

FRECUENCIAS ASOCIADAS A LOS FENÓMENOS ESTUDIADOS POR LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN AMBIENTES RESIDENCIAL-COMERCIAL, INDUSTRIAL Y HOSPITALARIO

Pablo Massa(1), Francisco Baravalle(1)

(1) Laboratorio LEDE-SIECIT, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle N° 48 y 116 - La Plata - Bs. As. Argentina. francisco_baravalle@yahoo.com

PALABRAS CLAVE: Ambiente Electromagnético, Perturbación Electromagnética, Interferencia Electromagnética, Compatibilidad Electromagnética (CEM), Emisión, Inmunidad, Conducido, Radiado, Rangos de Frecuencias, Electromagnético (EM).

Resumen

El presente trabajo describe los principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas y los conceptos generales asociados a la Compatibilidad Electromagnética (CEM). Analiza además los modos de propagación de las perturbaciones conducida y radiada, junto a la subdivisión en dos aspectos clave: emisión e inmunidad. En base a los conceptos antes mencionados se distinguen las frecuencias que caracterizan a cada uno de los ensayos y mediciones CEM que en la actualidad son requeridos para evaluar el comportamiento (en relación con las perturbaciones) de equipos eléctricos y electrónicos en ambientes residenciales-comerciales, industriales y hospitalarios.

INTRODUCCIÓN

Las señales electromagnéticas son el resultado de corrientes y tensiones eléctricas. Donde se utilice la electricidad para manejar algún equipo, una señal electromagnética también aparece. Estas señales pueden utilizarse tanto para transmitir información desde un punto a otro, o simplemente pueden ser señales auxiliares para el funcionamiento de un equipo. Donde las señales son no previstas para una dada función, se habla por lo general de ruido electromagnético. Este ruido es el que puede originar el mal funcionamiento de un equipo, y es por ello que los fabricantes deben esforzarse para mitigar los efectos del ruido.

Hasta cierto punto, las señales electromagnéticas son un fenómeno natural. Uno de los fenómenos más conocidos es el rayo, el cual no es más que un flujo de corriente desde una nube a la tierra. Esta corriente origina un campo electromagnético muy intenso. Ahora bien, en los equipos conectados a una red eléctrica, es posible identificar dos fuentes principales de ruido electromagnético: la propia red de energía eléctrica y los sistemas de accionamiento de motores. En el otro frente, es cada vez más amplia la forma de generar señales con la finalidad de transmitir las a distancia, como es el caso de la TV. Con el incremento de estas comunicaciones y los servicios inalámbricos, el conocimiento de estas señales se ha convertido en una pieza clave para interpretar problemas asociados con el ruido.

TÉRMINOS PRINCIPALES

A continuación se detallan los términos más importantes a considerar en el campo CEM:

Términos básicos

- Ambiente electromagnético: la suma de fenómenos electromagnéticos existentes en una dada localización.
- Perturbación electromagnética: cualquier fenómeno electromagnético que puede degradar el desempeño de un dispositivo, equipo o sistema, o afectar negativamente la vida o la materia inerte. Puede ser ruido electromagnético, una señal no deseada o un cambio en el propio medio de propagación.

- Degradación del desempeño: un cambio indeseado del desempeño normal de un dispositivo, equipo o sistema.
- Interferencia electromagnética (EMI): degradación del desempeño de un dispositivo, equipo o sistema debido a una perturbación electromagnética.
- Compatibilidad Electromagnética: habilidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones intolerables en el mencionado ambiente a cualquier otro.
- Emisión (electromagnética): fenómeno por el cual emana energía desde una fuente.
- Inmunidad (a una perturbación): habilidad de un dispositivo, equipo o sistema para desempeñarse normalmente sin degradación de su desempeño ante la presencia de una perturbación electromagnética.
- Susceptibilidad (electromagnética): pérdida de inmunidad a una perturbación electromagnética.

Términos combinados

- Nivel de emisión: nivel de una dada perturbación electromagnética emitida desde un particular dispositivo, equipo o sistema medido de una determinada forma.
- Límite de emisión: máximo permisible nivel de emisión.
- Nivel de inmunidad: máximo nivel de una dada perturbación electromagnética, incidente de una determinada manera sobre un dispositivo, equipo o sistema, en el cual no ocurre una degradación de sus condiciones de operación.
- Límite de inmunidad: mínimo nivel de inmunidad requerido.

Forma elemental de un problema de interferencia electromagnética

En línea con su definición, en su forma elemental, un problema de interferencia electromagnética (EMI), está formado por tres actores:

- 1) un emisor, es decir, una fuente que emite una perturbación electromagnética.
- 2) un receptor, es decir, un dispositivo, equipo o sistema susceptible que muestra una degradación de su desempeño.
- 3) un medio entre ellos, denominado comúnmente, camino de acoplamiento.



Fig. 1. Forma básica del problema EMI.

Aparecen así los dos aspectos clave de los problemas EMI: emisión y susceptibilidad (o inmunidad, términos que se intercambian).

Aspectos clave en CEM

En una hipotética situación electromagnéticamente compatible, todos los dispositivos se encuentran en armonía en el ambiente que comparten. La adición de un dispositivo a este ambiente sin causar EMI significa que el dispositivo tiene la habilidad de ser electromagnéticamente compatible; de allí se origina entonces la definición de CEM. La deseada armonía se da con dos características fundamentales:

- 1) “funcionar satisfactoriamente”: el dispositivo, equipo o sistema puede tolerar al resto, es decir, no es susceptible (o es inmune) a perturbaciones presentes en el ambiente.
- 2) “sin introducir perturbaciones intolerables”: el dispositivo, equipo o sistema no ofende a otros, es decir, su nivel de emisión no origina interferencia electromagnética.

Es por ello entonces que los dos aspectos clave de los problemas EMI: emisión y susceptibilidad, son los dos aspectos de CEM, tal como se muestra en la figura 2.

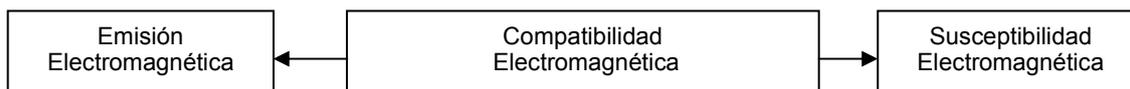


Fig. 2. Subdivisión de CEM en los dos aspectos clave.

PRINCIPALES FENÓMENOS QUE DAN ORIGEN A LAS PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

Por lo general, la transferencia de energía electromagnética (con respecto a la prevención de interferencias), se divide en cuatro subgrupos: emisiones radiadas, inmunidad radiada, emisiones conducidas e inmunidad conducida.

Las emisiones electromagnéticas pueden aparecer a partir de perturbaciones provenientes del cable de alimentación, desde un recinto metálico que contiene un subsistema, desde un cable de un subsistema o desde un componente electrónico dentro de un gabinete no metálico como se ilustra en la figura 3a). Aunque la intención principal de este cable es transferir la energía eléctrica para el sistema, es importante tener en cuenta de que otras señales de mucho mayor frecuencia pueden estar presentes en dicho cable. Una vez que estas corrientes de alta frecuencia aparecen en este cable (de un metro de longitud o más), se irradian bastante eficazmente. Pero además, el cable funciona como una "antena" eficiente de recepción y recoge emisiones radiadas de otros sistemas electrónicos en su cercanía, como se muestra en la figura 3b).

Sin embargo, las emisiones y la susceptibilidad a la energía electromagnética no sólo se originan por ondas electromagnéticas a través del aire, sino también por la conducción directa en conductores metálicos como se muestra en la figura 3c) y 3d).

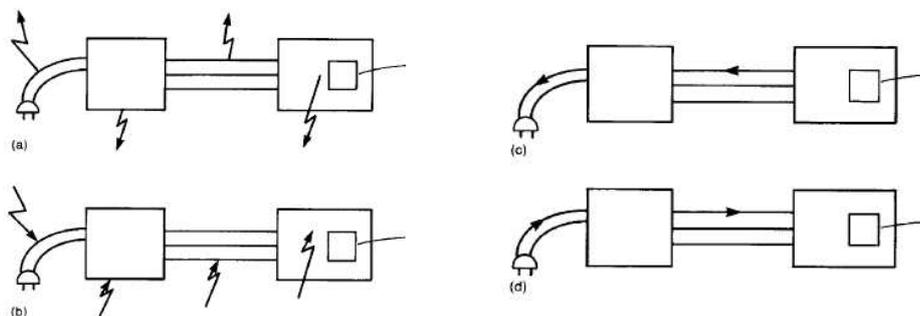


Fig. 3. a) emisión radiada, b) inmunidad radiada, c) emisión conducida y d) inmunidad conducida.

En relación a los modos radiados y conducidos, tres categorías de fenómenos ambientales se han establecido para describir las perturbaciones:

- fenómenos de baja frecuencia (origen en cualquier fuente, excepto DES).
- fenómenos de alta frecuencia (origen en cualquier fuente, excepto DES).
- descargas electrostáticas (DES), tanto conducidas como radiadas.

Formalmente, cuando se habla del ambiente electromagnético, la longitud de onda (λ) de la perturbación es la magnitud que define "largo o grande" y "corto o pequeño". Un sistema es pequeño o un cable es corto, si λ es mucho más grande que sus dimensiones. En tal situación, la frecuencia al ser inversamente proporcional a λ , es baja. "Largo, grande o alto" aplica cuando las dimensiones respecto a λ , se dicen, son más grande que 1. Sin embargo, en el contexto de la normativa vigente internacional, el punto de referencia es 9 kHz. Es decir, si la parte dominante del espectro de frecuencias de la perturbación se sitúa debajo de este valor, la frecuencia es baja, caso contrario, es alta.

Las perturbaciones radiadas aparecen en el medio que rodea al equipo, mientras que las conducidas lo hacen en varios medios de tipo metálico. El concepto de puertos, a través de los cuales las perturbaciones tienen un impacto sobre el equipo, permiten una distinción

entre varios medios: 1) carcasa o gabinete, 2) cable principal de corriente alterna CA, 3) cable principal de alimentación en corriente continua CC, 4) líneas de control o señal, 5) interface entre el sistema y la tierra o la referencia que utiliza.

A continuación se resumen los principales fenómenos que originan perturbaciones:

| Fenómenos Conducidos en Baja Frecuencia | Fenómenos Conducidos en Alta Frecuencia |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Armónicos e interarmónicos: producto de cargas eléctricas no lineales débiles (productos electrónicos con rectificadores, computadoras, TV) y fuertes (variadores de velocidad de motores, soldadoras). - Fluctuaciones, huecos e interrupciones y desbalance de tensión de red eléctrica: debido a conmutación de cargas y bancos de capacitores, cortocircuitos. - Variaciones en la frecuencia de tensión de red eléctrica por desbalances en la red. - Tensiones inducidas de baja frecuencia por la proximidad de cables señal/control con cables de potencia. | <ul style="list-style-type: none"> - Corrientes y tensiones inducidas por ondas continuas (CW) permanentes en el tiempo (señales de TV, radio y armónicos) sobre conductores expuestos de CA, CC, señal/control. - Transitorios unidireccionales (baja y alta energía) originados por conmutación de fuertes cargas, descargas atmosféricas, arcos eléctricos de recierre de interruptores. - Transitorios oscilatorios debido a la conmutación de bancos de capacitores. |
| Fenómenos Radiados en Baja Frecuencia | Fenómenos Radiados en Alta Frecuencia |
| <ul style="list-style-type: none"> - Campos magnéticos (cercanía de cables y transformadores de potencia) y eléctricos (subestaciones de media y alta tensión). | <ul style="list-style-type: none"> - Campos magnéticos (cocinas de inducción) y eléctricos (electroerosión, soldadura por arco) - Campos electromagnéticos (ondas continuas u originados por transitorios) |

Tabla 1. Principales fenómenos que originan perturbaciones.

A los mencionados fenómenos es necesario agregar las descargas electrostáticas (DES), las cuales surgen cuando una persona u objeto se aproxima a otra persona u objeto. El receptor de la descarga es sometido primero a un campo eléctrico asociado a la carga y luego, una vez que el aislante se rompe, aparece una corriente transitoria que origina a su vez un campo electromagnético transitorio. El fenómeno DES es fuertemente dependiente de la humedad ambiente, la temperatura y la naturaleza dieléctrica de los aislantes del medio.

CARACTERIZACIÓN DE FRECUENCIAS PARA ENSAYOS Y MEDICIONES CEM

La normativa internacional CEM (IEC: Internacional Eletrotechnical Commission y CISPR: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectrique), cubre el rango de 0 Hz a 400 GHz. Sin embargo, no todas las frecuencias en el mencionado rango se encuentran reguladas para lograr la conformidad de los equipos a las normas de aplicación. El primer rango de interés es alrededor de la frecuencia de la red de potencia, 50 o 60 Hz. La mayoría de las cargas conectadas a la red son no lineales, es decir, el dibujo de corriente no sigue una forma sinusoidal como la de la tensión de la red. Aparecen entonces los armónicos de la frecuencia de la red, los que por lo general son considerados hasta el orden 40 o 50. En otras palabras, el primer intervalo de frecuencias recae entre 50 Hz (60 Hz) a 2 o 2,5 kHz (2,4 o 3 kHz).

Desde el final del rango de las armónicas hasta 9 kHz, se encuentra un espectro que no se encuentra regulado para los equipos alcanzados por este documento. Este intervalo de frecuencia no regulado no significa que se encuentre libre de interferencia, aunque no conducirá a una no conformidad con la normativa, seguramente conducirá a problemas funcionales.

Más allá de 9 kHz, inicia el denominado rango de radio frecuencia (RF), que es el término colectivo para todas las frecuencias desde algunos kiloHertz (kHz) hasta varios gigaHertz (GHz) que se separa así del espectro inferior de bajas frecuencias (LF). El límite superior es de 400 GHz, aunque los métodos de ensayos para tan altas frecuencias aún no han sido definidos.

Rangos de frecuencia para emisión

Para las mediciones de emisión provenientes de equipos, el rango de RF se separa en conducido y radiado. Para baja frecuencia dentro del intervalo RF, se espera que las perturbaciones transiten a lo largo de las líneas de conexión, en vez de hacerlo en forma radiada. Dado que una frecuencia límite no se puede definir de manera exacta, por lo general las normas establecen que el rango de emisiones conducidas se encuentra entre 150 kHz y 30 MHz, aunque en algunos casos puede evaluarse desde 9 kHz. Por otro lado, el rango de emisión radiada comienza en 30 MHz y el límite superior es variable dependiendo de la familia de producto, pero comúnmente se sitúa entre 1 GHz a 3 GHz.

A continuación se presenta una tabla que muestra los intervalos de frecuencias principales para equipos a utilizar en ambientes residenciales-comerciales, industriales y hospitalarios.

| | Armónicos /fluctuaciones | Baja frecuencia (LF) | Conducido en RF | Conducido en RF | Radiado en RF | Radiado en RF | Radiado en RF |
|---|--|--|-----------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Intervalo de frecuencias | 50 Hz - 2 / 2,5 kHz 60 Hz - 2,4 / 3 kHz | 2 / 2,5 kHz - 9 kHz 2,4 / 3 kHz - 9 kHz | 9 kHz – 150 kHz | 150 kHz – 30 MHz | 30 MHz – 300 MHz | 30 MHz – 1/2/3 GHz | Sobre 3 GHz |
| Regulado para establecer conformidad | SI | NO | SI | SI | SI | SI | SI |
| Familia de Producto alcanzada | EMS | --- | --- | EMS | --- | EMS | --- |
| | EDO | --- | --- | EDO | EDO | EDO | --- |
| | IND | --- | --- | IND | --- | IND | --- |
| | ITE | --- | --- | ITE | --- | ITE | ITE |
| | ILU | --- | ILU | ILU | ILU | ILU | --- |
| | LAB | --- | --- | LAB | --- | LAB | --- |
| | TVR | --- | --- | TVR | TVR | TVR | --- |
| Abreviaturas y normas de producto de referencia: EMS: Equipos electromédicos destinados a ambientes residenciales (clínicas) y hospitalarios (CISPR 11). EDO: Electrodomésticos (CISPR 14-1). IND: Equipos destinados a instalar en ambientes industriales, es decir, separados de la red pública de distribución eléctrica (CISPR 11). ITE: Equipos de Tecnología de Información: computadores, faxes, impresoras (CISPR 22). ILU: Equipos electrónicos destinados a iluminación: balastos, lámparas de bajo consumo (CISPR 15). LAB: Equipamiento de laboratorio: analizadores, instrumentos de medición (CISPR 11). TVR: Receptores de TV y radio (CISPR 13). | | | | | | | |
| Nota 1: pueden existir variantes según el tipo de equipo particular a ensayar dentro de las familias de productos mencionadas y según las nuevas versiones de las normas que los alcanzan. Nota 2: para ciertas familias de productos, dentro del intervalo de emisiones conducidas en RF pueden también requerirse mediciones de emisiones radiadas, ej. de nivel de campo magnético. Nota 3: para algunas familias de productos, el rango de medición entre 30 y 300 MHz se lo denomina "Potencia de Perturbación". | | | | | | | |

Tabla 2. Frecuencias asociadas a mediciones de emisión.

Rangos de frecuencia para inmunidad

El segundo aspecto clave de EMC, la inmunidad de los dispositivos, equipos o sistemas a las perturbaciones, también involucra una serie de ensayos a los que se someten para evaluar la conformidad con las normas de producto que los alcanzan. Los ensayos son comúnmente regidos por las llamadas normas de base, que identifican cada fenómeno electromagnético particular. La tabla 3 resume los principales ensayos normados aplicables a equipos que se emplean en ambientes residenciales-comerciales, industriales y hospitalarios: frecuencias asociadas a las perturbaciones aplicadas y tipo de fenómeno (conducido o radiado).

CONCLUSIONES

Mediante este trabajo se presentaron los términos de rigor utilizados en el campo de la compatibilidad electromagnética. Se describió además el problema básico de interferencia electromagnética y los dos aspectos claves de CEM: emisión e inmunidad (susceptibilidad). Finalmente, mediante la detección de los principales fenómenos que originan perturbaciones

electromagnéticas, se individualizaron los intervalos de frecuencia para emisión e inmunidad. Tales intervalos caracterizan a los ensayos y mediciones que la normativa internacional vigente aplica a equipos, dispositivos y sistemas eléctricos/electrónicos destinados a utilización en ambientes residenciales-comerciales, industriales y hospitalarios.

| Norma de base de inmunidad | Descripción | Conducido | Radiado | Intervalo de frecuencias | Familia de Producto alcanzada | Observaciones |
|--|--|-----------|---------|---|---|--|
| IEC 61000-4-2 | Descargas electrostáticas | SI | SI | Componentes espectrales del impulso DES > 1 GHz | Todas (Nota 1) | Aplicable a equipos instalados donde pueden ocurrir DES |
| IEC 61000-4-3 | Campo EM radiados de RF | NO | SI | 80 MHz – 6 GHz | Todas (Nota 1) | Aplicable a equipos en presencia de campos EM |
| IEC 61000-4-4 | Transitorios unidireccionales rápidos en ráfagas | SI | NO | Componentes espectrales del impulso > 100 MHz | Todas (Nota 1) | Aplicable a equipos conectados a la red eléctrica o con cables cercanos a la red |
| IEC 61000-4-5 | Sobretensiones | SI | NO | Componentes espectrales del impulso > 1 MHz | Todas excepto TVR (Nota 1) | Aplicable a equipos conectados a la red eléctrica |
| IEC 61000-4-6 | Perturbaciones inducidas por campos de RF | SI | NO | 150 kHz – 80 MHz | Todas excepto TVR (Nota 1 y 2) | Aplicable a equipos en presencia de campos EM conectados a la red eléctrica |
| IEC 61000-4-8 | Campos Magnéticos a frecuencia de red | NO | SI | 50 o 60 Hz | Todas excepto EDO y TVR (Nota 1) | Aplicable a equipos susceptibles a campos magnéticos |
| IEC 61000-4-11 | Interrupciones breves, huecos y variaciones de tensión en la red eléctrica | SI | NO | --- | Todas excepto TVR (Nota 1) | Aplicable a equipos conectados a la red eléctrica (I menor a 16A) |
| IEC 61000-4-13 | Armónicos, interarmónicos y señalización en red eléctrica | SI | NO | 50 Hz - 2 kHz 60 Hz - 2,4 kHz | Solo EDO en situación anormal de funcionamiento | Aplicable a equipos conectados a la red eléctrica |
| Abreviaturas y normas de producto de referencia: EMS: Equipos electromédicos destinados a ambientes residenciales (clínicas) y hospitalarios (IEC 60601-1-2). EDO: Electrodomésticos (CISPR 14-2 e IEC 60335-1) IND: Equipos para ambientes industriales, separados de la red pública de distribución eléctrica (IEC 61000-6-2). ITE: Equipos de Tecnología de Información: computadores, faxes, impresoras (CISPR 24). ILU: Equipos electrónicos destinados a iluminación: balastos, lámparas de bajo consumo (IEC 61547). LAB: Equipamiento de laboratorio: analizadores, instrumentos de medición (IEC 61326-1). TVR: Receptores de TV y radio (CISPR 20). | | | | | | |
| Nota 1: "Todas" hace referencia a EMS, EDO, IND, ITE, ILU, LAB, TVR. Pueden existir variantes según el tipo de equipo particular a ensayar dentro de las familias de productos mencionadas y según las nuevas versiones de las normas que los alcanzan. Nota 2: Para EMS la frecuencia inicial puede ser distinta a 150 kHz. Para EDO la frecuencia final es de 230 MHz. | | | | | | |

Tabla 3. Frecuencias de referencia para ensayos de inmunidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC 1000-1-1: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1: General - Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms. 1992.
- [2] IEC 1000-2-5: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 1: General considerations. 1995.
- [3] IEC 61000-4-1: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-1: Testing and measurement techniques - Overview of IEC 61000-4 series. 2000.
- [4] "Introduction to electromagnetic compatibility" Clayton Paul. 2da edición Wiley Interscience. 2006.
- [5] Electromagnetic Compatibility and the IEC. <http://www.iec.ch/emc/>
- [6] CISPR Dashboard. http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1298,25