehículos equipados con ABS, tuvieron problemas en algunos puntos de las autopistas alemanas donde los frenos quedaron afectados por potentes transmisores de radio cercanos. La solución inmediata consistió en construir un blindaje en forma de malla a lo largo de varios km de la autopista, para atenuar la intensidad de campo electromagnético de los transmisores.

Un fallo en una ambulancia provocó la muerte de un enfermo. El problema fue la susceptibilidad de los equipos médicos a las emisiones radiadas. Una víctima de un ataque cardiaco era llevada al hospital con el monitor/desfibrilador cardiaco conectado a su cuerpo. Cada vez que los enfermeros usaban la radio para requerir consejo médico, el monitor/desfibrilador se apagaba y el enfermo acabó muriendo. La causa fue la combinación de la insuficiente inmunidad del monitor/desfibrilador con la excesiva intensidad de campo de RF de la radio. El techo de la ambulancia se había cambiado de metal a fibra de vidrio y ello aumentó la intensidad de campo que llegaba al monitor/desfibrilador desde la antena de la radio. Antes, el techo metálico actuaba de blindaje. La aceleración repentina imprevista del vehículo ha sido un problema de CEM para los OEM's desde los 80'. El problema se inició con los primeros vehículos con cajas de cambio automático, que también llevaban controles de cruceo electrónicos. Un mal funcionamiento del control de cruceo provocaba una sobre-aceleración, posiblemente creando un bloqueo electrónico del acelerador. Pero los OEM's lo podían aducir presumiblemente a un error del conductor o a un atrapamiento del pie con la alfombrilla o a un pedal pegajoso y sucio. Algún OEM reconoció haber tenido problemas con el control de cruceo debido a EMI's.

Otros problemas consistieron en el paro súbito de un vehículo al circular frente a una base militar, al recibir la interferencia de un radar o en el mal funcionamiento del ABS y el Airbag debido al teléfono móvil del conductor o en la activación del airbag debido a las ondas del bluetooth. En 2010 hubo un auto recall de Toyota debido a un problema de CEM con el acelerador que provocaba aceleraciones repentinas. En 2011 GM publicó que el airbag se podía desactivar debido a la presencia de un reproductor MP3 o un PC o una tableta o una consola de juegos, ...

En relación a los posibles problemas debidos al software y a la CEM a la vez, muchas veces pueden estar relacionados pero otras no. A veces se trata simplemente de pequeños errores no detectados durante la fase de desarrollo. Aunque normalmente los OEM's dicen tener software sin "bugs" (pequeños errores), los estudios realizados por la Carnegie Melon University dicen que un código con los mayores niveles de calidad (como el del transbordador de la NASA) tiene aproximadamente 1 "bug" latente por cada 10.000 líneas de código. Un vehículo de alta gama actual tiene unos 100 millones de líneas de código y por tanto, aplicando esta estadística, podemos esperar tener unos 10.000 "bugs" latentes.

Usualmente son necesarios varios auto "recalls" para la puesta al día de software o bien se aprovecha la oportunidad de las revisiones obligatorias para la descarga de las nuevas versiones del software. Un programa debe ser diseñado para asegurar el

comportamiento seguro del vehículo completo, como un “sistema seguro”. Un vehículo actual lleva entre 40 y 100 microcontroladores en su interior. Todo el software se verifica de forma independiente en cada microcontrolador para detectar problemas de mal funcionamiento. La actual tendencia es usar sistemas operativos bien probados con las máximas garantías, como es el caso del AUTOSAR.

METODOLOGÍA RECOMENDADA

La motivación para realizar un buen diseño de CEM, desde el inicio de un proyecto de automoción, se justifica por la existencia de las directivas legales con sus límites de emisión e inmunidad, la existencia de las normas impuestas por los OEM's, para facilitar el cumplimiento de las directivas legales del vehículo completo y la protección del espectro radioeléctrico, para tener buenas comunicaciones. También se justifica por el aseguramiento del correcto funcionamiento de todos los elementos electrónicos en el vehículo, la prevención de accidentes debidos a problemas de seguridad y para obtener la mejor calidad para la satisfacción del consumidor.

Los condicionantes del diseño CEM son los costes de desarrollo, el coste unitario en producción del componente de automoción, el tiempo de desarrollo, el plan de test para el nivel de calidad elegido y para cumplir con las normas de obligado cumplimiento o requeridas por el OEM y finalmente condiciona la facilidad de producción.

Hace años el enfoque de la CEM era el vehículo completo. Actualmente, el enfoque es el componente de automoción. Debido a la complejidad de los vehículos, el problema de CEM se divide para asegurar que cada componente cumple con unos niveles de CEM superiores a los niveles aplicados en el vehículo completo. Asegurando la conformidad más exigente a nivel de componente se facilita la conformidad a nivel de vehículo.

El rol del suministrador de componentes de automoción es importante, porque tiene la obligación de suministrar sus componentes conformes a los niveles de CEM requeridos por el OEM, sin necesitar acciones correctivas a nivel de vehículo. Para ello debe haber una buena colaboración suministrador-OEM. Es importante comprender los requerimientos de CEM y demostrar su conformidad y validación, debiéndose acordar un plan de validación entre el suministrador y el OEM. Pero, ¿Por qué el suministrador de componentes es importante en el control de la CEM?. El suministrador de componentes tiene un mayor control sobre su diseño y sabe como está realizado. Puede así rediseñar su componente rápidamente, si se necesitan cambios. Con ello, hay una menor probabilidad de retrasar la fecha de inicio de la producción del vehículo (SOP), debido a problemas de conformidad de CEM.

La aplicación de métodos ante un problema de CEM se puede enfocar de cuatro formas. Si se tiene la disponibilidad de una instrumentación mínima adecuada, se puede acometer el problema mediante prueba y error. Es útil, a nivel de la pre-evaluación, pero es un método caro si se espera al final del desarrollo, al necesitar a veces varios ciclos de rediseño y pruebas. Es el método más desaconsejado. La aplicación de reglas de diseño y comprobación se puede usar si se tiene la experiencia práctica en CEM. Ayuda mucho para encontrar las propuestas correctas ya desde el inicio del desarrollo. Si no se tiene esta experiencia interna-

mente, conviene subcontratar a un experto en CEM para tener una buena orientación inicial. Es rentable a nivel económico y temporal. El tercer método es la aproximación por cálculo convencional. Es útil para confirmar las reglas de diseño. Pero no siempre se tienen todos los datos necesarios. También necesita la intervención de un experto en CEM. Por último, se puede aplicar la simulación electromagnética mediante métodos numéricos. Pero el problema es que necesita tiempo y muchos recursos de software muy especializado. Es, sobre todo, muy útil en el inicio de diseño de un sistema complejo y en estudios de investigación. Es muy crítico tener modelos contrastados con medidas que nos aseguren que son muy cercanos a la realidad. Sin estos modelos contrastados la simulación electromagnética sería una pérdida de tiempo y dinero.

Pero, desde el principio del proyecto, ¿Cómo podemos reducir el riesgo de tener problemas de EMI o el riesgo de no pasar las pruebas de conformidad?. Debemos conocer los requerimientos de CEM antes de empezar el diseño, es decir, los requerimientos y las normas de CEM impuestas por los OEM en el caso de los fabricantes de componentes de automoción y las directivas internacionales en el caso de los OEM. Luego se debe evaluar cómo las EMI pueden afectar al diseño a nivel teórico primero y luego realizando unas pruebas de pre-evaluación en el primer prototipo. Posteriormente se deben realizar varias revisiones de diseño desde el punto de vista de la CEM, si es necesario si se sobrepasan los límites requeridos y, finalmente, se deben realizar las pruebas de pre-certificación que deben asegurar la conformidad a las normas.

Por orden de prioridad, los tres modos de prevenir los problemas de interferencias son:

1. Suprimir o atenuar la emisión en su fuente. Siempre es el modo más eficaz.
2. Hacer el camino de acoplamiento tan ineficiente como sea posible.
3. Hacer que el receptor sea menos susceptible a la emisión. Es el modo menos eficaz.

La experiencia demuestra que la aplicación de estas reglas de buen diseño de CEM desde el principio del proyecto puede solventar entre el 80% y el 90% de los problemas. Por tanto, se debe empezar por definir las especificaciones del sistema teniendo en cuenta los requerimientos de CEM aplicables y luego preparar un plan de control de CEM. En este plan de control deben quedar claro los detalles de los requerimientos de CEM, clarificando su interpretación. Debe tener la lista de los documentos aplicables, es decir, las normas y las especificaciones técnicas de los componentes y materiales a usar. Se debe añadir una propuesta de cómo se gestionará el control de la CEM. También se deben definir los procedimientos y las técnicas de diseño. Tener en cuenta que las soluciones de diseño CEM no son únicas y a veces pueden parecer repetitivas.

El plan general de control de CEM debe ser parte de la especificación del nuevo producto. Ello es importante por varias razones. Cuando se tiene en cuenta el ambiente electromagnético (en este caso el vehículo), los proyectos se desarrollan con menor tiempo y se minimiza el riesgo de tener problemas de EMI ya

antes de que el prototipo se ponga en marcha por primera vez. Es caro y no siempre posible añadir componentes al equipo cuando los problemas de EMI aparecen demasiado tarde en el proceso de diseño.

SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La simulación electromagnética del vehículo completo o parcial es factible para realizar estudios de CEM de vehículo. Se pueden estudiar una variedad de problemas: fuentes de EMI idealizadas (dipolos), fuentes de EMI realistas como el cableado, las bujías, el teléfono integrado, el equipo de radio y música, las funciones de control, las funciones ADAS: radares, cámaras digitales, etc. Se debe modelizar el comportamiento del sistema antes de realizar el prototipo y asegurar preventivamente sus prestaciones con las debidas pruebas en laboratorio.

La simulación necesita tener unos buenos modelos que incluyan los aspectos electromagnéticos del diseño, siempre pensando en como será en la producción. Con ello se podrán anticipar los problemas y solventarlos preventivamente. Es clave entender donde pueden estar los generadores, los acoplamientos y los receptores de EMI. El problema de la simulación electromagnética es que requiere una alta inversión de tiempo y dinero para obtener buenos resultados. No existe un único paquete de software que gestione todos los problemas de CEM. Es necesario tener varios paquetes independientes para cubrir todas las necesidades. Algunos de los métodos numéricos más comunes en CEM son: el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FTDT: "Finite Difference Time-Domain"), el método de los momentos" (MoM: "Method of Moments"), el método de los elementos finitos" (FEM: "Finite Element Method"), el modelo de línea de transmisión (TLM: "Transmission Line Model") y la teoría de la difracción uniforme (UTD: "Uniform Theory of Diffraction"). Hay otros pero son menos usados.

Algunas de las marcas importantes en simulación son: FEKO, ANSYS, CST, AGILENT, SONNES SOFT, ANSOFT, REMCOM, MENTOR GRAPHICS, VECTOR FIELDS, COBHAN, COMSOL, HELIC, EFIELD, QUANTIC, ...

REDUCCIÓN DE COSTES EN EL PROCESO DE DISEÑO DE CEM

En la figura 13 se presentan gráficamente las técnicas y los costes en la gestión de la compatibilidad electromagnética. Durante la fase de diseño se tiene la máxima disponibilidad de técnicas

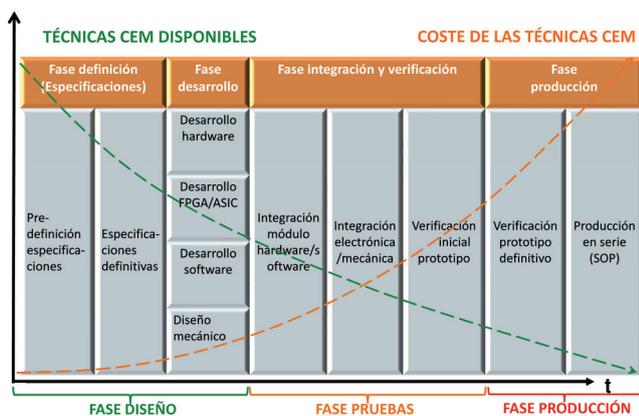


Figura 13: Técnicas y costes en la gestión de la compatibilidad electromagnética.

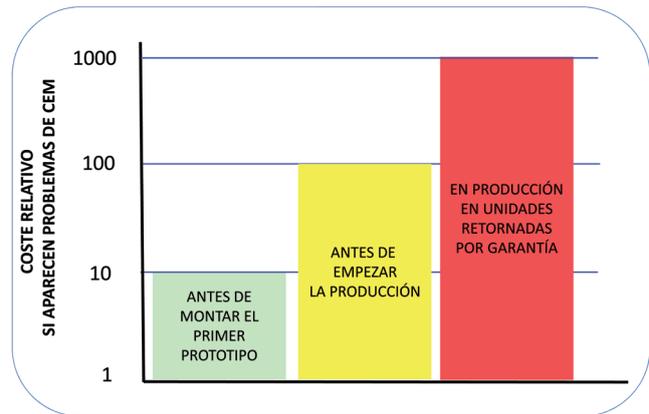


Figura 14: Costes orden de magnitud.

de CEM al menor coste. Cuando se entra en la fase de pruebas en los prototipos, las restricciones de cambio son mayores y cuestan más. La peor situación se produce cuando se descubre el problema de CEM cuando ya se ha entrado en producción, al estar extremadamente limitadas las técnicas disponibles y tener unos costes inaceptables, además de la pérdida de buena imagen de calidad ante el mercado. El orden de magnitud de los costes incurridos se multiplica por 1000, dependiendo del momento en que aparece el problema de CEM a lo largo del proceso de desarrollo del nuevo producto (figura 14).

Las estrategias de solución en la aplicación de técnicas de CEM son difíciles de individualizar. Se deben analizar caso por caso. Muchas veces la solución final es un equilibrio entre diferentes posibilidades. En la práctica, se requiere más de una estrategia para resolver un único problema de CEM (figura 15): el conexionado de las masas, el apantallado, el filtrado, el cableado, la selección de conectores, la localización de componentes, el desacoplo, la supresión de transitorios, el trazado en el circuito impreso y el aislamiento galvánico, etc.

Las técnicas correctivas más usuales a nivel del generador de EMI son: usar la frecuencia menor posible, reducir la superficie de los bucles de masa al máximo posible, localizar los componentes electrónicos más ruidosos lejos de las aperturas en las cajas metálicas y/o apantallarlos, usar supresores de transito-

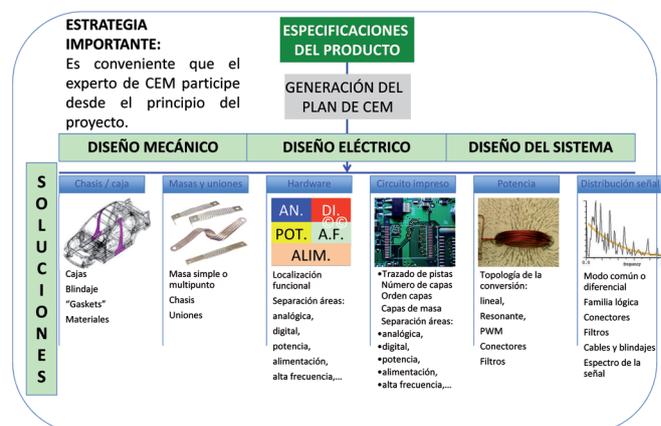


Figura 15: Técnicas de diseño / soluciones / flujo diseño.

rios y filtros, desplazar la frecuencia operativa si es necesario y reducir la energía del generador, si es posible.

Las técnicas correctivas más usuales a nivel de acoplamientos son: usar filtros contra la alta frecuencia en los cables de E/S, usar técnicas de reducción de las EMI en modo común, usar cables apantallados o trenzados y conectores apantallados, reducir la impedancia de la conexión de masa, reducir las dimensiones de los bucles de masa de los cables de interconexión y separar los cables por familias.

Y, por último, las técnicas correctivas más usuales a nivel del receptor de EMI son: reducir el ancho de banda al nivel estrictamente necesario, filtrar los puertos de entrada, reducir la impedancia de las entradas, reducir el área de los bucles de masa en los circuitos víctima, apantallar los componentes electrónicos víctima, usar supresores de transitorios y desplazar la frecuencia operativa, si es necesario.

NORMATIVA Y PRUEBAS

Las normas de CEM se dividen en: las normas internacionales (ISO, IEC, CISPR), las normas regionales (2004/106/CE, SAE, JASO, GB/T,...) y las normas de OEM. Las normas de los OEM están basadas en las normas internacionales, pero con un nivel de exigencia mucho mayor en amplitud, el tipo de impulso, la frecuencia, la energía y el método de test e instalación de la prueba.

Antes de empezar las pruebas de CEM a nivel de vehículo, se debe asegurar que cada uno de los componentes de automoción es conforme con todas las normas requeridas por el OEM, asegurar que el cableado se ha realizado correctamente, evitar que los retornos de señal y de alimentación pasen por el chasis del vehículo, asegurar que se tiene un buen diseño de la distribución de las masas, el cableado debe ser representativo del que se montará en producción y finalmente, el vehículo en su aproximación electromagnética, debe ser lo más cercano a la producción que sea posible.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una introducción a los conceptos básicos de la CEM y la metodología a seguir. Si se desea obtener óptimos resultados en las pruebas de compatibilidad electromagnética,

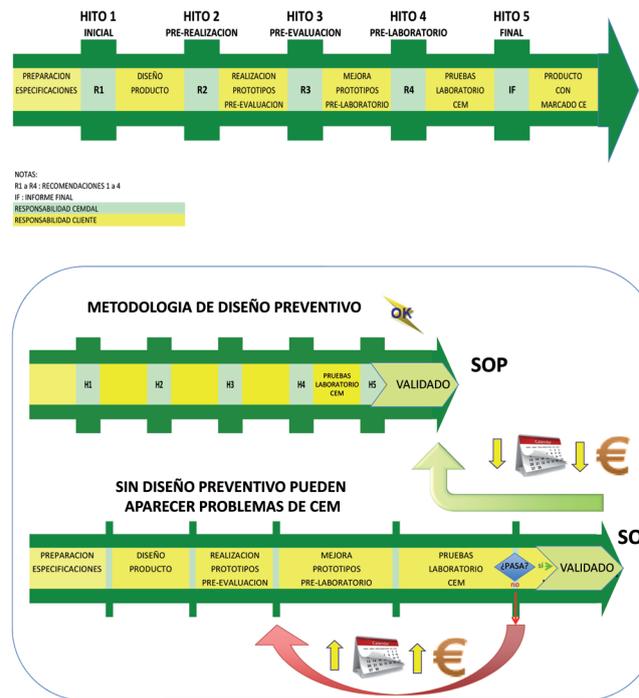


Figura 16: Lo más recomendable diseño preventivo.

es conveniente considerar el buen diseño de CEM lo antes posible, ya a nivel de especificaciones en cualquier nuevo proyecto electrónico de un vehículo o de un componente electrónico de automoción. Cuanto más tarde se considere la CEM en un proyecto, la probabilidad del aumento de costes y tiempos de desarrollo aumentará.

El plan general de control de CEM debe ser parte de la especificación del nuevo producto. Cuando se tiene en cuenta el ambiente electromagnético del vehículo, los proyectos se desarrollan con menor tiempo y se minimiza el riesgo de tener problemas de EMI ya antes de que el prototipo se ponga en marcha por primera vez. Es caro y no siempre posible añadir componentes al equipo cuando los problemas de EMI aparecen demasiado tarde en el proceso de diseño.

References

- F.Daura, J.Balcells, R.Esparza, R.Pallás, INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS,1991, Marcombo.
- Clayton R. Paul, INTRODUCTION TO ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, second edition, 2006, Wiley Interscience.
- Henry Ott, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ENGINEERING, 2009, John Wiley & Sons
- Terence Rybak and Mark Steffka, AUTOMOTIVE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2004, Kluber Academic Publishers