

Boletín 111

EMI Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales

Boletín técnico N°111
PARTE 3
Ing. Gregor Rojas

EMI Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales

PARTE 3

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADERO 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. Para ello, 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. Veamos cómo se debe diseñar un recinto o caja para que se comporte como un blindaje.

2. Modos de acoplamiento en interferencias electromagnéticas (EMI)

Para comprender adecuadamente los fenómenos de interferencia electromagnética, es imprescindible analizar los distintos modos de acoplamiento mediante los cuales la energía no deseada se transfiere entre sistemas.

Los principales mecanismos de acoplamiento en EMC son:

- Modo diferencial (Differential Mode, DM)
- Modo común (Common Mode, CM)
- Acoplamiento radiado (vía antena)

Estos modos son aplicables tanto a:

- Emisiones electromagnéticas (fuente → entorno)
- Susceptibilidad o inmunidad (entorno → víctima)

2.1 Acoplamiento en modo diferencial (DM)

El modo diferencial corresponde al funcionamiento normal de la mayoría de los circuitos eléctricos y electrónicos, donde:

- La señal útil se transmite como una diferencia de potencial entre dos conductores
- Las corrientes circulan en sentidos opuestos en cada conductor

En la imagen 1 se puede apreciar un acoplamiento en modo diferencial.

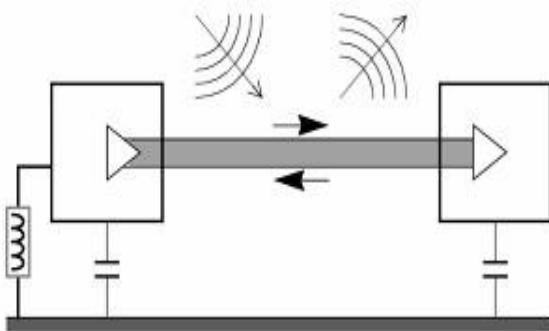


Figura 1 Acoplamientos modo diferencial

Cuando un sistema está expuesto a un campo electromagnético externo:

- Se puede inducir una tensión diferencial entre los dos conductores
- Esta interferencia se superpone directamente a la señal útil

De forma recíproca:

- Una corriente diferencial genera su propio campo electromagnético radiado

Características clave

El acoplamiento depende principalmente de:

- La asimetría del sistema
- La diferencia de impedancias entre conductores

El plano de tierra no participa directamente en este modo, es típico en:

- Líneas de transmisión
- Señales balanceadas (ej. RS-485, Ethernet)

2.2 Acoplamiento en modo común (CM)

El modo común se caracteriza por:

- Corrientes que circulan en la misma dirección por múltiples conductores
- Referencia a un potencial común, generalmente tierra o chasis

En la imagen 2 se puede apreciar un acoplamiento en modo común.

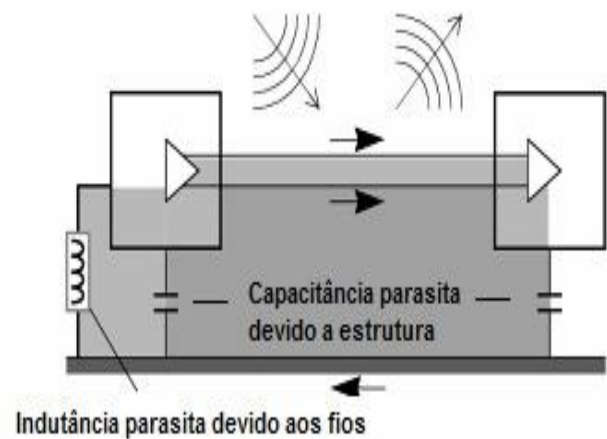


Figura 2 Acoplamientos modo común

Las corrientes en modo común se originan típicamente por:

- Campos electromagnéticos externos
- Diferencias de potencial entre tierras
- Capacitancias parásitas entre:
 - Conductores
 - Gabinete (chasis)
 - Entorno

Estas corrientes no forman parte de la señal útil, pero:

- Se propagan a través del sistema

- Pueden radiar eficientemente como antenas

2.2.1 Elementos clave del circuito de acoplamiento CM

El acoplamiento en modo común está fuertemente influenciado por:

- Capacitancias parásitas distribuidas
- Inductancias del cableado
- Impedancias del chasis y conexiones a tierra

Estos elementos son:

- Distribuidos (no concentrados)
- Difíciles de modelar con precisión
- Dependientes de la geometría física

2.2.2 Características principales

Alta eficiencia de radiación (principal fuente de EMI radiada)

- Difícil control debido a:
- Dependencia geométrica
- Variabilidad del entorno

Puede existir incluso en sistemas perfectamente balanceados.

2.3 Acoplamiento radiado (vía antena)

Cuando las dimensiones físicas de un conductor o sistema son comparables con la longitud de onda:

- El sistema se comporta como una antena no intencional
- Puede tanto:
 - Emitir interferencia
 - recibir perturbaciones externas

En la imagen 3 se puede apreciar un acoplamiento en modo antena o radiados.

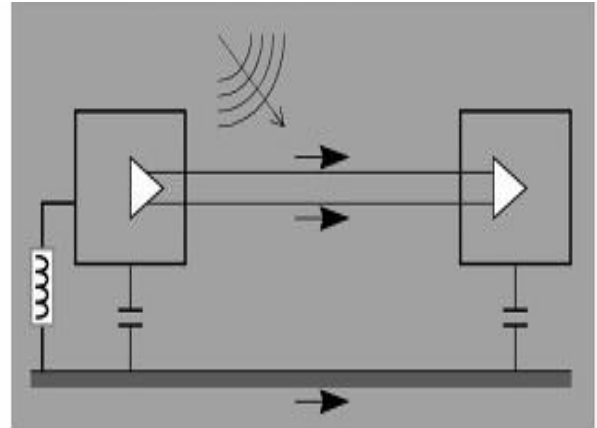


Figura 3 Acoplamientos radiados

3. Comparación técnica entre modos de acoplamiento

En la tabla 1 disponemos de una comparación de modos de acoplamientos de acuerdo a diferentes parámetros

TABLA 1 Comparación entre modos de acoplamiento		
Parámetro	Modo diferencial (DM)	Modo común (CM)
Dirección de corriente	Opuesta	Misma dirección
Relación con señal útil	Directa	No relacionada
Participación de tierra	No relevante	Fundamental
Radiación EMI	Baja	Alta
Control	Relativamente sencillo	Complejo

El análisis de los modos de acoplamiento es fundamental para cualquier diseño EMC, ya que:

- Permite identificar cómo se transfiere la interferencia

- Define las estrategias de mitigación adecuadas
- Evita soluciones incorrectas (ej. tratar CM como DM)

4. Transitorios electromagnéticos.

Los transitorios electromagnéticos constituyen una categoría crítica dentro de las interferencias electromagnéticas (EMI), caracterizada por perturbaciones de corta duración y alta energía, capaces de afectar significativamente el funcionamiento de sistemas eléctricos y electrónicos.

Estos fenómenos incluyen:

- Picos de tensión (voltage spikes)
- Sobretensiones transitorias (surges)
- Impulsos rápidos (fast transients)

En la figura 4 se puede observar una curva típica de un transitorio.

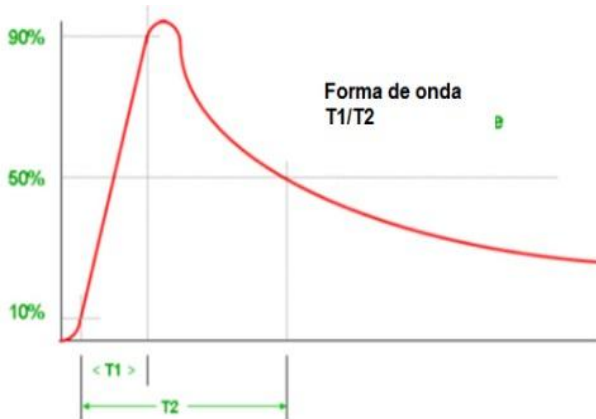


Figura 4 Forma de onda de un transitorio

4.1 Origen de los transitorios

Los transitorios pueden generarse por múltiples mecanismos, entre los más relevantes:

1. Descargas electrostáticas (ESD) Descarga electrostática

Ing. Gregor Rojas

- Transferencia súbita de carga entre cuerpos con distinto potencial
- Puede alcanzar niveles de varios kV en tiempos extremadamente cortos (ns)
- Común en interacción humano–equipo

2. Conmutación de potencia

- Encendido/apagado de cargas inductivas o capacitivas
- Operación de:
 - Motores
 - Relés
 - Contactores
 - Convertidores electrónicos

Genera variaciones bruscas de corriente (di/dt) y tensión (dv/dt)

3. Fenómenos en la red eléctrica

- Maniobras de conmutación
- Fallas o cortocircuitos
- Descargas atmosféricas indirectas

4.2 Características de un transitorio

Un transitorio típico se caracteriza por:

- Tiempo de subida muy rápido (ns a μ s)
- Alta amplitud (puede superar ampliamente el valor nominal del sistema)
- Duración corta (μ s a ms)
- Alto contenido en frecuencias elevadas

4.3 Interpretación técnica de la curva

La forma de onda de un transitorio presenta generalmente:

1. Frente de subida (Rise Time)

- Incremento abrupto de la señal
- Determina el contenido en alta frecuencia

2. Valor pico (Peak Value)

- Máxima amplitud alcanzada
- Factor crítico para daño en componentes

3. Fase de decaimiento (Decay)

- Disminución progresiva de la señal
- Puede seguir una ley exponencial

5. Variaciones del voltaje de alimentación y su impacto en EMC

El voltaje de alimentación en sistemas eléctricos y electrónicos está sujeto a múltiples perturbaciones que pueden comprometer la operación, confiabilidad y vida útil de los equipos.

Estas perturbaciones forman parte de lo que se conoce como calidad de energía eléctrica del inglés Power Quality y constituyen una fuente relevante de problemas de compatibilidad electromagnética.

5.1 Tipos de perturbaciones en la tensión de alimentación

Los equipos deben diseñarse para operar correctamente bajo las siguientes condiciones anómalas:

1. Caídas de tensión de corta duración (Voltage Dips / Sags)

- Reducciones temporales del valor RMS del voltaje
- Duración típica: milisegundos a segundos
- Causas:

- Arranque de motores

- Fallas en la red
- Sobrecargas transitorias

Impacto:

- Reinicio de equipos
- Fallas en fuentes conmutadas
- Pérdida de datos en sistemas digitales

2. Interrupciones de suministro

- Pérdida total de la tensión de alimentación
- Duración superior a 3 segundos (clasificación típica industrial)

Impacto:

- Parada total del sistema
- Necesidad de respaldo (UPS, generadores)
- Riesgo de corrupción de procesos

3. Distorsión armónica y desequilibrio de fases

3.1 Distorsión armónica

- Presencia de componentes de frecuencia múltiplo de la fundamental
- Generadas por cargas no lineales:
 - Variadores de velocidad
 - Fuentes conmutadas
 - Equipos electrónicos

3.2 Desequilibrio de fases:

Diferencias de voltaje entre fases en sistemas trifásicos

Impacto:

- Sobrecalentamiento de conductores y transformadores
- Distorsión de señales
- Mal funcionamiento de equipos sensibles

5.2 Degradación de señal por armónicos

Una interpretación técnica sería ver como la señal ideal (senoidal) se deforma debido a la superposición de armónicos.

Se incrementa el THD (Total Harmonic Distortion) y la energía se redistribuye en múltiples frecuencias.

En las figuras siguientes podremos observar con se produce esta distorsión:

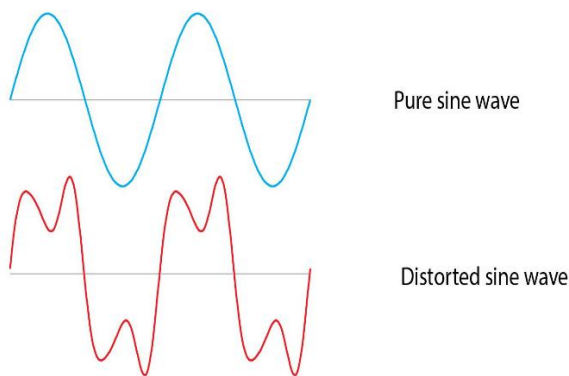


Figura 5 señales senoidales fundamental y distorsionada

En la figura 5 podemos apreciar dos señales, la azul es una onda sinusoidal pura o fundamental, la roja representa una onda también sinusoidal pero distorsionada.

En la figura 6 podemos ver tres señales de manera independiente, la fundamental representada en color negro, el armónico en color rojo y la suma de ambas en color azul que sería la señal distorsionada.

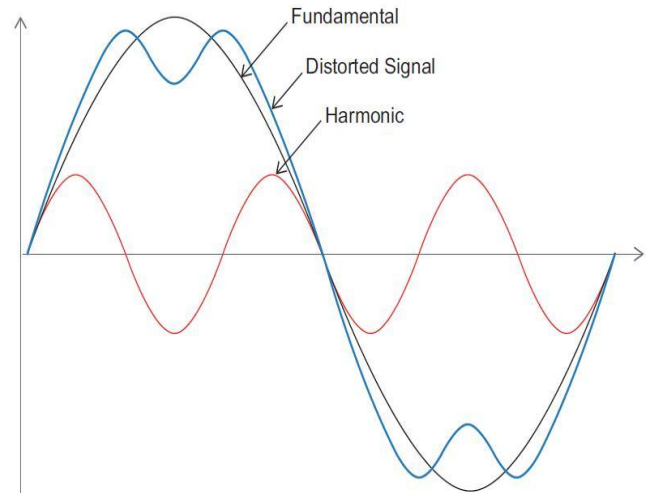


Figura 6 señales senoidales Fundamental, armónica y resultante

5.2.1 Flicker

El flicker término en inglés es lo que conocemos como un parpadeo de voltaje, son variaciones rápidas y repetitivas del nivel de voltaje con frecuencia típica entre que va entre 0.5Hz hasta 30 Hz.

Causas:

Cargas fluctuantes (hornos, soldadura, grandes motores)

Impacto:

- Parpadeo en iluminación
- Inestabilidad en equipos electrónicos

5..2 Transitorios

Son sobrevoltajes de muy corta duración, presentan un alta pendiente (dv/dt) y están asociados a conmutaciones o descargas.

5.3 Descarga Electroestática (ESD)

En este caso, los caminos de acoplamiento probables son:

- Capacitancia de aislamiento
- Conexiones y uniones de enlace
- Inductancia de alambrado debido a campos magnéticos generados en la descarga

6. El uso de blindaje en acoplamiento inductivo

El blindaje magnético puede aplicarse tanto a fuentes de ruidos o circuito de señal para minimizar el acoplamiento.

Blindar campos magnéticos de baja frecuencia no es tan fácil como blindar campos eléctricos. La eficacia del blindaje magnético depende del tipo de material y su permeabilidad, su espesura y las frecuencias involucradas.

Debido a su alta permeabilidad relativa, el acero es más eficiente que el aluminio y el cobre en bajas frecuencias (menor que 100 kHz).

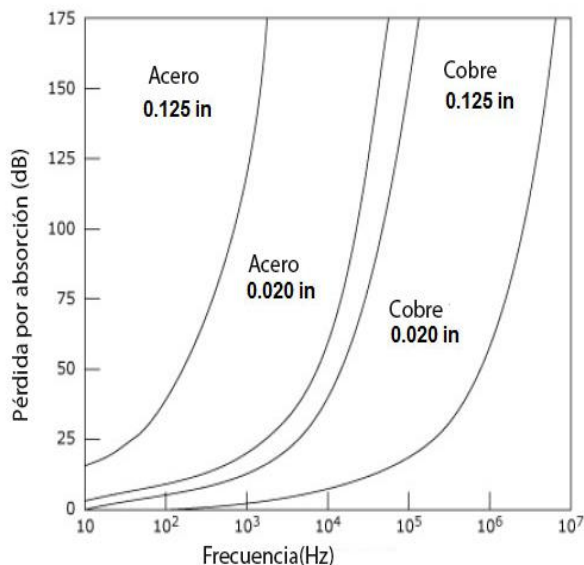


Figura 7 Curvas de pérdida de absorción con el uso de cobre y acero

No obstante, en frecuencias más altas, el aluminio y el acero pueden usarse. En la figura 8 podemos apreciar las curvas de la pérdida de absorción con el uso de metales como cobre y acero para dos espesores de cada uno.

Tenga presente que el blindaje magnético de estos metales es muy ineficaz en bajas frecuencias.

6.1 Efecto Skin

Sobre el blindaje una característica importante es su profundidad (δ).

$$(\delta) = (\pi \cdot F \cdot \mu \cdot \sigma)^{-0.5}$$

Profundidad es igual a

$$(\delta) = (\pi \cdot F \cdot \mu \cdot \sigma)^{-0.5}$$

Donde

F = frecuencia

s = conductividad

m = permeabilidad

$$(\delta) = (\pi \cdot F \cdot \mu \cdot \sigma)^{-0.5}$$

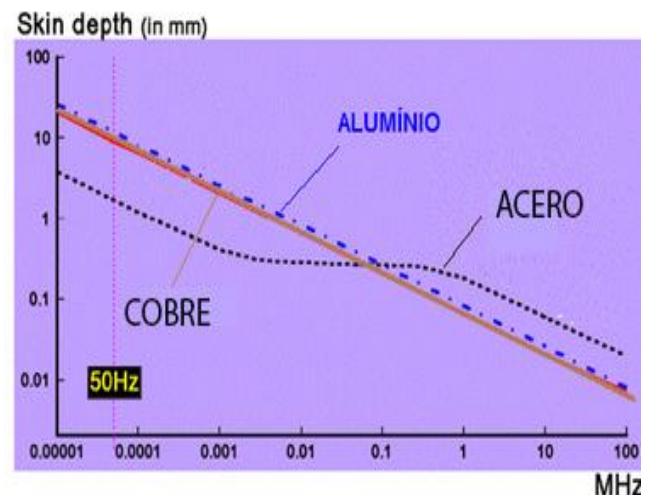


Figura 8 Profundidad (skin) del cobre, aluminio y acero

Como podemos observar en la figura 8, en ella se muestra la profundidad (skin d) tanto del cobre, como aluminio y del acero.

Por ejemplo, la profundidad en aluminio a 30 MHz es de 0,015mm. Esto explica porque en conductores finos son ineficaces cuando operan a altas frecuencias, la corriente solo fluye en la superficie y la mayor parte del material no afecta las propiedades del blindaje. Adicionalmente, es posible reducirse la densidad de corriente de 18 dB en materiales con dos veces el espesor, es decir, con tres capas de “d” y así sucesivamente.

Los requisitos para un blindaje electromagnético eficaz establecen que se requiere alta conductividad eléctrica para la atenuación de campos eléctricos y alta permeabilidad magnética para la mitigación de campos magnéticos.

El efecto pelicular (skin effect) conduce a que la resistencia en corriente alterna (CA) de un conductor aumente conforme se incrementa la frecuencia de la corriente que circula por dicho conductor, debido a la reducción efectiva de la sección transversal por donde fluye la corriente.

En régimen transiente, pueden destacarse algunos aspectos relevantes: inicialmente, la corriente tiende a concentrarse en la superficie del conductor y posteriormente se redistribuye progresivamente hacia el interior, hasta alcanzar una condición de régimen permanente con distribución más uniforme.

Este comportamiento depende de las propiedades eléctricas del material, particularmente su conductividad y permeabilidad, considerando que una mayor resistencia inicial aparente disminuye a medida que se estabiliza la distribución de corriente.

Este fenómeno se hace más pronunciado a altas frecuencias, donde la densidad de corriente presenta una distribución exponencial decreciente

desde la superficie hacia el interior del conductor, en función de las características del material y de la frecuencia de operación.

El cobre y el aluminio presentan una conductividad eléctrica aproximadamente cinco veces superior a la del acero, por lo que resultan altamente adecuados para el blindaje de campos eléctricos. Además, poseen una permeabilidad relativa cercana a la unidad ($\mu_r \approx 1$), equivalente a la del aire.

El acero al carbono presenta una permeabilidad relativa del orden de 300 a bajas frecuencias, la cual disminuye progresivamente hasta valores cercanos a 1 al aumentar la frecuencia por encima de aproximadamente 100 kHz.

Su elevada permeabilidad a bajas frecuencias se traduce en una menor profundidad de penetración (skin depth), lo que lo hace más eficiente que el aluminio para el blindaje de campos magnéticos en este rango.

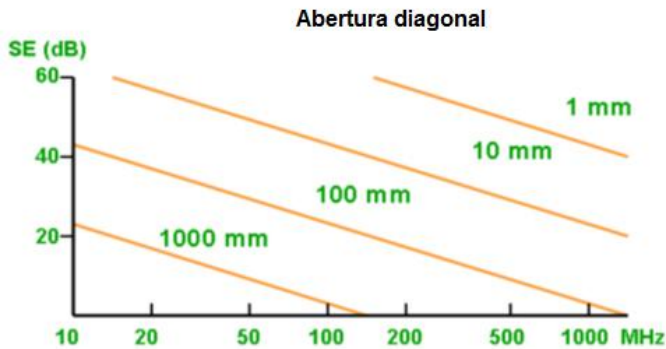
Por otra parte, los distintos tipos de acero inoxidable presentan variaciones significativas en conductividad y permeabilidad, lo que implica diferencias considerables en su profundidad de penetración y, por ende, en su comportamiento frente al blindaje electromagnético.

Un buen material para blindaje tendrá alta conductividad, alta permeabilidad y espesura suficiente para alcanzar el número deseado de profundidad (d) en la frecuencia más baja que se intenta blindar. Un milímetro de espesura de acero envuelto en zinc ligero puro (digamos, 10 microns o más) tienen excelente protección en varias aplicaciones.

6.2 Aberturas y eficacia del blindaje

La figura 9 muestra cómo la **efectividad del blindaje (Shielding Effectiveness, SE)** disminuye en función de la frecuencia y de la dimensión característica de la abertura. Una abertura de 100

mm permite el paso de aproximadamente 20 dB más de energía electromagnética en comparación con una abertura de 10 mm.



a) Eficácia da blindagem x frequência

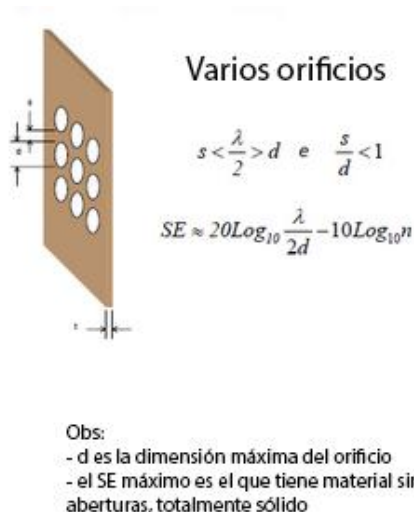
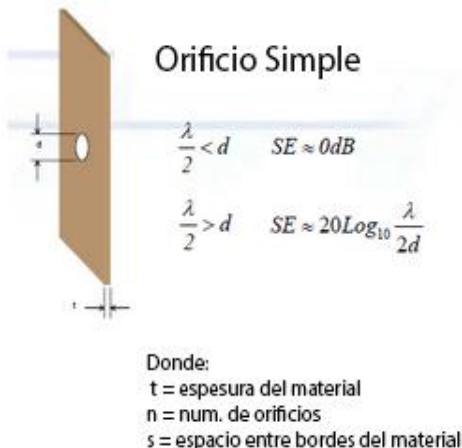


Figura 9 Eficacia del blindaje

Las aberturas son necesarias para funciones como control de acceso, ventilación, interfaces y visualización. Asimismo, las discontinuidades en las juntas entre elementos conductores se comportan electromagnéticamente como aberturas, degradando la eficacia global del blindaje.

$$SE = 20\log(l/2d)$$

donde l es la longitud de onda y d es la mayor dimensión de la abertura.

Existen muchas variables que deben tenerse en cuenta con relación a la eficacia del blindaje:

- La forma, el tamaño, posición y el número de aberturas
- Las posiciones relativas y las distancias entre la fuente de ruido, las aberturas y la víctima
- La geometría de blindaje
- La frecuencia e impedancia de la fuente de ruido

El material y forma de blindaje van a definir cuanto la onda electromagnética incidente se reflejará y será absorbida, además de cuanto pasará por el blindaje alcanzando los hilos conductores de señales.

Téngase en cuenta que la pérdida por absorción se define como la relación entre el espesor del blindaje y su efecto peculiar (skin), que representa la profundidad de penetración de la onda contenida en el interior del blindaje. Cuanto mayor la pérdida por absorción dB, mejor será la respuesta del blindaje.

El blindaje eficaz, alrededor de 60 dB o superior, ofrece un nivel de protección muy bueno. Para tenerse el blindaje eficiente, es necesario

evaluarse también los factores relacionados anteriormente.

El blindaje totalmente cerrado sería la solución ideal, pues tendría la más alta eficiencia, en la práctica es muy complicada la construcción de blindajes enteramente cerrados.

El blindaje es mucho más complejo que un simple envoltorio cerrado, obtenido con materiales metálicos. En el caso de instalaciones industriales, principalmente en cajas de juntas, es fundamental mantenerse la continuidad y el área del circuito lo menor posible en conductores decapados.

Es muy importante tener presente que la conexión del shield con la puesta a tierra debe ser la menor posible, pues, una conexión de 30 cm dejaría, por ejemplo, el blindaje ineficaz para ruidos alrededor de docenas de KHz.

El blindaje eficaz, de 60 dB o arriba, ofrece nivel de protección muy bueno. Para eso, es necesario evaluarse también los factores relacionados anteriormente. El blindaje totalmente cerrado sería la solución ideal y de más alta eficiencia, pero en la práctica sería muy complicado obtenerlo.

En el próximo boletín técnico continuaremos con este interesante.