

Introducción sobre la Compatibilidad Electromagnética

(CEM)

Por Ing. Ramón Leonardo Vázquez Fonte, Especialista C en Telemática, Dirección Territorial Las Tunas, e Ing. Onaldo Ramírez Matos, Especialista C en Telemática, Dirección Territorial Santi Spíritus, ETECSA
siesp@ltu.etcusa.cu, onaldo.ramirez@etcusa.cu

Introducción

Es un hecho que vivimos inmersos en un ambiente electromagnético provocado tanto por la radiación voluntariamente emitida por diversos equipos como emisoras de radio, televisiones, radares, etc; como por la radiación no intencionada de otros equipos —máquinas eléctricas, computadoras, líneas de alimentación, entre otros dispositivos electrónicos—. Todas estas radiaciones provocan un acoplamiento de energía con cualquier sistema susceptible a captarlas, que pueden provocar fallos en su funcionamiento satisfactorio.

Cuando se pasa cerca de líneas de alta tensión o cae una descarga eléctrica, ¿por qué se escuchan zumbidos en receptores de radio?

Cuando se viaja en un avión, se visita un hospital, cuando se va habilitar combustible, al entrar a un laboratorio de mediciones, ¿por qué aparecen señales de no utilizar o apagar los teléfonos celulares, radios móviles y juegos electrónicos?

Estas advertencias encierran un problema tecnológico de fondo que a pesar de los grandes avances tecnológicos de la industria electrónica y de telecomunicaciones en las últimas décadas, no se ha logrado

diseñar y construir equipos y dispositivos electrónicos que sean compatibles electromagnéticamente del todo, es decir, que tengan la capacidad de operar de manera satisfactoria dentro de un ambiente electromagnético. Operar satisfactoriamente significa no interferir electromagnéticamente en otros equipos o dispositivos eléctricos o electrónicos y, en caso de ser interferido, no se degraden o fallen.

Dada la amplitud de los elementos que inciden en el estudio de la Compatibilidad Electromagnética, su realización requiere un conocimiento mínimo de las leyes del Electromagnetismo —desde la Electroestática y Magnetostática hasta las leyes que rigen la propagación de ondas, tanto en el espacio libre como guiadas—.

Conceptos y definiciones

Se conoce con el nombre de **perturbación electromagnética** a cualquier fenómeno que pueda degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema. La naturaleza de esta perturbación electromagnética puede ser la de un ruido electromagnético, una señal indeseada o un cambio en el propio medio de propagación [1], [3], [7].

Una **Interferencia Electromagnética (IEM)** es la degradación o la falla en el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema eléctrico, electrónico o de telecomunicaciones causado por cualquier perturbación electromagnética. Aunque, tradicionalmente, el concepto ha sido asociado con fenómenos de radiación o conducción de campos electromagnéticos, este tiene una acepción más amplia que incluye fenómenos como armónicos, transitorios, rayos, descargas electrostáticas, ruido, fluctuaciones de tensión [1], [2], [3].

La **Compatibilidad Electromagnética (CEM)** es la aptitud de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético, sin introducir perturbaciones intolerables en ese ambiente o en otros dispositivos/equipos/sistemas y soportar las producidas por otros dispositivos/equipos/sistemas. Usualmente, la compatibilidad electromagnética está regulada por normas que rigen cuáles son los requisitos que deben cumplir los equipos. También se agrupa bajo el título de **Compatibilidad Electromagnética** al estudio de la problemática general de la generación, propagación, influencia sobre otros disposi-

tivos/equipos/sistemas y medidas de corrección de interferencias electromagnéticas [1], [3].

El término **Susceptibilidad Electromagnética (SEM)** y su opuesto **Inmunidad Electromagnética** se emplean para indicar la mayor o menor sensibilidad de un dispositivo/equipo/sistema a ser afectado por las interferencias electromagnéticas, en otras palabras, el nivel de susceptibilidad de un equipo es la propiedad que tiene este para funcionar correctamente en un ambiente de interferencia. **La susceptibilidad** está definida como la capacidad de un dispositivo o equipo eléctrico o electrónico para generar una respuesta no deseada cuando es sometido a una perturbación electromagnética y **la inmunidad** es como la capacidad de un sistema para continuar operando satisfactoriamente al estar sometido a perturbaciones electromagnéticas [3].

Interferencia Electromagnética (IEM)

Los elementos básicos que intervienen en el análisis de cualquier situación de interferencia pueden expresarse en tres componentes, como se refleja en la figura 1



Figura 1 Partes principales del fenómeno de Interferencia Electromagnética.
Fuente: elaboración propia

El estudio de los fenómenos de Interferencia Electromagnética y la solución a los problemas que ocasiona han adquirido una notable relevancia en el desarrollo y desempeño de los modernos dispositivos, equipos y sistemas eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones. En el ámbito mundial, el entorno en el que interactúan los equipos se hace cada día más complejo debido a dos factores principales: la creciente vulnerabilidad de estos dispositivos y equipos y, al mismo tiempo, su capacidad de interferir el funcionamiento de otro equipo.

El fenómeno de Interferencia Electromagnética no es de reciente aparición. Los primeros problemas de IEM se iniciaron hacia 1830 con la invención del telégrafo y se empezaron a intensificar hacia finales del siglo XIX, cuando aparecieron y comenzaron a interactuar las redes telegráficas y telefónicas con los generadores de energía eléctrica y las líneas de transmisión de alta tensión. Con la aparición de los dispositivos de estado sólido de potencia, la aparición del tiristor en 1957 y del transistor bipolar de potencia, se cambiaba entonces de modo radical la forma de tratar la energía eléctrica: se pasaba del convertidor rotativo al convertidor estático o conmutado. Gracias a las ventajas que ofrecían estos nuevos dispositivos, aumentó paulatinamente la proporción de energía eléctrica generada que era procesada por algún tipo de convertidor estático antes de ser utilizada, hasta llegar a nuestros días, complejizando el problema de Interferencia Electromagnética.

Estas dificultades llevaron a la ingeniería a tratar de reducir la gravedad del problema. El gobierno norteamericano creó en 1934 la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), para regular el uso de las comunicaciones inalámbricas. Posteriormente, otros países fueron creando organizaciones similares: Alemania, con sus normas VDE, y Suiza, con su *Comité Inter-*

nacional Special des Perturbations Radioelectriques (CISPR), en Cuba el *Comité Electrotécnico Nacional*; establecidos para determinar métodos y límites de IEM.

En ETECSA, hasta hace muy poco tiempo, el tema ha comenzado a tomar relevancia debido a la gran cantidad de afectaciones provocadas por las descargas atmosféricas a las diferentes tecnologías instaladas; esto conllevó a la creación del Comité Electrotécnico en la Empresa.

La misma evolución de los equipos electrónicos modernos los ha hecho más sensibles a perturbaciones. El usuario de estos, sin embargo, desea que su funcionamiento sea lo más confiable y seguro posible, características particularmente importantes en un mundo moderno que depende de ellos para su quehacer cotidiano.

Para que la Interferencia Electromagnética constituya un problema deben estar presentes al mismo tiempo: la fuente generadora de la perturbación —rayos, motores, teléfono móvil, cables de alimentación, entre otras—, el receptor o víctima afectado por estas fuentes —cables de datos, computadores, dispositivos, otros— y el canal o vía de acoplamiento entre ambos.

Para analizar este fenómeno, en primer lugar, hay que buscar cuáles son las fuentes de las posibles Interferencias Electromagnéticas junto con sus mecanismos de acoplamiento de para poder encontrar, posteriormente, las mejores soluciones a los problemas derivados de la transferencia de energía electromagnética indeseada.

En función de los diferentes caminos de acoplamiento, se puede realizar la siguiente clasificación de las interferencias:

♦ **Interferencias conducidas:** cuando el medio de propagación es un conductor eléctrico que une la fuente de interferencias con el receptor —cables de alimentación o señal, pantallas o chasis metálicos, etc.—.

♦ **Interferencias radiadas:** cuando la propagación se realiza mediante el campo electromagnético de radiación; esto es cuando:

$Distancia\ de\ propagación > longitud\ de\ onda / 2p$ [1]-[2].

♦ **Interferencias acopladas:** cuando la transferencia de energía se realiza básicamente a través de un campo eléctrico o magnético. Podría considerarse como un caso particular de las interferencias radiadas cuando se tiene que:

$Distancia\ de\ propagación < longitud\ de\ onda / 2p$ [1]-[2].

Dentro de esta clase de interferencias acopladas pueden distinguirse los dos tipos siguientes:

♦ **Capacitivas:** acoplamiento a través del campo eléctrico.

♦ **Inductivas:** acoplamiento a través del campo magnético.

Siguiendo el esquema mostrado en la figura 1, las posibles soluciones a los efectos nocivos de IEM son

♦ Reducción o eliminación de la emisión en la fuente.

♦ Incremento de la inmunidad del receptor.

♦ Amortiguación de la propagación de la perturbación a través del canal de acoplamiento, de manera que se reduzca la interacción fuente-receptor.

El hecho de que una condición de perturbaciones constituya un suceso potencialmente perjudicial, dependerá entre otros factores, de:

♦ El nivel de la perturbación —magnitud y forma de onda, rango de frecuencia, contenido de energía, máxima tasa de variación, frecuencia de ocurrencia y duración, etc.—.

♦ La susceptibilidad del receptor —respuesta de frecuencia, condiciones de diseño, presencia de elementos de protección, materiales, etc.—.

♦ Las condiciones en las cuales se efectúe el acoplamiento —por conducción o por radiación, características del medio de propagación, atenuación, etc.—.

Las normativas actuales sobre perturbaciones utilizan como criterio para clasificarlas la frecuencia de las mismas. Se habla de armónicos cuando se hace referencia a las perturbaciones que se encuentran por debajo del armónico de orden 50, tomando como frecuencia fundamental la nominal de la red de alimentación; para el caso de Cuba es 60 Hz. Se habla de perturbaciones de alta frecuencia, o perturbaciones EMI, aquellas que son superiores a los 10 kHz hasta los 30 MHz. Los métodos de medida y límites permitidos en ambos casos son totalmente diferentes. De forma gráfica, puede representarse esta clasificación de las perturbaciones en el dominio frecuencial a través de la figura 2.

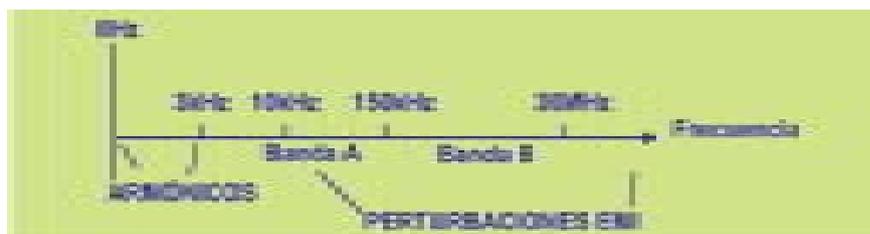


Figura 2 Clasificación de las perturbaciones conducidas según su frecuencia [2]

La forma de onda sinusoidal de la red eléctrica puede ser distorsionada por un conjunto de cargas llamadas distorsionantes o no lineales y como consecuencia, se producen señales de corrientes y tensiones armónicas que están formadas por la onda fundamental y un determinado número de sinusoides de frecuencias múltiplo de la frecuencia principal y amplitudes diferentes. Los armónicos pueden ser de orden par o impar, en las redes eléctricas los más comunes son los impares porque los pares se anulan debido a la simetría de la señal.

Es preciso anotar que un sistema puede ser considerado simultáneamente como el receptor de una perturbación y como el emisor de otra. En este sentido vienen trabajando centros de investigación alrededor del mundo, incluido Cuba, con el fin de caracterizar electromagnéticamente el medio y diseñar y construir equipos eléctricos o electrónicos compatibles electromagnéticamente.

Compatibilidad Electromagnética

La Compatibilidad Electromagnética (CEM) de los dispositivos y equipos eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones es hoy, a escala mundial, una de las principales exigencias de calidad. La Unión Europea por ejemplo, ha establecido la denominada directiva de CEM, de obligatorio cumplimiento, que cubre un gran conjunto de sistemas y equipos eléctricos y electrónicos comercializados en su territorio. Por otra parte, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, impone restricciones a las emisiones radiadas y conducidas de los dispositivos digitales que sean comercializados en dicho país [1].

A pesar de la importancia fundamental que ha adquirido la CEM en los últimos tiempos, los métodos y soluciones de esta disciplina todavía no han alcanzado una madurez suficiente. Una posible causa de este hecho es el carácter tan multidisciplinar que conlleva esta materia, dado que requiere tanto conocimientos teóricos como tecnológicos y de instru-

mentación. Es importante considerar la importancia de este tema de investigación debido a que la aplicación de remedios *a posteriori* son muy costosos [1], [3].

Los aparatos eléctricos, electromecánicos o electrónicos emiten usualmente energía electromagnética en el curso de sus operaciones normales. Las emisiones emitidas por estos equipos pueden dividirse en las dos siguientes categorías [2]:

1. Señales emitidas intencionadamente

Estas señales son las emitidas por equipos tales como radar, equipos de comunicación, emisoras de radio y TV, equipos de navegación, sistemas de rectificación de la energía eléctrica, etc. Estas emisiones pueden interferir con otros equipos, especialmente cuando no se ha llevado a cabo una buena planificación del espectro de frecuencias.

2. Señales emitidas sin intención

Dentro de este tipo de señales se pueden distinguir varias fuentes:

- ♦ **Emisiones indeseadas** que se dan en el curso de la operación normal de los equipos emisores señalados anteriormente. Un ejemplo de puede ser cuando estos equipos emiten con un ancho de banda mayor que el previsto.

- ♦ Los procesos de **modulación/demodulación** son inherentemente generadores de ruido dado que requieren el uso de dispositivos activos no lineales que dan lugar a la emisión de subarmónicos de la frecuencia de la señal tratada.

- ♦ **Generación de arcos o corrientes transitorias**, producidos en muchos dispositivos durante su conexión o desconexión, por ejemplo, en la puesta en marcha de motores, dispositivos controlados por termostatos, electrodomésticos.

- ♦ **Descargas atmosféricas**, se calcula que estas descargas producen del 50 al 70 % de los fallos de suministro en instalaciones de media y alta tensión. La emisión producida por los rayos es captada por los cables en forma de un pulso de tensión y este es transmitido a todos los equipos conectados a esta línea.

- ♦ **Descargas electrostáticas**, cuando se produce una acumulación de carga en algún cuerpo, la carga depositada busca el camino de menor resistencia para descargarse a tierra. Este proceso de descarga da lugar a unas corrientes rápidamente cambiantes que provocan desde pequeñas perturbaciones hasta serios *shocks* a equipos y personas. Las causas de la acumulación de carga pueden ser muy diversas aunque algunas de las más usuales son: cuando dos materiales de diferente constante dieléctrica se frotan, al calentar un material por efecto termoelectrónico, por contacto con un cuerpo cargado.

Uno de los casos más elocuentes de la descarga electrostática se da cuando una persona con calzado aislante camina por una alfombra sintética. Al caminar, por frotamiento, se va recogiendo carga de la alfombra, y puede llegar a existir una diferencia de tensión entre la persona que camina y la tierra de 15 Kv. La carga acumulada puede descargarse, por ejemplo, cuando esta persona se aproxima a algún objeto metálico, tal como la cerradura de una puerta o bien la carcasa de un equipo electrónico. Una descarga de varios microcoulombios realizada en tiempos del orden de los microsegundos puede originar corrientes que afecten seriamente a las personas o los equipos.

- ♦ **Pulso electromagnético**, este pulso se origina en una explosión nuclear debido al choque de los rayos X emitidos con los materiales de los equipos. Este choque provoca una emisión incontrolada de electrones, creando el movimiento repentino de todos estos electrones un pulso electromagnético de considerable magnitud —se estima que es equivalente al producido por el efecto combinado de cientos de rayos—. También se origina este pulso por la interacción de la radiación generada en la explosión con las moléculas del aire al suponer que, en este, se manifiesten variedades.

Algunas medidas que se deben tener en cuenta para disminuir los efectos de la interferencia electromagnética son:

- ♦ Separar la energía y los cables de los DATOS —mínimo de separación de 20 km—.

- ♦ Los cables de diversas familias deben cruzarse de modo perpendicular.

- ♦ Proporcionar buena continuidad eléctrica del conductor de tierra entre los diferentes dispositivos, con el objetivo de alcanzar bajas impedancias de acoplamiento.

- ♦ No mezclar los cables de transmisión y los cables de los datos en un sistema del *trunking*.

Espectro de frecuencias

Dado el espectacular incremento de las demandas del espectro de frecuencias y al hecho de que el espectro práctico es finito, los problemas de CEM son fundamentales en este punto. Básicamente, el crecimiento de las demandas del espectro electromagnético viene motivado por el desarrollo de las tecnologías de las comunicaciones, sobre todo, lo que se refiere a los sistemas de transmisión de datos empleados en la interconexión de ordenadores y al creciente uso de sistemas de comunicación personal tales como los teléfonos móviles.

En consecuencia, todas estas demandas de servicios de telecomunicaciones se traducen en una creciente necesidad de aumentar los canales de comunicación con el tiempo. Las tendencias actuales para solucionar este problema son: compresión de la información, nuevos esquemas de modulación, distribución eficaz de los canales, nuevos sistemas de arquitectura de comunicaciones y organización

Ejemplos

La necesidad de mantener una buena Compatibilidad Electromagnética obliga a establecer los límites de inmunidad, compatibilidad, emisión y pruebas para los equipos conectados a la red. La CEM considera todas las perturbaciones electromagnéticas por radiación, conducción e inducción en el rango de frecuencias desde la AC hasta los GHz.

Algunos ejemplos donde se ha puesto de manifiesto la necesidad de la CEM son:

Líneas de distribución de potencia eléctrica. Estas líneas pueden captar interferencias de rayos y tormentas así como transportar transitorios debido a conmutaciones que pueden afectar seriamente la operación de computadores y otros equipos.

Conmutaciones y relés. Las descargas eléctricas asociadas con las aperturas y cierres de relés son una causa importante de IEM.

Equipos de telefonía. Estos equipos son susceptibles a las interferencias producidas por estaciones de radio y televisión, radares, plantas industriales, etc.

Radioastronomía. Dado el nivel tan bajo de la señal que se intenta captar, los equipos usados en Radioastronomía son susceptibles a los pulsos de los relojes digitales de los dispositivos, fuentes de alimentación, radio, televisión, etc.

Efectos biológicos. Especialmente con respecto a la incidencia que puede tener sobre el cuerpo humano la exposición a campos electromagnéticos.

Navegación aérea. En múltiples casos se han detectado errores en los equipos de navegación debido al uso de aparatos electrónicos convencionales —ordenadores portátiles, teléfonos móviles, videoconsolas, etc.—.

Equipos militares. Básicamente en misiles y sistemas guiados, la CEM ocupa un lugar fundamental. También se han aportado datos sobre los fallos en vehículos espaciales a causa de problemas de CEM.

Seguridad en las comunicaciones. Las posibles emisiones electromagnéticas no intencionadas en los equipos diseñados a tal fin ponen en evidente peligro la seguridad.

Conclusiones

En este trabajo se abordaron definiciones del fenómeno de Compatibilidad Electromagnética y se realizó una breve descripción de muchas de sus características principales. Se expuso la clasificación de la Interferencia Electromagnética en función de la vía de acoplamiento hacia la carga o víctima —radiadas o conducidas—. Se concluyó que las emisiones de energía electromagnética que emiten, usualmente, los aparatos eléctricos, electromecánicos o electrónicos, en el curso de sus operaciones normales, pueden ser intencionales —por lo tanto, no son fáciles de eliminar, es el caso de emisoras de radio locales, teléfonos celulares— o pueden ser señales emitidas sin intención. 

Referencias bibliográficas

- [1] Sebastian, J. L. *Fundamentos de Compatibilidad Electromagnética*. 1^{ra} edición. España: Addison-Wesley Iberoamericana, 1999.
- [2] Balcells, J.; Daura, F.; Esparza, R. y Pallás, R. *Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos*. 1^{ra} edición. Barcelona, España: Marcombo Boixareu Editores, 1992.
- [3] Clayton, R. Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. USA: Wiley InterScience, 1992.
- [4] Degauge, Pierre; and Hamelin, Joel. *Electromagnetic Compatibility*. UK: Oxford, 1990.
- [5] Keiser, Bernhard. *Principles of Electromagnetic Compatibility*. USA: Artech House Inc., 1987.
- [6] Kodali, V. Prasad. *Engineering Electromagnetic Compatibility*. USA: IEEE Press, 1996.
- [7] Torres, H., Barreto. "Las perturbaciones electromagnéticas". *Revista Innovación y Ciencia*, vol. V, no. 2 (1996): 30-37.
- [8] Procobre. "Calidad de la energía" (2005). Disponible en: <http://www.procobrevenezuela.org> (Consulta: noviembre/2007).
- [9] IEC. "Compatibilidad electromagnética". Disponible en <http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/000022> (Consulta: noviembre/ 2007).
- [10] Félíce, Eric. *Perturbaciones armónicas*. España: Paraninfo, 2000, págs. 3-15.