

Boletín 110

EMI Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales

Boletín técnico N°110
PARTE 2
Ing. Gregor Rojas

EMI Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales

PARTE 2

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. 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.

2. Integridad de uniones en sistemas de blindaje electromagnético

En el diseño y selección de envolventes metálicas destinadas a la mitigación de interferencias electromagnéticas (EMI), resulta crítico garantizar la continuidad eléctrica efectiva en todas las interfaces mecánicas que conforman el blindaje.

Aunque las uniones entre piezas metálicas suelen estar resueltas desde el punto de vista estructural (unión mecánica), esto no garantiza necesariamente una baja impedancia eléctrica entre superficies. La presencia de óxidos, pintura, rugosidad superficial o baja presión de contacto puede generar discontinuidades eléctricas, las cuales actúan como puntos de fuga de radiación electromagnética, especialmente en el rango de radiofrecuencia (RF).

Para mitigar estas fugas, se emplean juntas electromagnéticas conductoras (EMI gaskets), cuya función es:

- Reducir la impedancia de contacto entre superficies metálicas
- Mantener continuidad eléctrica incluso ante vibraciones o tolerancias mecánicas
- Minimizar emisiones y mejorar la inmunidad del sistema

2.1 Consideraciones constructivas en uniones metálicas

Cuando un blindaje se construye a partir de piezas metálicas mecanizadas o ensambladas:

- Las uniones deben realizarse mediante tornillería con elementos de presión (arandelas grower, arandelas dentadas o sistemas autoblocantes).
- Es imprescindible que las superficies de contacto estén libres de recubrimientos

aislantes (pintura, anodizado, óxido) en el momento del ensamblaje.

- El proceso recomendado es:
 1. Ensamble mecánico asegurando contacto metal-metal
 2. Verificación de continuidad eléctrica (baja resistencia de contacto)
 3. Aplicación posterior de recubrimientos protectores (si aplica)

2.2 Influencia de las discontinuidades geométricas (ranuras y aperturas)

La degradación de la efectividad del blindaje (Shielding Effectiveness, SE) está fuertemente influenciada por las discontinuidades geométricas presentes en la envolvente.

Factores determinantes:

- Dimensión lineal máxima de la apertura (factor dominante)
- Frecuencia de la señal incidente
- Impedancia de onda del campo electromagnético
- Polarización del campo

Una ranura o apertura en el blindaje se comporta electromagnéticamente como una antena ranurada, capaz de:

- Acoplar energía del exterior hacia el interior
- Re-radiar energía generada internamente

En términos equivalentes, una ranura puede modelarse como un dipolo eléctrico, cuya eficiencia depende de su longitud efectiva respecto a la longitud de onda.

Tenga presente lo enunciado anteriormente, para que al momento de requerir un sistema de

canalización mediante bandejas portacables capaz de no permitir interferencias electromagnéticas pueda elegir la que posea el mejor comportamiento ante las EMI.

En el **boletín técnico 33** Desempeño de las bandejas portacables frente a las perturbaciones de EMI PARTE 1 y el **boletín técnico 34** Desempeño de las bandejas portacables frente a las perturbaciones de EMI PARTE 2 podrá conocer más de este tema en particular.

2.3 Comparación entre ranuras y perforaciones múltiples

Un principio fundamental en diseño EMC es:

La pérdida de efectividad del blindaje depende más de la geometría que del área total de apertura.

Implicaciones prácticas:

- Una ranura larga y estrecha puede degradar significativamente el blindaje
- Múltiples perforaciones pequeñas (tipo malla) presentan menor impacto, incluso con igual área total

Esto se debe a que:

- La longitud máxima de la discontinuidad determina la eficiencia de radiación
- Las aperturas pequeñas generan menor perturbación en las líneas de campo

Por tanto:

- Es preferible utilizar patrones de perforación distribuida
- Evitar discontinuidades lineales largas (juntas mal selladas, tapas sin continuidad)

3. Blindaje frente a acoplo capacitivo (campos eléctricos)

Desde el punto de vista de teoría de circuitos, la interacción con campos eléctricos se modela como un acoplo capacitivo, originado por la existencia de capacitancias parásitas entre conductores.

En las figuras 1 y 2 podemos apreciar dos ejemplos de efectos por acoplamientos capacitivos.

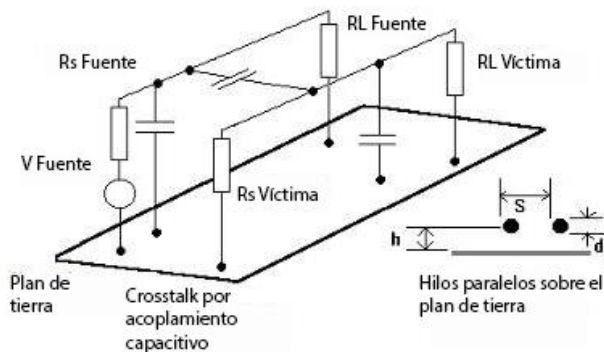


Figura 1 Efecto por acoplamiento capacitivo

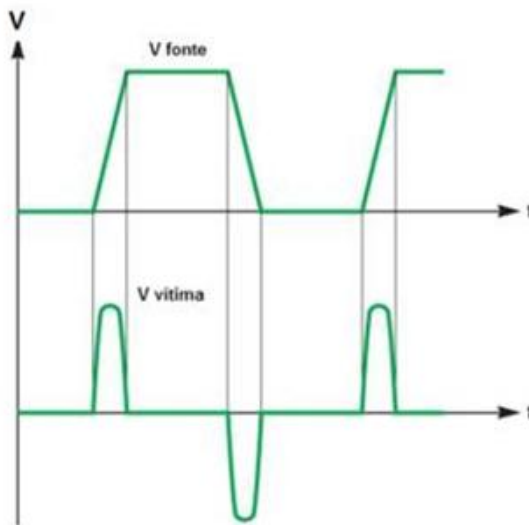


Figura 2 Efecto por acoplamiento capacitivo

3.1 Principio de funcionamiento

Un blindaje electrostático (tipo Jaula de Faraday) opera bajo los siguientes principios:

- Redistribuye las cargas eléctricas en su superficie
- Cancela el campo eléctrico en su interior
- Proporciona un camino de baja impedancia hacia referencia (masa)

3.2 Requisitos de diseño

Para que un blindaje contra campos eléctricos sea efectivo:

- Debe encerrar completamente el sistema a proteger
- Debe estar conectado a un potencial de referencia estable (tierra)
- Debe estar fabricado con materiales de alta conductividad eléctrica (cobre, aluminio)

Un blindaje flotante (no referenciado a masa) puede comportarse como una estructura resonante, actuando como antena y degradando la inmunidad del sistema.

3.3 Mecanismo del acoplo capacitivo

El acoplo capacitivo ocurre cuando una señal interferente se transfiere mediante capacitancias parásitas:

- Entre conductores adyacentes
- Entre circuitos cercanos
- Entre el usuario y el sistema (ejemplo clásico: desintonización de osciladores al acercar la mano)

En sistemas digitales de alta velocidad:

- Produce intermodulación, crosstalk y errores de señal
- Es especialmente crítico en buses paralelos y líneas de alta impedancia

La figura 3 muestra la interferencia entre cables, donde el acoplamiento capacitivo entre los cables induce transitorios de voltaje (surtos electrostáticos). En esta situación, la corriente de interferencia se drena a la tierra a través del Shield, sin afectar los niveles de las señales.

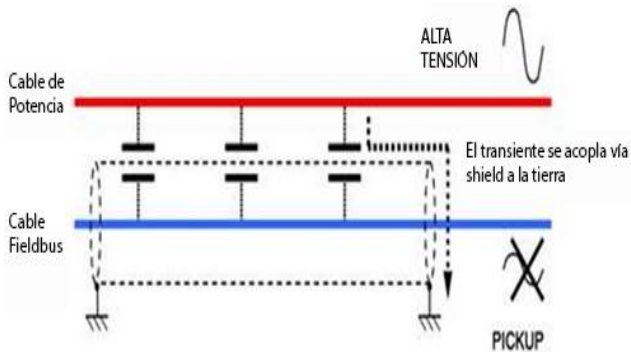


Figura 3 Interferencia entre cables: el acoplamiento entre cables induce transiente de voltaje

3.4 Técnicas de mitigación

- Encapsulamiento en blindajes metálicos conectados a tierra
- Uso de planos de masa en PCB multicapa
- Separación física y control de impedancias

Un plano a tierra actúa como:

- Camino de retorno de corriente
- Referencia de potencial uniforme
- Elemento de reducción de inductancias de bucle

En la figura 4 podemos observar dos maneras de realizar una protección contra transitorios. En ella se puede ver que ambas formas están conectadas a tierra.

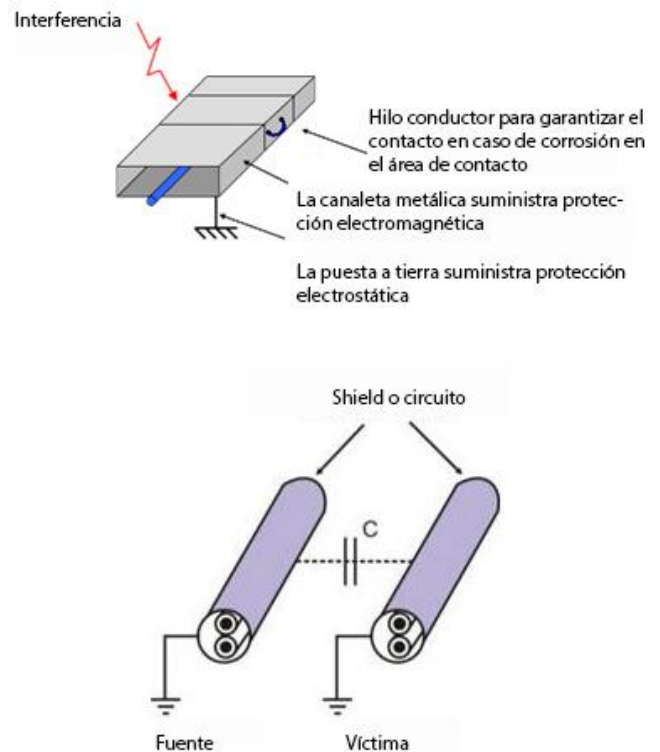


Figura 4 Protección contra transientes (Mejor solución contra la corriente de Foucault)

4. Blindaje frente a acoplo inductivo (campos magnéticos)

El acoplo inductivo está asociado a la interacción con campos magnéticos variables, los cuales inducen voltajes parásitos conforme a la Ley de Faraday.

4.1 Mecanismo físico

Un campo magnético variable genera un flujo Φ a través de un bucle conductor, induciendo una tensión:

- Proporcional al área del bucle
- Proporcional a la variación temporal del flujo

4.2 Requisitos del blindaje magnético

Un blindaje magnético efectivo debe:

- Encerrar completamente el sistema
- Estar fabricado con materiales de alta permeabilidad magnética (ej. mu-metal)
- Proporcionar una trayectoria de baja reluctancia para el flujo magnético

A diferencia del blindaje eléctrico, es más difícil lograr simultáneamente:

- Alta permeabilidad
- Alta conductividad

En la figura 5 podemos observar cómo se representa tanto física como en circuito equivalente un acoplamiento inductivo

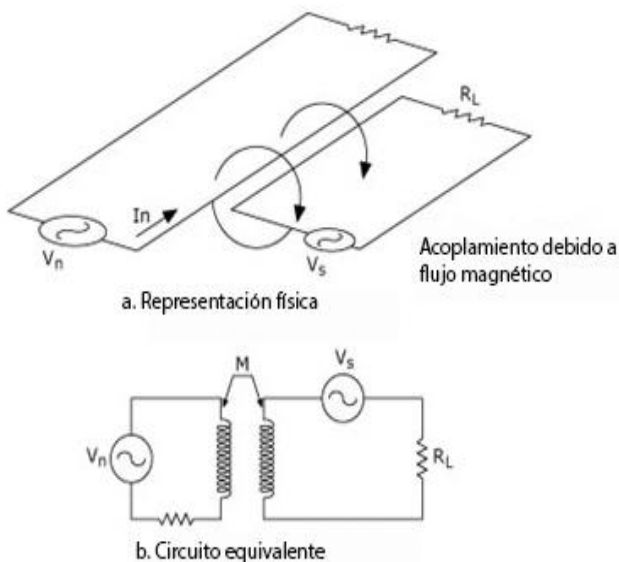


Figura 5 Acoplamiento inductivo
Representación física y circuito equivalente

4.3 Estrategias de mitigación

1. Reducción en la fuente:

- Minimizar el área de los bucles de corriente

- Diseñar trayectorias de ida y retorno cercanas
- Cancelar campos mediante geometrías simétricas

2. Reducción en la víctima:

- Minimizar área de bucles receptores
- Optimizar rutas de retorno

4.4 Importancia de los planos de masa

En circuitos impresos:

- Todos los nodos de masa deben conectarse a un plano continuo, no a pistas
- El retorno de corriente sigue el camino de menor impedancia (no necesariamente el más corto)

Esto permite:

- Que el retorno "siga" la señal en el plano inferior
- Minimizar el área del bucle
- Reducir la energía almacenada en el campo magnético

Resultado:

Menor flujo magnético → menor tensión inducida
→ menor susceptibilidad al acoplo inductivo

El desempeño de un sistema de blindaje electromagnético no depende únicamente del material o del espesor, sino fundamentalmente de:

- La integridad eléctrica de sus uniones
- El control geométrico de aperturas y discontinuidades

- La correcta referenciación a tierra
- La minimización de áreas de bucle en diseño de circuitos

Un enfoque integral que combine teoría de campos y teoría de circuitos es indispensable para lograr compatibilidad electromagnética (EMC) en entornos reales.

5. Blindaje frente a interferencias de radiofrecuencia (RF)

En el ámbito de la compatibilidad electromagnética (EMC), no existe un blindaje ideal o perfecto frente a campos de alta frecuencia.

El comportamiento real de un blindaje frente a una onda electromagnética incidente se basa en tres fenómenos fundamentales:

- Reflexión en la superficie del material
- Absorción dentro del material
- Transmisión residual a través del blindaje

El balance entre estos mecanismos define la efectividad del blindaje (Shielding Effectiveness, SE).

5.1 Mecanismos físicos de atenuación

Cuando una onda electromagnética incide sobre un blindaje:

- Una fracción de la energía es reflejada, principalmente en función de la conductividad eléctrica (σ) del material
- Otra fracción penetra en el material y es atenuada exponencialmente debido a pérdidas internas (efecto piel)
- Una pequeña parte puede atravesar completamente el blindaje

Propiedades clave del material:

- Alta conductividad (Cu, Al):
→ Favorece la reflexión
- Alta permeabilidad magnética (μ):
→ Favorece la absorción

5.2 Blindajes compuestos y recubrimientos galvánicos

El uso de múltiples capas metálicas puede mejorar significativamente la atenuación, pero en la práctica presenta limitaciones mecánicas y económicas.

Como solución eficiente, se emplean blindajes compuestos, típicamente mediante:

- Recubrimientos galvánicos (electrodeposición)
- Combinación de materiales con propiedades complementarias

Configuración típica:

- Capa externa (orientada hacia la fuente): cobre (alta conductividad → alta reflexión)
- Capa interna: material ferromagnético (alta permeabilidad → alta absorción)

Ventajas:

- Elevada atenuación total combinando reflexión + absorción
- Reducción de resonancias internas
- Mejora del comportamiento en un amplio rango de frecuencias

5.3 Campo cercano vs campo lejano

La naturaleza del campo electromagnético depende de la distancia a la fuente emisora.

Definición de campo cercano:

Se considera campo cercano hasta aproximadamente:

$$r < \lambda/2\pi$$

Donde λ es la longitud de onda.

Ejemplos prácticos:

A 1 MHz → campo cercano \approx 47 m

A 10 MHz → campo cercano \approx 4.7 m

Implicación clave:

En entornos industriales o electrónicos, donde fuente y víctima coexisten en el mismo recinto, es altamente probable operar en condiciones de campo cercano.

5.4 Relación de impedancia de onda (E/H)

La relación entre el campo eléctrico (E) y el campo magnético (H) determina la naturaleza del acoplo:

En espacio libre:

$$E/H \approx 377 \Omega$$

En campo cercano:

Caso 1: Dominancia de campo eléctrico ($E/H > 377 \Omega$)

- Fuente típica: antena vertical (tipo monopolo)
- Mecanismo dominante: acoplo capacitivo

Método de mitigación:

- Blindaje electrostático tipo Jaula de Faraday
- Materiales altamente conductores

- Conexión efectiva a masa

Caso 2: Dominancia de campo magnético ($E/H < 377 \Omega$)

- Fuente típica: bucle de corriente (loop antenna)
- Mecanismo dominante: acoplo inductivo

Método de mitigación:

- Minimización de áreas de bucle
- Uso de planos de masa
- Materiales de alta permeabilidad

5.5 Comportamiento del blindaje en campo cercano

En condiciones de campo cercano, el comportamiento del blindaje cambia significativamente:

- Puede existir predominancia de campo H (hasta un 90%)
- Las pérdidas por reflexión se vuelven poco efectivas
- La absorción se convierte en el mecanismo dominante
- Implicación de diseño:

En presencia de campos magnéticos intensos:

- Materiales como el acero (alta permeabilidad) pueden ser más efectivos
- Materiales altamente conductores (como cobre o aluminio), aunque económicos, pueden resultar insuficientes

Esto rompe el paradigma común de que **“mejor conductor = mejor blindaje”**.

6. Selección de materiales según escenario EMI

En la tabla 1 a continuación se presenta un resumen de los distintos escenarios donde los campos magnéticos o eléctricos pueden estar presentes y los materiales recomendados para contrarrestar sus efectos.

TABLA 1 selección de materiales según escenario			
Escenario	Tipo de campo dominante	Material recomendado	Mecanismo principal
Campo lejano	Balanceado (E/H ≈ 377 Ω)	Cobre / Aluminio	Reflexión
Campo cercano eléctrico	E dominante	Cobre / Aluminio	Reflexión + drenaje a tierra
Campo cercano magnético	H dominante	Acero / materiales ferromagnéticos	Absorción

7. Acoplamiento inductivo en sistemas eléctricos y electrónicos

El acoplamiento inductivo constituye uno de los principales mecanismos de interferencia electromagnética (EMI), particularmente en sistemas con conductores próximos y corrientes variables en el tiempo.

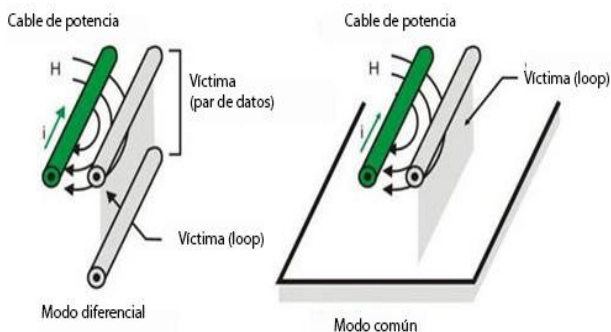


Figura 6 Acoplamiento inductivo

En la figura 6 podemos observar un acoplamiento inductivo entre conductores

Este fenómeno se rige por la Ley de Faraday, donde un campo magnético variable induce una tensión en un circuito cercano proporcional al flujo magnético acoplado.

7.1 Factores que incrementan el acoplamiento inductivo

La magnitud del acoplamiento inductivo entre conductores perturbadores (fuente) y conductores víctimas depende de múltiples parámetros físicos y eléctricos:

1. Frecuencia de la señal

La reactancia inductiva está definida por:

$$X_L = 2\pi fL$$

Implicación:

- A mayor frecuencia (f), mayor oposición inductiva
- Se incrementa la tensión inducida y, por tanto, la interferencia

2. Proximidad y paralelismo entre conductores

- Conductores cercanos incrementan el acoplamiento magnético mutuo
- Trayectorias largas en paralelo aumentan el área efectiva de interacción

Resultado: mayor flujo magnético compartido → mayor tensión inducida

3. Altura respecto al plano de referencia

- La separación entre el conductor y su plano de retorno (tierra) define el área del bucle de corriente

- ❑ A mayor altura (h), mayor área → mayor susceptibilidad al acoplo inductivo

4. Impedancia de carga del circuito perturbador

- ❑ Cargas de alta impedancia favorecen mayores variaciones de voltaje
- ❑ Esto incrementa el campo magnético radiado y su capacidad de acoplamiento

7.2 Configuraciones típicas de acoplamiento inductivo

a) Entre conductores paralelos (cable-cable)

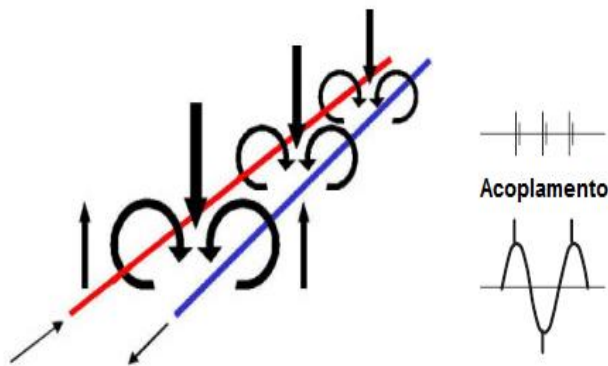


Figura 7 Efecto de acoplamiento inductivo en cables paralelos

En la figura 7 podemos observar cómo puede ser un acoplamiento inductivo entre conductores dispuestos en paralelo, de igual forma, podemos apreciar el acoplamiento de las señales.

Características:

- ❑ Acoplamiento por inductancia mutua
- ❑ Dependencia directa de la longitud paralela y separación

b) Entre conductor y campo electromagnético externo

La figura Características:

- ❑ El cable actúa como antena receptora

- ❑ El campo magnético externo induce corrientes parásitas

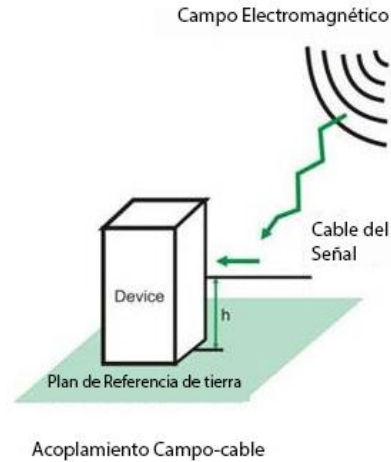


Figura 8 Acoplamiento inductivo entre cable y campo

En la figura 8 podemos observar cómo puede ser un acoplamiento inductivo entre un conductor y un campo electromagnético.

c) Entre conductor y bucles de tierra (ground loops)

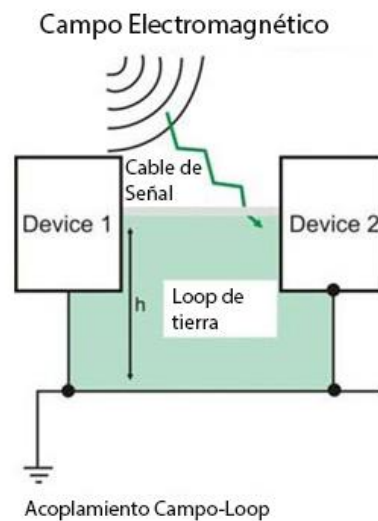


Figura 9 Acoplamiento inductivo entre cable y loop de tierra

En la figura 9 podemos apreciar cómo puede ser un acoplamiento inductivo entre un conductor y la tierra

Características:

- Presencia de múltiples referencias de tierra
- Generación de corrientes circulantes no deseadas

7.3 Técnicas de mitigación del acoplamiento inductivo

7.3.1 Entre cables (cable–cable)

Para minimizar el acoplamiento entre conductores:

- 1. Reducir la longitud de paralelismo**
 - Minimizar recorridos en paralelo entre cables de potencia y señal
- 2. Aumentar la separación física**
 - La intensidad del campo magnético disminuye con la distancia
- 3. Implementar blindajes (shielding)**
 - Conexión del blindaje a tierra en al menos un extremo
 - Evita la captación de campos externos
- 4. Controlar la pendiente de señal (dv/dt)**
 - 4.1 Uso de:
 - Resistencias en serie
 - Termistores PTC
 - Núcleos de ferrita
 - 4.2 Reduce transitorios rápidos → menor contenido espectral en alta frecuencia

7.3.2 Entre cable y campo electromagnético

1. Minimizar la altura (h) respecto al plano de tierra
 - Reduce el área del bucle
2. Ruteo cercano a superficies conductoras
 - Favorece el retorno de corriente próximo

3. Uso de pares trenzados (twisted pair)
 - Cancelación de campos magnéticos por simetría
4. Implementación de ferritas y filtros EMI
 - Atenúan componentes de alta frecuencia

7.3.3 Entre cable y bucles de tierra

1. Minimizar área del bucle
 - Reducir longitud y separación del conductor
2. Aproximar el cable al plano metálico
 - Disminuye la inductancia del lazo
3. Uso de cableado trenzado
 - Reduce captación de flujo magnético
4. Estrategia de conexión de blindaje (shield grounding)
 - 4.1 Alta frecuencia:
 - Conexión en ambos extremos
 - Mejora comportamiento frente a RF
 - Riesgo: corrientes de bucle
 - 4.2 Baja frecuencia:
 - Conexión en un solo punto
 - Evita corrientes parásitas

7.4 Reglas de diseño EMC para cableado Separación entre cables

Para garantizar inmunidad electromagnética en sistemas mixtos (potencia + señal), se recomienda:

- Mantener distancias mínimas entre:
 - Cables de potencia
 - Cables de control
 - Cables de comunicación digital
- Evitar:
 - Cruces paralelos prolongados
 - Rutas compartidas sin separación

En caso de cruce inevitable:

- ❑ Realizarlo a 90° para minimizar el acoplamiento

8. Regla fundamental de diseño EMC

No olvide esta regla “Minimizar áreas de bucle, controlar trayectorias de retorno y gestionar la geometría del cableado”

En el próximo boletín técnico continuaremos con este interesante tema.