

Boletín 109

EMI Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales

Boletín técnico N° 109
PARTE 1
Ing. Gregor Rojas

EMI Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales

PARTE 1

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADEO Y VENTAS
División materiales eléctricos

1. Generalidades.

Al diseñar un sistema, primero se debe considerar el entorno electromagnético en el que va a funcionar. Usualmente, los sistemas funcionan bien el laboratorio, pero pueden fallar cuando se usan en su entorno electromagnético si no se diseñan correctamente.

Al iniciar el diseño de un nuevo producto electrónico, una de las primeras decisiones que se toman es seleccionar el material y la configuración del recinto o caja que va a envolver los circuitos impresos, los cables, los conectores y todo el resto de los componentes que conforman cualquier producto electrónico.

Esta decisión es determinante para las posteriores decisiones de cómo se deberá diseñar la parte electrónica interna del nuevo producto. Para decidir correctamente el material de la caja, debemos pensar si la queremos diseñar como un blindaje, o no.

Si decidimos que el recinto no debe comportarse como un blindaje, podemos seleccionar una caja de plástico sin ningún tipo de metalización. Si es así, deberemos ser consecuentes en el diseño del producto.

Por lo anterior, el diseño se realizará como si sus tarjetas de circuitos impresos y cables estuvieran electromagnéticamente expuestos al aire, sin

ningún nivel de apantallado. Si decidimos usar una caja metálica, deberemos diseñarla correctamente para que se comporte como un blindaje.

Si no la diseñamos correctamente, aunque la caja sea metálica, será simplemente un recinto configurado con piezas metálicas unidas mecánicamente pero no unidas eléctricamente y no será un blindaje adecuado.

Más adelante veremos cómo se debe diseñar un recinto o caja para que se comporte como un blindaje.

2. Que son las EMC?

Antes de abordar este interesante y controversial tema, debemos tener claro algunos conceptos básicos importantes para la mejor comprensión de los efectos de emisión electromagnética:

- ❑ Todas las señales CA a nivel de voltaje o corriente son energía electromagnética propagándose como onda.
- ❑ Las ondas electromagnéticas consisten en campo eléctrico y campo magnético.
- ❑ Cuando un conductor se expone a una onda electromagnética, sus electrones libres se mueven en su alrededor como respuesta a esta onda, generando lo que llamamos corriente. Esto constituye el principio de reciprocidad.
- ❑ La propagación de ondas electromagnéticas y los campos asociados a ellas se moldean por las “antenas accidentales” formadas por los caminos de ida y vuelta de la corriente y de los materiales dieléctricos en su alrededor. El intento es proyectar caminos que minimicen las “antenas accidentales”, reduciendo las emisiones y aumentando la inmunidad.

- ❑ Existen acoplamientos capacitivos, inductivos y por impedancia común.
- ❑ Los electrones son naturalmente forzados a fluir cerca de la superficie del conductor, denominado efecto piel o skin.
- ❑ Todo presenta una impedancia a las ondas electromagnéticas.
- ❑ Una onda electromagnética es la combinación de un campo eléctrico y un campo magnético que se propagan en la misma dirección, pero en planos ortogonales. Como nosotros sabemos, la variación en el campo magnético induce un campo eléctrico y viceversa. Por lo tanto, el campo magnético de una onda electromagnética es generada por el campo magnético, que, a su vez, es generado por el campo eléctrico, ambos nutriéndose en un arreglo perfecto, en la figura 1 podemos apreciar lo antes expuesto para mayor comprensión.
- ❑ Los campos son perpendiculares entre ellos y también a la dirección de propagación de la onda que se desplaza con velocidad v . Eso posibilita clasificar la onda magnética como onda transversal. En la figura 1 podemos apreciar la disposición de los campos eléctricos y magnéticos de una onda electromagnética y la dirección de su propagación.

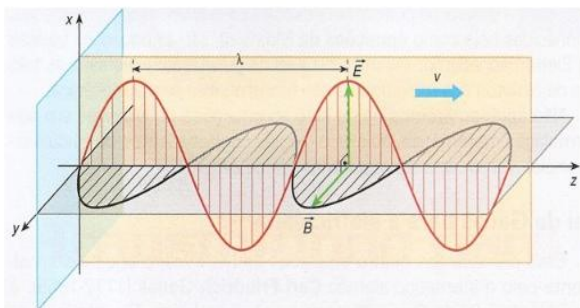


Figura 1. Representación de una onda electromagnética

3. ¿Qué son las interferencias?

No encontramos con dos formas de interferencia, la interna y la externa, siendo continuada o intermitente. Cada una de ellas tiene su propio origen y las causas sujetas a interferencia continuada son:

- ❑ 50/60Hz Alimentación
- ❑ Motor Eléctrico
- ❑ Señales de radio de alta energía
- ❑ Fuentes conmutadas
- ❑ Microondas

Las causas de ruidos constantes son menos difíciles de encontrarse de que los problemas con ruidos intermitentes.

La fuente más común de ruido es constante y es causada por una fuente de alimentación 50/60 Hz. La alimentación es el componente más común por ser una tensión oscilante, de alta potencia y un sistema de antena enorme.

Casi todos los sistemas tienen filtros para 50/60 Hz que evitan o atenúan ruidos de esta naturaleza.

Motores eléctricos muchas veces crean ruido de banda ancha que pueden irradiarse hacia cualquier equipo en su vecindad. Motores DC frecuentemente tienen fuentes conmutadas que también generan ruido de alta frecuencia a través de la puesta a tierra común.

Este ruido de banda ancha puede transmitirse de vuelta a través de las líneas de suministro de energía o a través de una puesta a tierra común.

Radio local, estaciones de televisión, radares y estaciones de radio amateur pueden causar ruidos de frecuencia de radio.

Estas estaciones generan kW de energía y muchas veces se ubican cerca de áreas industriales.

La alimentación conmutada es la fuente más común de ruido. Es popular y hace parte de los equipos electrónicos, produciendo grandes cantidades de frecuencias armónicas.

Los ruidos intermitentes son de causas difíciles de ubicar.

Un ejemplo es una descarga atmosférica o rayo que, por lo general, contiene entre 20 hasta 40 kA y millones de Voltios. Además, el rayo transmite ruido de banda ancha que abarca todo el espectro de frecuencia.

Esto en conjunto con la corriente de alta tensión, hace prácticamente imposible filtrar este ruido. El mejor método es proteger los dispositivos con shunts y supresores.

Otro ejemplo muy común en ambientes industriales es la conmutación de relés, por lo general, producen el denominado ruido de relé de conmutación. Este ruido es creado por el campo magnético cuando el relé conmuta.

El ruido generado por máquinas de soldadura es parecido al de los ruidos generados por una descarga atmosférica, de alta frecuencia y de banda ancha, con la diferencia que se puede identificar con facilidad.

También tenemos el ruido estático el cual es generado por la estática. Este es muy difícil de identificar como fuente de ruido, pues es invisible y muy intermitente.

Mientras muchas veces sea generado por el hombre, también puede ser de origen natural.

El ruido estático también es similar a las descargas atmosféricas con todos sus atributos, pero en menor escala.

4. Perturbaciones electromagnéticas

Cualquier fenómeno electromagnético puede degradar el desempeño de un sistema. A continuación, vamos a estudiar algunos aspectos relacionados a estas perturbaciones:

4.1 Voltaje de alimentación.

Esta sufre una variedad de efectos perturbadores durante su distribución. Estas perturbaciones pueden provenir de fuentes de la red de alimentación o por sus usuarios, o, entonces, por cargas en el interior de una instalación. Son características las siguientes perturbaciones:

- Interrupciones
- Caídas de energía
- Surges y Transientes
- Distorsiones en forma de onda
- Variaciones de amplitud y frecuencia
- Flotaciones de tensión
- CC en redes CA
- Línea eléctrica cargando señales

5. ¿Qué es un blindaje?

Un blindaje es una pared metálica dispuesta entre dos regiones del espacio, que atenúa la propagación de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos: sirve tanto para no dejar salir ni entrar el flujo de los campos de la zona que encierra, es decir, reducir las emisiones radiadas.

Como podemos apreciar en la figura 2 se muestra un equipo con emisiones radiadas que salen por una apertura en el blindaje y pueden provocar interferencias electromagnéticas (EMI) en equipos cercanos.

No es un buen blindaje. Muestra el mismo equipo con las emisiones radiadas atenuadas gracias a un buen blindaje sin ranuras.

Un blindaje también sirve para evitar que los campos externos penetren dentro de la zona que

encierra, es decir, para evitar tener problemas de inmunidad radiada.

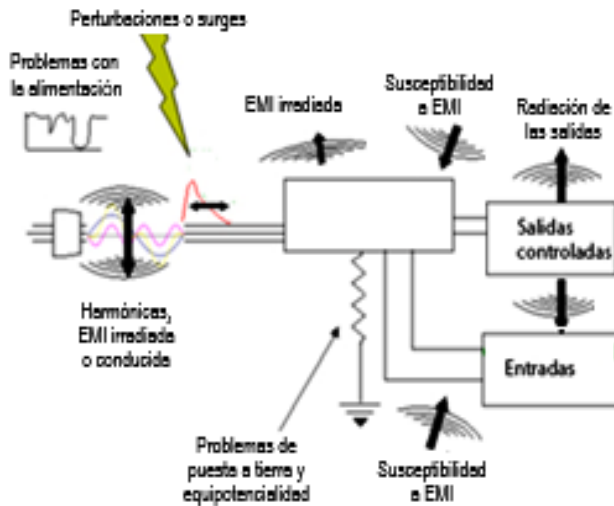


Figura 2. Equipo con emisiones EMI

Un equipo bien protegido contra campos exteriores gracias a la buena atenuación del blindaje. En cambio, El equipo puede tener problemas de inmunidad debido a la entrada de campos exteriores a través de la ranura.

6. Características de los campos

Las características de un campo están determinadas por su fuente o generador, por el medio de propagación y por la distancia entre su fuente y el punto donde está situado el receptor (equipo o punto de observación).

En un punto cercano a la fuente del campo, sus propiedades están determinadas principalmente por las características de la fuente.

Lejos de la fuente, las propiedades están determinadas principalmente por el medio de propagación. Así, el espacio se puede dividir en dos regiones en función de la distancia entre el origen del campo y el punto de observación.

Cerca de la fuente se sitúa el llamado campo cercano. A una distancia mayor de la longitud de onda (λ) de la frecuencia del campo dividida por 2π se sitúa el llamado campo lejano.

Esta zona pertenece a las llamadas ondas planas (campo electromagnético). A un campo electromagnético también se le llama onda plana porque sus frentes de onda (superficie con fase constante) son planos paralelos infinitos. La zona de transición entre los dos tipos de campo se sitúa en la región cercana a $\lambda/2\pi$.

El cociente entre la intensidad de campo eléctrico E y la intensidad de campo magnético H tiene unidades de impedancia y se llama impedancia de onda.

En el campo lejano, E/H es igual a la impedancia característica del medio ($E/H=Z_0=377 \Omega$) en el aire o en el vacío.

En el campo cercano, esta impedancia está determinada por las características de la fuente y la distancia de la fuente al punto desde donde se observan los efectos del campo.

Si la fuente tiene una fuente f_r intensidad y baja tensión eléctrica ($E/H < 377 \Omega$), el campo cercano es predominantemente magnético.

Contrariamente, si la fuente tiene relativa alta tensión y baja intensidad eléctricas ($E/H > 377 \Omega$), el campo cercano será principalmente eléctrico.

La fuente típica de un campo eléctrico es un monopolo y la fuente típica de un campo magnético es un bucle de corriente.

En la zona de campo cercano, si el campo eléctrico es más intenso que el campo magnético, el primero se atenúa, conforme nos alejamos de la fuente proporcionalmente a $(1/d^3)$ (d =distancia entre la fuente y el receptor), mientras que el campo magnético se atenúa proporcionalmente a $(1/d^2)$.

En la figura 3 se observa como serian estos acoplamientos.

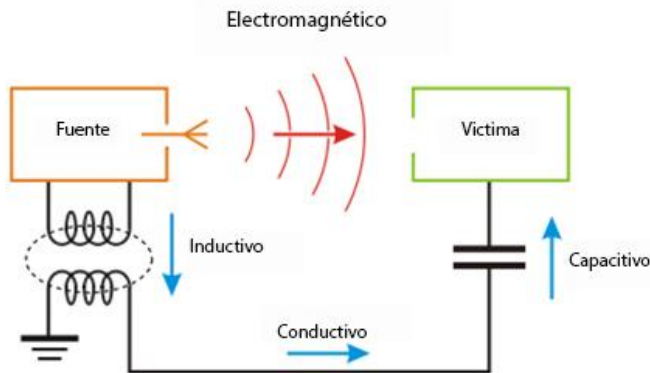


Figura 3. Tipos de acoplamiento generando ruido en instalaciones industriales

Contrariamente, en esta misma zona, si la intensidad del campo magnético H es mayor que la del campo eléctrico E, el campo magnético se atenúa proporcionalmente a $(1/d^3)$, mientras que el eléctrico lo hace proporcionalmente a $(1/d^2)$.

En el campo lejano, ambos campos se atenúan proporcionalmente a $(1/d)$. En la tabla 1 podemos observar las distancias en función de la frecuencia en la que se sitúa el campo lejano (zona verde), el campo cercano (zona calabaza) y las zonas de transición (zonas amarillas).

Tabla 1 nos representa las longitudes de onda, frecuencia y energía para las regiones seleccionadas del espectro electromagnético.

La tabla de frecuencias coincide con el margen de frecuencias que usualmente requiere la normativa de emisiones radiadas.

Según las normas, las emisiones usualmente se miden a 3 metros de distancia, donde se ve que el campo es lejano. Si esta distancia de medida se redujera, entraríamos en la zona de transición hacia el campo cercano a frecuencias por debajo de los

60 MHz a 1 metro de distancia y por debajo de los 500 MHz a 30 cm de distancia.

En las zonas de transición y de campo cercano, los campos eléctrico y magnético se deben medir por separado para analizar sus efectos también separadamente.

Región	Largo onda (Angstroms)	Largo onda (Centímetros)	Frecuencia (Hz)	Energía (eV)
Radio	$>10^9$	>10	$<3 \times 10^9$	$<10^{-5}$
Microondas	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infrarojo	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$10^{-5} - 0.01$
Visible	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	2-3
Ultravioleta	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Rayos X	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Rayos gama	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

En la zona de campo lejano, la intensidad de campo medida no se puede saber si es a consecuencia de un campo eléctrico o de un campo magnético en la fuente del campo.

6. Efectividad de los blindajes

La efectividad de un blindaje puede especificarse en términos de atenuación de la intensidad de campo en dB. Así, la efectividad S está definida para:

- ❑ Campo eléctrico como: $S = 20 \log(E_o/E_i)$ (dB) con E_o , campo saliente y E_i , campo incidente
- ❑ Campo magnético como: $S = 20 \log(H_o/H_i)$ (dB) con H_o , campo saliente y H_i , campo incidente El campo incidente es el campo que llega al blindaje y el campo saliente es el campo que traspasa el blindaje.

La efectividad de un blindaje varía con la frecuencia, la geometría del campo, la posición desde donde el campo es medido, con el tipo de

campo que está siendo atenuado y con la dirección de incidencia y de la polarización del campo.

Los resultados de la medida o el cálculo de la efectividad sirven para comparar varios materiales en función de su atenuación.

Al incidir una onda electromagnética en una superficie metálica, la onda es parcialmente reflejada por la superficie (como si fuera un espejo), y la parte transmitida (no reflejada) es atenuada al pasar a través del blindaje por absorción. Las pérdidas por reflexión dependen de la impedancia de onda y no son iguales en los campos cercano y lejano.

En cambio, las pérdidas por absorción son las mismas tanto en campo lejano como en campo cercano.

La efectividad total de un blindaje es igual a la suma de las pérdidas por reflexión (R) más las pérdidas por absorción (A), más un factor (B) que contabiliza las múltiples reflexiones en los blindajes.

Así, se puede escribir: $S = A + R + B$ (dB)

El factor B es despreciable si las pérdidas por absorción $A > 10$ dB.

Desde un punto de vista práctico B se puede despreciar en el caso de campos eléctricos y electromagnéticos y sólo se debe considerar en los campos magnéticos.

8. Pérdidas por reflexión

Las pérdidas por reflexión en la frontera entre dos medios (aire y blindaje) están relacionadas con las impedancias características de cada uno de los dos medios.

Cuando una onda atraviesa un blindaje encuentra dos cambios de medio, y si el blindaje es delgado en comparación con la profundidad de penetración,

al tener pocas pérdidas de absorción se producirán múltiples reflexiones.

Si el área que rodea el blindaje es aire ($Z_1 \gg Z_2$), la mayor reflexión ocurre cuando la onda incidente penetra la pared exterior del blindaje, en el caso de campos eléctricos y cuando la onda deja la cara interna del blindaje, en el caso de campos magnéticos; por ello, para los campos eléctricos, los blindajes delgados también son efectivos.

No obstante, si se trata de campos magnéticos, al producirse la reflexión principal en la segunda superficie, se tienen múltiples reflexiones y, por lo tanto, la efectividad del blindaje queda reducida.

Las pérdidas por reflexión crecen al disminuir la frecuencia y aumentar la conductividad del material.

En el caso de campos electromagnéticos (campo lejano), antes de penetrar en el blindaje, la impedancia es igual a la impedancia característica del vacío Z_0 (377 óhmios) y cuanto menor es la impedancia del material del blindaje, mayores son las pérdidas por reflexión.

En el campo cercano, la impedancia E/H depende de la fuente del campo (antena transmisora) y no del medio de propagación, al contrario de lo que ocurre en el campo lejano.

Un campo eléctrico con alta impedancia tiene una mayor reflexión que una onda plana, y un campo magnético de baja impedancia tiene menor reflexión que una onda plana, debido a que las pérdidas por reflexión son una función del cociente entre la impedancia de onda y la impedancia del blindaje.

Las pérdidas por reflexión constituyen el principal mecanismo de apantallamiento en el caso de campos eléctricos.

Los estudios han demostrado que el mejor blindaje contra campos eléctricos es la jaula de Faraday.

Una jaula de Faraday es una envolvente metálica completamente cerrada que protege de los campos circundantes.

La jaula de Faraday debe su nombre al físico Michael Faraday que construyó una en 1836. La jaula de Faraday se emplea para proteger los equipos de los campos externos, ya que en su interior el campo eléctrico es nulo.

9. Pérdidas por absorción

Cuando una onda electromagnética pasa a través de un blindaje, su amplitud decrece exponencialmente debido a las corrientes inducidas en el mismo.

Estas corrientes provocan pérdidas por efecto Joule y por ello disipan calor en el material del blindaje. La distancia requerida para que la onda sea atenuada $1/e$ veces (37,7% de su valor inicial) está definida como la profundidad de penetración debida al efecto pelicular.

Las pérdidas por absorción para la profundidad de penetración por el efecto pelicular son de unos 9 dB. Doblando el espesor del blindaje se doblan las pérdidas de absorción. Este efecto constituye el principal mecanismo de apantallamiento o blindaje en el caso de campos magnéticos de baja frecuencia.

10. Comparación de materiales

Si en un blindaje se usa un material magnético en lugar de un material buen conductor, se tendrá un incremento de permeabilidad y un decremento de la conductividad. Esto implicará un aumento de las pérdidas de absorción y una disminución de las pérdidas de reflexión.

Si en la fuente se tiene un campo magnético de baja frecuencia, este hecho significa una ventaja, debido a que los campos magnéticos no tienen casi pérdidas por reflexión. En cambio, en el caso de un campo lejano o un campo eléctrico, se tendrá un

decremento de la efectividad del blindaje al ser más importante la atenuación por reflexión

Los materiales magnéticos, al aumentar la frecuencia, disminuyen su permeabilidad y ésta también depende de la intensidad de campo. Al mecanizar el material cambia sus propiedades magnéticas.

Los materiales de alta permeabilidad son adecuados para frecuencias menores a 10 kHz.

Es necesario no llegar a la saturación magnética del material y, para ello, se deben consultar las curvas de imanación (curva de histéresis), $B=f(H)$, de cada material, para asegurar que la intensidad de campo H no sea tan alta que sature el material.

B es el flujo de inducción magnética y H es la intensidad de campo magnético. La máxima permeabilidad y por ello, la efectividad máxima del blindaje se tendrá a un nivel medio de la intensidad de campo.

Tanto a baja, como a alta intensidad de campo, la permeabilidad es baja y, en consecuencia, la efectividad del blindaje también es baja.

Para evitar la saturación se pueden utilizar materiales distintos superpuestos, combinando adecuadamente sus permeabilidades, es decir, disponiendo el material de baja permeabilidad de cara a la fuente y el de alta permeabilidad en el interior del blindaje, donde habrá menor intensidad de campo H .

En el caso de campos magnéticos de 1 kHz es mejor el acero que el cobre, y éste mejor que el aluminio, pero a 100 kHz, aunque el acero sigue siendo mejor, la diferencia es muy pequeña. Entre 100 kHz y 1 MHz es claramente mejor el cobre que el acero.

A 1 kHz el mumetal es más efectivo que el acero, pero a 10 kHz el acero es más efectivo que el mumetal.

A 100 kHz tanto el acero, como el cobre y el aluminio son mejores que el mumetal.

11. ¿qué es el mumetal?

Es un material especializado para blindaje magnético de alta sensibilidad, especialmente efectivo en bajas frecuencias.

11.1 ¿De qué está hecho el mumetal?

Típicamente contiene:

- Entre 75 a 80 % níquel,
- 15 % hierro
- Además, pequeñas cantidades de cobre y molibdeno

Su composición exacta puede variar según el fabricante.

11.2 ¿Qué lo hace especial?

Su característica más importante es:

Altísima permeabilidad magnética

Esto significa que el flujo magnético “prefiere” pasar por el mu-metal en vez de atravesar el aire u otros materiales. En términos simples: es excelente “guiando” o absorbiendo campos magnéticos.

11.3 ¿Para qué se usa?

Se utiliza cuando se necesita bloquear o desviar campos magnéticos débiles, por ejemplo:

- Equipos médicos (resonancia magnética)
- Instrumentación de precisión
- Sensores muy sensibles
- Transformadores de baja frecuencia
- Cámaras de medición

11.4 ¿Tiene desventajas?

Sí:

- Es costoso.
- Pierde propiedades si se golpea o mecaniza (requiere recocido térmico especial).
- No es ideal para frecuencias altas.
- Se satura magnéticamente con campos fuertes.

En todo el espectro de frecuencias propiamente dicho, el cobre es mejor que el aluminio. Estas comparaciones están hechas teniendo en cuenta que en todos los casos se trata de un campo cercano y el espesor del blindaje varía entre 0,08 y 1,5 mm, de modo que en esta gama de espesores las características antes dichas son válidas.

En resumen, un material magnético con una permeabilidad alta tiene una mayor efectividad de apantallado magnético a bajas frecuencias en comparación con los buenos conductores como el cobre.

A altas frecuencias, los buenos conductores tienen mayor efectividad de apantallado magnético, incrementando su efectividad cuando aumenta la frecuencia.

En la actualidad el material metálico más utilizado en la fabricación de cerramientos, envolventes o cajas de los equipos electrónicos es el aluminio.

En la figura 4 se presentan las curvas de efectividad para materiales más empleados.

12. Ranuras y discontinuidades en blindajes electromagnéticos

Toda estimación teórica de la efectividad de un blindaje electromagnético bien sea obtenida mediante formulaciones analíticas, modelos numéricos o gráficas de desempeño, pierde validez práctica cuando la envolvente presenta ranuras, aperturas o discontinuidades en su estructura.

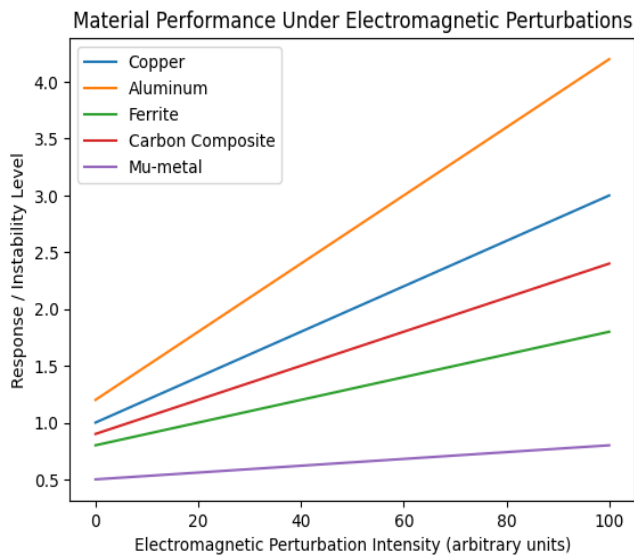


Figura 4. Curvas de desempeño de materiales ante EMC

En condiciones ideales, los cálculos de atenuación asumen superficies conductoras continuas y perfectamente unidas, no obstante, en aplicaciones reales, las uniones mecánicas, juntas, perforaciones de ventilación, accesos para mantenimiento y tolerancias de fabricación introducen trayectorias no previstas para el acoplamiento electromagnético.

La presencia de ranuras y juntas entre partes metálicas genera degradación progresiva de la efectividad del blindaje, particularmente a medida que aumenta la frecuencia.

Lo anterior se debe a que dichas aperturas pueden comportarse como antenas de ranura o guías de onda no deseadas, facilitando el acoplamiento tanto por radiación como por fuga de campo eléctrico y magnético.

Cuando las dimensiones de la ranura se aproximan a una fracción significativa de la longitud de onda incidente, la transmisión de energía electromagnética a través de la abertura se incrementa considerablemente, reduciendo la atenuación global de todo el sistema.

Adicionalmente, las discontinuidades eléctricas en las juntas pueden generar impedancias de contacto elevadas, favoreciendo corrientes superficiales irregulares y puntos de concentración de campo, lo que incrementa la susceptibilidad del equipo frente a perturbaciones externas y eleva los niveles de emisión radiada. En entornos industriales con altas frecuencias de conmutación, transitorios rápidos o presencia de radiofrecuencia, este efecto se vuelve especialmente crítico.

Por lo tanto, en el diseño de sistemas con requisitos estrictos de Compatibilidad Electromagnética (EMC), resulta indispensable minimizar la longitud efectiva de las ranuras, asegurar continuidad eléctrica mediante juntas conductoras, empaques EMC o tratamientos superficiales adecuados, y considerar el impacto de las aperturas desde las etapas iniciales del diseño mecánico y eléctrico.

13. Aplicaciones y ejemplos en el sector energético e industrial

13.1. Tableros eléctricos de potencia y control

En gabinetes de distribución o centros de control de motores (MCC), las puertas frontales y tapas laterales suelen constituir el principal punto débil del blindaje.

Si no existe continuidad eléctrica adecuada en las bisagras y cierres, las corrientes superficiales inducidas por perturbaciones externas pueden interrumpirse, generando emisión radiada o susceptibilidad a interferencias. Esto es particularmente crítico en entornos con variadores de frecuencia (VFD) y sistemas de conmutación rápida.

13.2. Subestaciones eléctricas y salas de control

En instalaciones de media y alta tensión, las corrientes transitorias asociadas a maniobras o descargas atmosféricas generan campos electromagnéticos intensos.

Las ranuras en paneles metálicos, ductos mal acoplados o penetraciones de cables sin prensaestopas EMC pueden permitir la propagación de impulsos electromagnéticos hacia sistemas de protección y control, afectando relés digitales y sistemas SCADA.

13.3. Plantas termoeléctricas e instalaciones industriales

En centrales de generación y procesos industriales con grandes motores, excitadores o sistemas de arranque suave, la presencia de aberturas de ventilación sin diseño electromagnético adecuado puede reducir significativamente el nivel de blindaje esperado.

Las rejillas metálicas deben diseñarse considerando el tamaño de celda respecto a la longitud de onda para evitar que actúen como radiadores secundarios.

13.4. Sistemas de telecomunicaciones y control industrial

En racks de instrumentación, las juntas entre paneles modulares pueden convertirse en fuentes de emisión no deseada si no se emplean empaques conductivos o tratamientos anticorrosivos que garanticen baja impedancia de contacto.

A frecuencias elevadas, una simple pintura aislante entre superficies metálicas puede comprometer seriamente la continuidad eléctrica.

14. Recomendaciones de diseño EMC

Para mantener la efectividad del blindaje en aplicaciones críticas, se recomienda:

- Minimizar la longitud y el ancho de ranuras.
- Garantizar continuidad eléctrica en puertas y paneles mediante trenzas de puesta a tierra o empaques conductivos.
- Utilizar prensaestopas y conectores con certificación EMC.

- Evitar superficies pintadas en zonas de contacto eléctrico o emplear tratamientos conductivos.
- Considerar el análisis EMC desde la fase de diseño mecánico, no como corrección posterior.
- Realizar ensayos de emisión e inmunidad conforme a normativas internacionales aplicables.

En los próximos boletines continuaremos con este interesante tema y además controversial.