

FUNDAMENTOS DE LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA



1.	Introducción a la compatibilidad electromagnética	3
1.1.	Campos electromagnéticos.....	3
1.1.1.	El espectro electromagnético.....	6
1.1.2.	Apantallamiento:.....	6
1.1.3.	Penetración de la radiación electromagnética:	6
1.2.	Compatibilidad electromagnética.....	7
1.3.	Interferencias electromagnéticas.	9
1.3.1.	Clasificación según su origen.....	10
1.3.2.	Clasificación según el medio de propagación	10
1.3.3.	Esquema de CEM.....	11
1.3.4.	Consideraciones previas al estudio de interferencias.....	11
1.4.	Magnitudes y señales de perturbación.....	14
1.4.1.	Parámetros perturbadores efectivos	16
1.5.	Tipos de perturbaciones electromagnéticas.....	17
1.5.1.	Armónicos	17
1.5.2.	Transitorios.....	21
1.5.3.	Descargas electrostáticas «DES».....	22
1.5.4.	Perturbaciones de la red pública de alimentación «BT».....	24
1.6.	Solapamiento de señales perturbadoras y útiles en los conductores	24
1.6.1.	Circuitos de funcionamiento simétrico y asimétrico.....	25
1.6.2.	Perturbación de modo diferencial	25
1.6.3.	Perturbación de modo común	26
1.6.4.	Conversión de modo común a modo diferencial	28
1.7.	Mecanismos de propagación de las EMI.....	28
1.7.1.	Tipos de propagación de las EMI.....	29
1.7.2.	EMI conducidas.	29
1.7.3.	EMI por acoplamiento capacitivo.....	30
1.7.4.	EMI por acoplamiento inductivo	31
1.7.5.	Acoplamiento por radiación electromagnética.....	32
1.7.6.	Medición de las EMI conducidas.....	32

1.8.	Conclusiones.....	34
1.8.1.	Terminología usada en compatibilidad electromagnética.....	34
1.8.2.	Compatibilidad electromagnética	35
1.8.3.	Elementos del fenómeno EMI.....	35
1.8.4.	Clasificación de la CEM.....	36
1.8.5.	Mecanismos de acoplamiento	36
1.8.6.	Acoplamiento por conducción	36
1.8.7.	Acoplamiento por radiación.....	37
1.8.8.	Modos de acoplamiento.	38

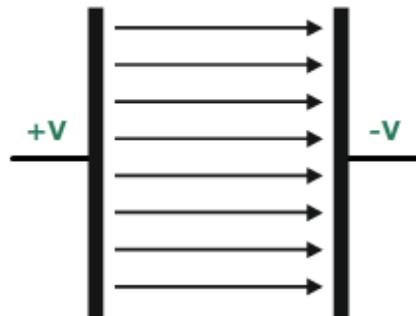
1. Introducción a la compatibilidad electromagnética

1.1. Campos electromagnéticos.

Campo eléctrico: Región del espacio en la que está presente una carga eléctrica que determina una perturbación en el ambiente circundante, en consecuencia de la cual, otras cargas eléctricas sufren una atracción o rechazo. Diferencia de tensión. Se mide en V/m.

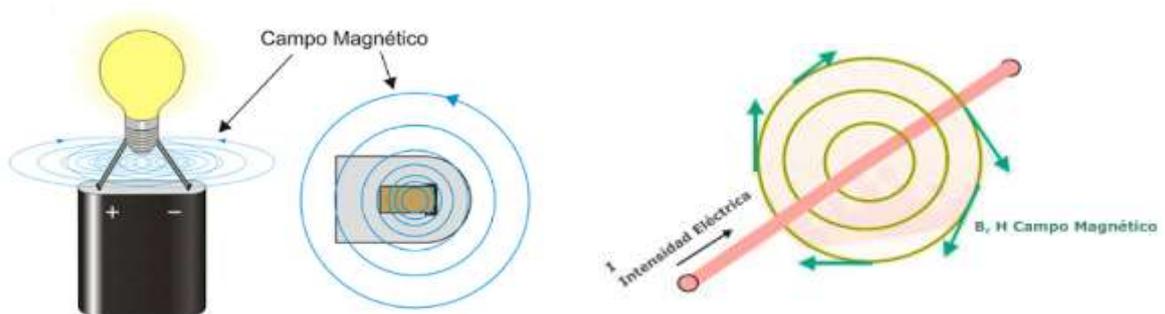


Campo E (condensador)



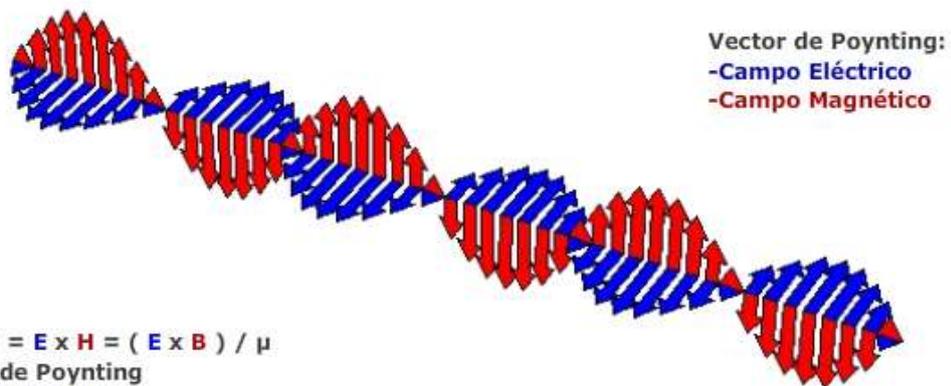
Campo magnético: Región del espacio en la que una carga eléctrica en movimiento (una corriente eléctrica) soporta una fuerza proporcional a la propia carga y a la propia velocidad instantánea. La fuerza es directa y perpendicularmente a la velocidad. Se mide en Teslas o Gauss.

- $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 10.000 \text{ G}$
- $1 \text{ G} = 1 \text{ Mx/cm}^2$



Campo electromagnético: Un campo eléctrico que varía en el tiempo, genera en dirección perpendicular al mismo, un campo magnético variable en el tiempo; esto determina a su vez un nuevo campo eléctrico variable. Tales campos concatenados producen en el espacio la propagación de un campo electromagnético, representado por dos ondas, una magnética (H) y una eléctrica (E).

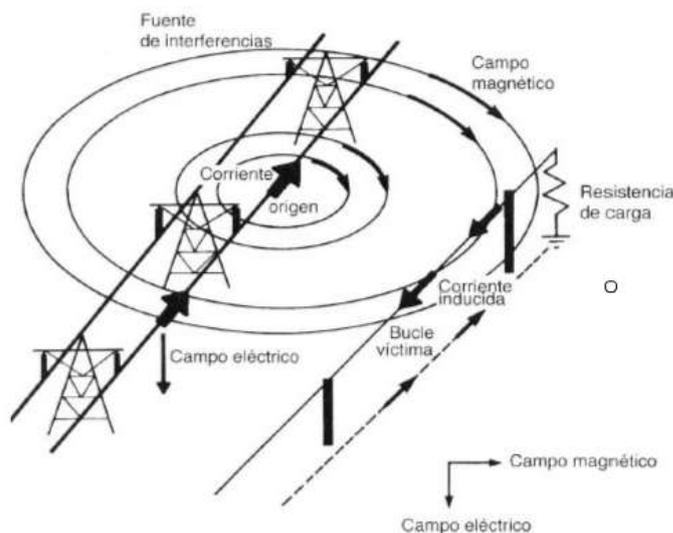
Radiación electromagnética: Campos E y H de una onda electromagnética plana uniforme que se propaga a lo largo del eje x.



Vector de Poynting:
 -Campo Eléctrico
 -Campo Magnético

$S \text{ (W/m}^2\text{)} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) / \mu$
S: Vector de Poynting
E: Campo eléctrico
H: Campo magnético
B: Inducción magnética
 μ : Permeabilidad magnética

Inducción Electromagnética: Las interferencias son señales de tipo electromagnético que perturban, no intencionadamente el normal funcionamiento de un sistema eléctrico o electrónico, afectando a las magnitudes eléctricas o magnéticas de sus componentes y circuitos.



Las interferencias pueden estar en un margen de frecuencias desde continua a radiofrecuencia.

Frecuencia: La característica fundamental de un CEM es la frecuencia f , que es el número de oscilaciones de la onda por segundo (Hz).

Está estrechamente conectada con **la longitud de onda (λ)**, que es la distancia recorrida por la onda durante el tiempo de una oscilación completa (m), mediante la relación: $c = f \times \lambda$

- **c: velocidad de propagación de la onda (m/s)**
- **$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300.000 \text{ Km/s}$**

Longitud de onda:

$$\lambda \times f = c_0$$

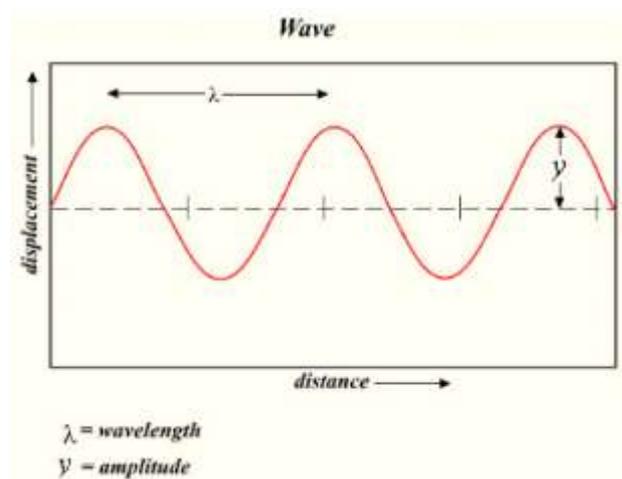
λ = longitud de onda en metros, f = frecuencia en Hz, $c_0 = 3 \times 10^8$ velocidad de la luz en m/s

$$\lambda \text{ (m)} = c_0 / f = 300 / f \text{ (MHz)}$$

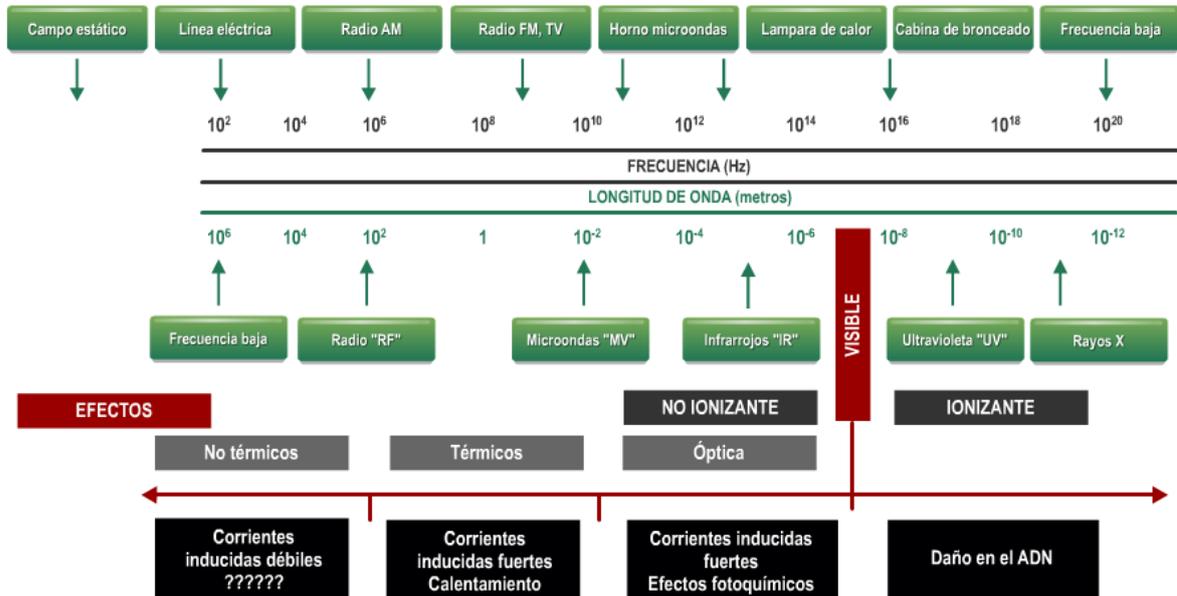
Ejemplo:

$$f = 30 \text{ MHz}, \lambda = (c_0 / f) = 300 / 30 = 10 \text{ m}$$

$$f = 1000 \text{ MHz}, \lambda = (c_0 / f) = 300 / 1000 = 0,3 \text{ m}$$



1.1.1. El espectro electromagnético.



1.1.2. Apantallamiento:

- FRECUENCIA CERO: Campo estático
 - El metal apantalla al campo eléctrico
 - El campo magnético es muy difícil de apantallar
- FRECUENCIA NO NULA

El metal apantalla al campo eléctrico y al magnético

- Si el metal recubre TOTALMENTE al objeto.
- Si el metal es una malla, según el tamaño de los huecos frente a la longitud de onda de la señal, apantalla las bajas frecuencias pero no las altas.

1.1.3. Penetración de la radiación electromagnética:

- El nivel de penetración de la radiación electromagnética es inversamente proporcional a su frecuencia.
- Radiación electromagnética de baja frecuencia, atraviesa limpiamente las barreras a su paso.
- Radiación electromagnética de alta frecuencia reacciona más con los materiales que tiene a su paso y no penetra tanto.
- En función de la frecuencia, las ondas electromagnéticas pueden no atravesar medios conductores. Esta es la razón por la cual las transmisiones de radio no funcionan bajo el mar y los teléfonos móviles se quedan sin cobertura dentro de una caja de metal.
- Como la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma, cuando una onda electromagnética choca con un conductor pueden suceder dos cosas.

- La primera es que se transformen en calor: este efecto tiene aplicación en los hornos de microondas.
- La segunda es que se reflejen en la superficie del conductor (como en un espejo). Como las ondas de comunicaciones que rebotan en la estratosfera.

Los campos eléctricos pueden propagarse en el espacio mientras sean variables en el tiempo. Del mismo modo el campo eléctrico al ejercer fuerza sobre las cargas crea un desbalance eléctrico en el material produciendo una corriente eléctrica.

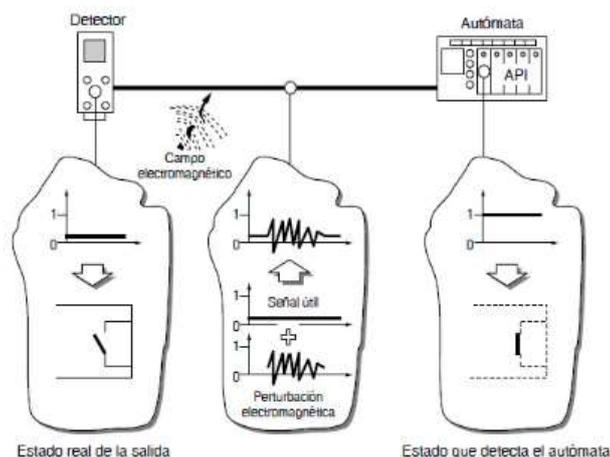
Esta corriente eléctrica, dependiendo de su energía y frecuencia, puede alterar el funcionamiento de cualquier dispositivo eléctrico o electrónico degradando el desempeño del sistema en el cual funciona.

Por su parte los campos magnéticos son análogos a los campos eléctricos, excepto que la naturaleza no nos proporciona cargas magnéticas aisladas sino que estos campos son generados por corrientes eléctricas. Cuando ocurren variaciones de flujo de campo magnético se inducen diferencias de potencial dadas por la Ley de Faraday que pudieran ocasionar fallas en los dispositivos electrónicos del mismo modo que los campos eléctricos. Ambos campos se vinculan en un mismo campo electromagnético cuando la carga es acelerada: variaciones en el tiempo de campo magnético producen campo eléctrico y variaciones de campo eléctrico produce campo magnético.

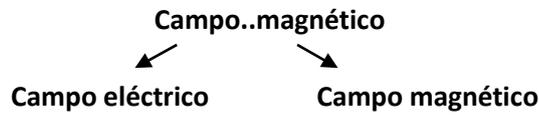
1.2. Compatibilidad electromagnética.

Cualquier dispositivo eléctrico y/o electrónico genera de forma intencionada o no, energía electromagnética que se propaga, bien sea por los conductores eléctricos o por el medio ambiente, pudiendo provocar, perturbaciones electromagnéticas. Una perturbación (electromagnética) es el fenómeno electromagnético susceptible de crear problemas en el funcionamiento de un dispositivo, de un aparato o de un sistema, o de afectar desfavorablemente la materia viva o a la materia inerte. Una perturbación electromagnética puede ser un ruido, una señal no deseada o una modificación de un medio de propagación.

Perturbación Electromagnética



Como su nombre indica, la perturbación electromagnética se compone de un campo eléctrico **E**, generado por una diferencia de potencial. Y de un campo magnético **H**, que tiene su origen en la circulación de una corriente **I** por un conductor.



La perturbación electromagnética <<parásita>> no es más que una señal eléctrica no deseada que se suma a la señal útil.

Esta señal se propaga por conducción, a través de los conductores, y por radiación, a través del aire

El estudio de todos los fenómenos de generación, propagación y captación de interferencias electromagnéticas que puedan perturbar a un equipo, se comprenden mejor si se analizan por partes para caracterizarlas de manera sistemática:

- **La Fuente:** Es el origen de las perturbaciones.
- **Canal de transmisión:** medios de propagación o caminos de acoplamiento.
- **Receptor de perturbaciones:** equipo afectado por éstas.



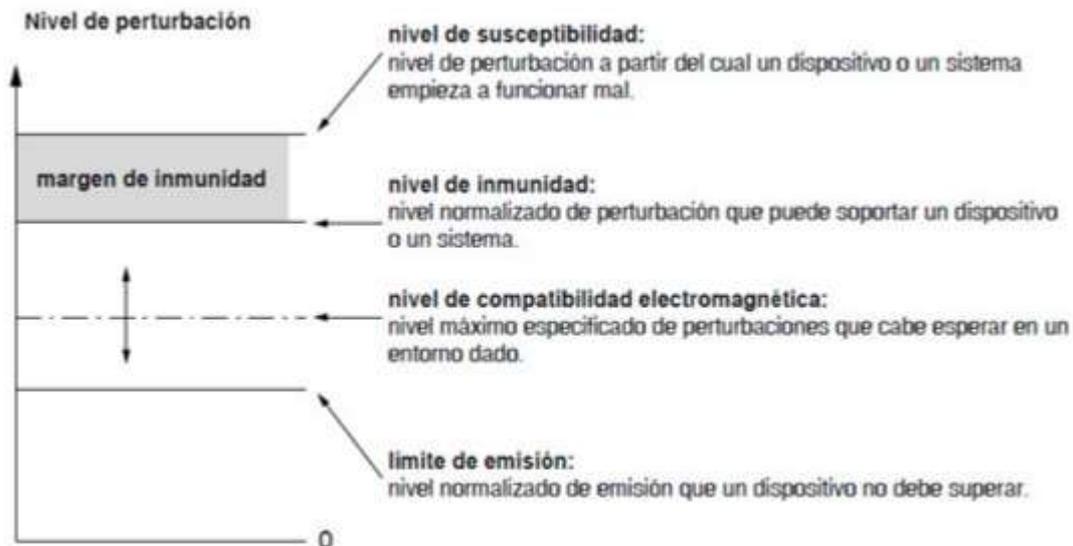
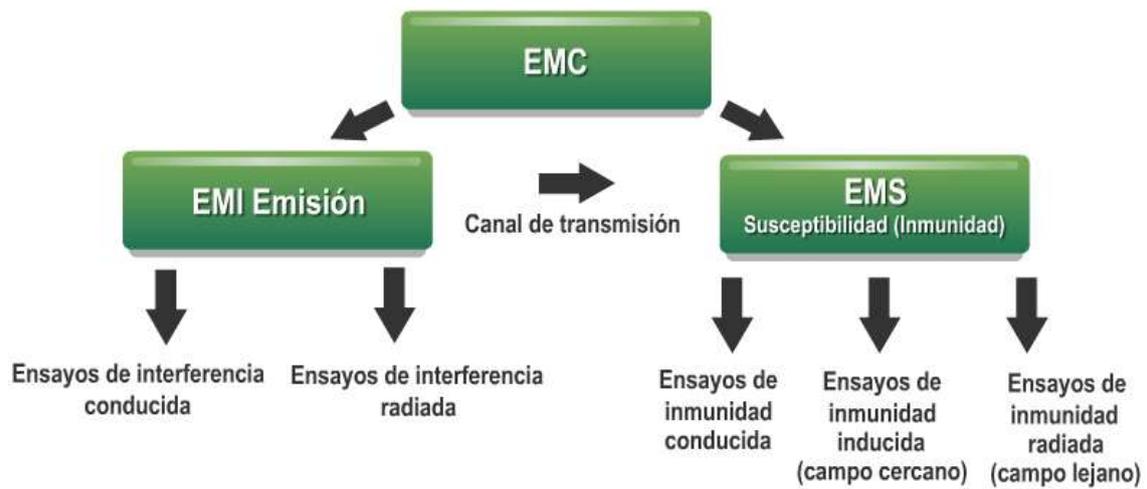
Por lo tanto, para que la fuente y el receptor puedan convivir en armonía se deben cumplir un mínimo de normas tanto de generación de perturbaciones como de inmunidad frente a ellas. Para tal fin se realiza el estudio sobre Compatibilidad Electromagnética, la cual, es la capacidad de un sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin producir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo aquello que se encuentra en este entorno. La compatibilidad electromagnética de un sistema depende del nivel de perturbación, de la interferencia y de la susceptibilidad, o lo que es complementario a ella, la inmunidad del receptor.

El nivel de compatibilidad (electromagnética) es el nivel máximo especificado de perturbaciones electromagnéticas a que se puede someter un dispositivo, aparato o sistema que funciona en condiciones particulares. En la práctica el nivel de compatibilidad electromagnética no es un nivel máximo absoluto ya que, aunque es poco probable, puede ser superado.

El límite de perturbación es el nivel máximo admisible de perturbaciones electromagnéticas medido en condiciones especificadas. El nivel de inmunidad se define como el nivel máximo de una perturbación electromagnética de forma dada que actúa sobre un dispositivo, aparato o

sistema particular, sin que éste deje de funcionar con la calidad deseada. Por otra parte, la Interferencia electromagnética (EMI, Electromagnetic Interference) es la degradación de las prestaciones de un equipo, canal de transmisión o sistema, provocada por una perturbación.

Susceptibilidad electromagnética: La Susceptibilidad Electromagnética (EMS) es la incapacidad de un dispositivo, aparato o sistema de funcionar sin degradar la calidad en presencia de una perturbación electromagnética. Entonces, se define Inmunidad (Electromagnética) como lo contrario a susceptibilidad, es decir, se trata de la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar sin degradación en presencia de una perturbación electromagnética.



1.3. Interferencias electromagnéticas.

Las interferencias electromagnéticas (EMI) son señales de tipo electromagnético que perturban el funcionamiento normal de un equipo o sistema eléctrico o electrónico.

El análisis de un problema de interferencia se puede dividir en tres apartados:

- EL origen, fuente o generador de las interferencias.
- Los caminos de acoplamiento de la interferencia.
- Los receptores afectados por la interferencia.



Para estudiar las interferencias se han de analizar las tres partes mencionadas:

- Determinar quién produce la interferencia y eliminarla o disminuirla si es posible.
- Analizar como se transmite la interferencia y atenuar lo máximo posible la energía interferente transmitida.
- En el caso de que el problema subsista, intentar insensibilizar los receptores.

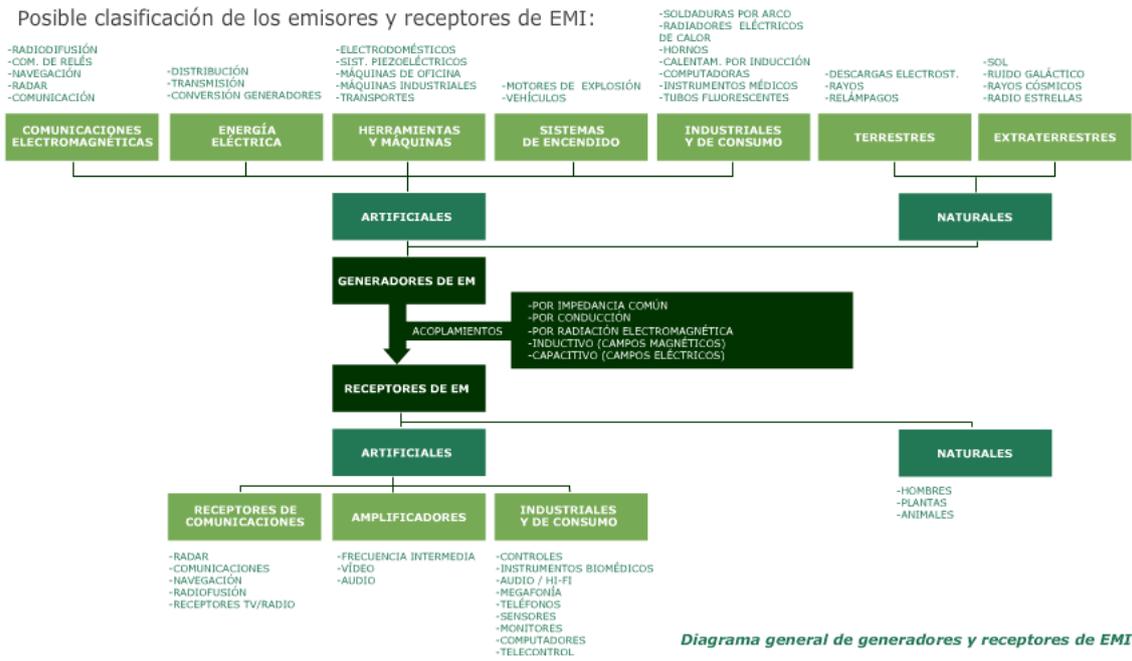
1.3.1. Clasificación según su origen

- **Intrínsecas:** procedentes de las fluctuaciones de los sistemas físicos del propio equipo. A este tipo de interferencias se le suele denominar ruido (ruido térmico..).
- **Provocadas:**
 - **Externas:** emisiones propias de otros equipos que no deberían ser captadas (emisoras de radio y TV, teléfonos móviles, ordenadores...).
 - **Internas:** procedentes del mismo equipo y originadas por características de los sistemas que lo integran (motores, conmutaciones...)
 - **Naturales:** descargas electrostáticas, tormentas eléctricas, radiaciones cósmicas...

1.3.2. Clasificación según el medio de propagación

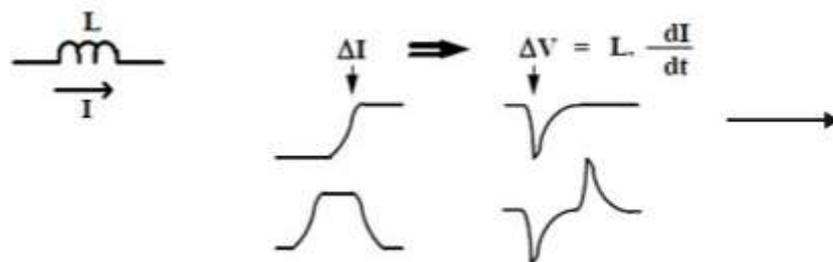
- **Conducidas:** cuando el medio de propagación es un conductor eléctrico que une la fuente de interferencia con el equipo interferido (cables de alimentación o señal, chasis metálicos...). Es denominado acoplamiento conducido.
- **Radiadas:** cuando la propagación se realiza a través del aire por campos electrostáticos o electromagnéticos. Es el denominado acoplamiento radiado.
- **Acopladas:** es un caso particular de la propagación radiada y ocurre cuando la distancia entre emisor y receptor es menor que la longitud de onda dividida por 2π (**campo cercano**). Dentro de esta clase de interferencias acopladas se pueden distinguir los dos siguientes tipos:
 - **Capacitivas:** acoplamiento a través del campo eléctrico.
 - **Inductivas:** acoplamiento a través del campo magnético.

1.3.3. Esquema de CEM



1.3.4. Consideraciones previas al estudio de interferencias

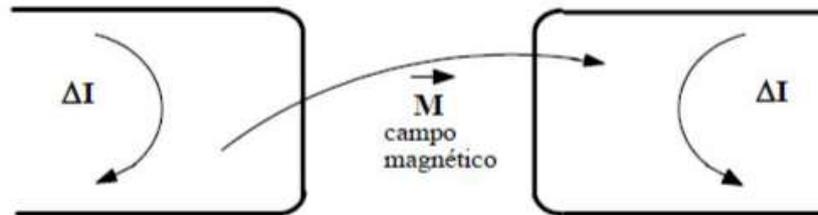
- Las autoinducciones responden con transitorios de tensión a las variaciones de intensidad: todo elemento de naturaleza inductiva responde, ante los cambios de intensidad, con alteraciones de tensión.



En la práctica, serán oscilaciones amortiguadas, habida cuenta de los efectos capacitivos presentes en el circuito

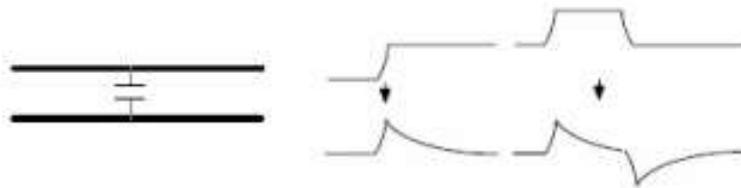
- los picos (glitches) de tensión dependen, no sólo de la amplitud de la variación de intensidad, sino también de la velocidad de dicha variación: de la pendiente dI/dt (de forma que ΔI reducidas pero muy rápidas pueden producir ΔV apreciables).
- todo cable o línea conductora presenta un efecto autoinductivo (una línea de 10 cm, cuya autoinducción será del orden de $0,1 \mu H$, responde a un aumento de intensidad de 10 mA en 1 ns con un transitorio de tensión del orden de 1 V).

- Los bucles de intensidad (espiras) generan campos magnéticos y cuando tales campos son variables (debidos a variaciones de intensidad) producen corrientes inducidas sobre otros bucles (espiras) próximos. El acople inductivo es proporcional al área de los bucles.



De igual forma, todo bucle conductor recibe el efecto inductivo de los campos magnéticos que le alcanzan y tal efecto es tanto mayor cuanto lo es el área del bucle.

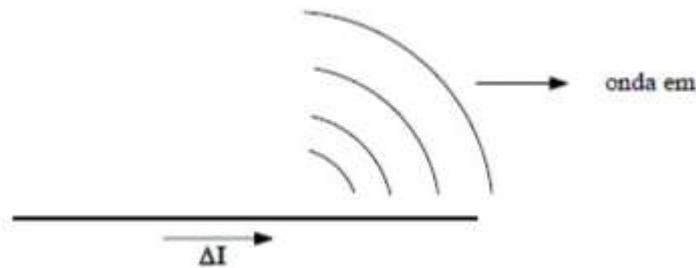
- por ello, es de suma importancia conocer «por dónde circula la corriente»; en ello reside uno de los «secretos» para controlar y reducir las interferencias.
- Dos conductores próximos (por ejemplo, dos conductores de un mismo cable plano o dos pistas que circulan paralelas por una placa) presentan un efecto capacitivo entre ellos: una variación de tensión en uno de ellos es transmitida parcialmente como transitorio al otro conductor.



- La presencia de autoinducciones y capacidades parásitas determina la posibilidad de oscilaciones, generalmente amortiguadas (debido a las componentes resistivas presentes también en el circuito): toda variación brusca de tensión o de intensidad puede provocar la activación del circuito oscilante LC y la generación de un transitorio en forma de senoide.



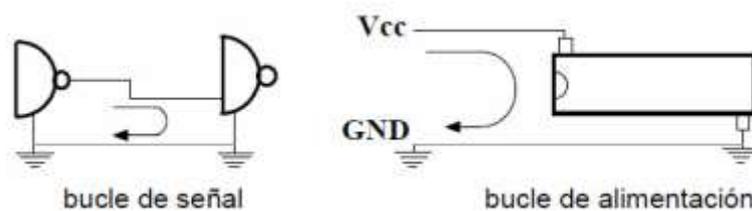
- Cuando una señal variable se propaga por un conductor, parte de la energía que transporta se pierde en forma de radiación electromagnética hacia el entorno; la efectividad de esta transmisión aumenta fuertemente con la frecuencia y depende mucho de la geometría de emisor y receptor. Dicho en otras palabras, cualquier circuito va a comportarse como una antena más o menos efectiva en función de su geometría y de las señales que circulan por el mismo.



Recíprocamente, cualquier línea conductora y, en particular, cualquier bucle de corriente actúa como antena receptora de las ondas electromagnéticas presentes en su entorno y el efecto de tales interferencias es proporcional a la longitud de la línea o, en su caso, al área del bucle.

La radiación electromagnética es la forma en que se transmiten a distancia los efectos de los campos eléctricos y magnéticos variables.

- En un circuito, toda señal eléctrica necesita una línea de retorno; es decir, forma un bucle conformado por dos conductores: el que transmite la señal y el que sirve de referencia, que actúa como línea de retorno.



La representación clásica de la referencia (tensión 0 V: masa) como un simple símbolo aislado (incluso a veces la ausencia de tal referencia explícita) tiende a hacernos olvidar que forma parte del circuito: que no es un simple «sumidero omnipresente» sino una línea de retorno que cierra los bucles:

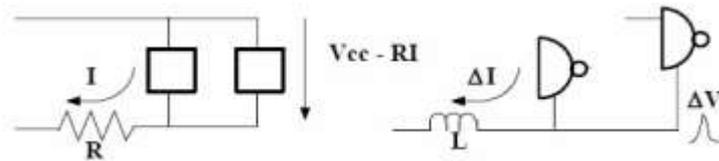
- la tensión de alimentación de un circuito forma bucles de alimentación para cada una de las etapas del mismo.
- cada señal que se transmite de una etapa a otra forma un bucle de señal.
- la existencia de varias «tomadas a tierra» (conexiones de la línea de masa del circuito a tierra) dan lugar a «bucles de masa», que también pueden ser receptores de interferencias.

→ Los efectos de emisión/captación magnética/electromagnética de los bucles serán tanto menores cuanto más reducida sea su área.

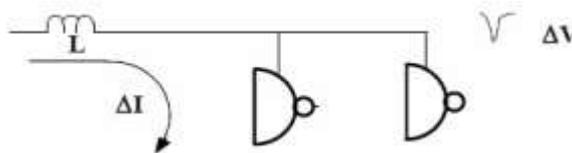
- Toda línea conductora presenta una impedancia (R, L) y, cuando por dicha línea viajan dos señales, es compartida por ambas (IMPEDANCIA COMÚN) y las variaciones de tensión producidas por una de ellas afectan también a la otra.

Téngase en cuenta que, en un circuito real, dos puntos unidos por un conductor no tienen el mismo potencial, como consecuencia de la impedancia existente entre ambos.

La línea de retorno suele ser utilizada, a la vez, por varias alimentaciones y/o señales, lo cual supone la existencia de una impedancia compartida por ellas, de modo que las caídas o variaciones de tensión generadas sobre dicha impedancia afectan a las diversas etapas conectadas a la línea de retorno



De igual forma una línea de alimentación VCC suele estar compartida por múltiples etapas, presentando una impedancia compartida por ellas.



1.4. Magnitudes y señales de perturbación

- **Vista general**

Las magnitudes de perturbación y las señales perturbadoras que derivan de ellas abarcan un amplio rango de frecuencias y amplitudes. Pueden presentar muchos tipos de curva y clasificarse según distintos puntos de vista.

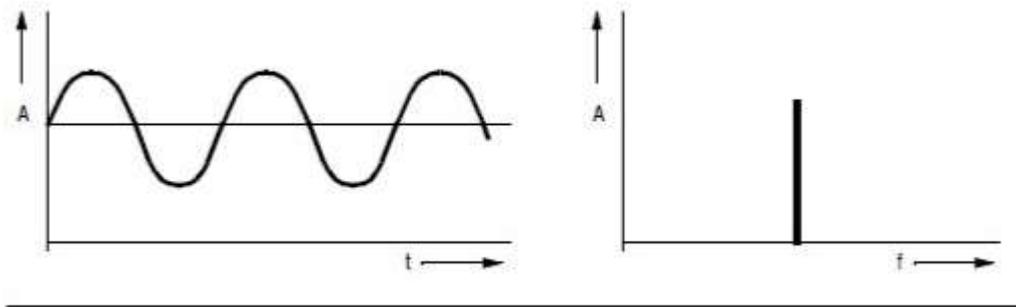
En cuanto a su aparición en el tiempo, distinguimos entre magnitudes de perturbaciones periódicas y no periódicas.

- **Magnitudes de perturbación periódicas**

Las magnitudes de perturbación periódicas son señales sinusoidales. Fuentes de perturbaciones sinusoidales externas son la emisión de radio o televisión y los transmisores-receptores portátiles.

En las instalaciones industriales, las magnitudes de perturbación periódicas proceden de dispositivos de corriente alterna y trifásica, convertidores de corriente, lámparas fluorescentes, fuentes de alimentación y PCs. Generan distorsiones continuas en la tensión de alimentación, fluctuación en el voltaje, saltos de tensión y asimetrías en la alimentación de red trifásica.

Magnitudes de perturbación periódicas:



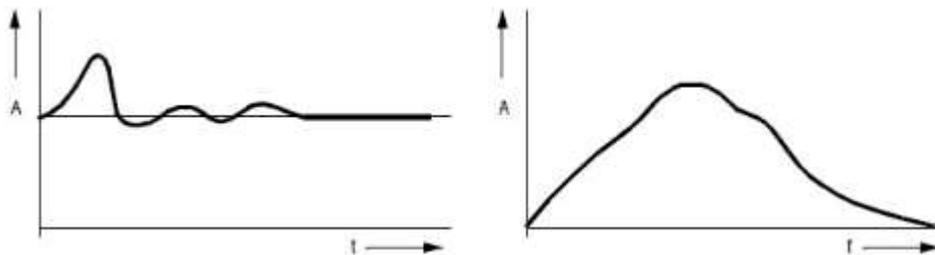
- **Magnitudes de perturbación no periódicas: transitorios**

Las magnitudes de perturbación no periódicas son impulsos parásitos breves (transitorios).

Las propiedades de los transitorios son la rapidez de cambio en la tensión du/dt y la corriente di/dt . En las redes industriales puede aparecer sobretensión de desconexión de hasta 10 kV con un tiempo de incremento en un rango desde nseg. hasta seg. y frecuencias de hasta 100 MHz. Las velocidades de aumento de la tensión de estas temidas ráfagas varían de 2 a 5 kV/ns con una duración de pulso de 100 nseg. a 1 mseg.

Los impulsos transitorios se ven principalmente en los sistemas digitales, ya que pueden perturbar el funcionamiento al establecer o borrar estados de memoria. Los transientes y las ráfagas se deben en la mayoría de los casos a cargas de arco voltaico o funciones de conmutación durante los siguientes procesos:

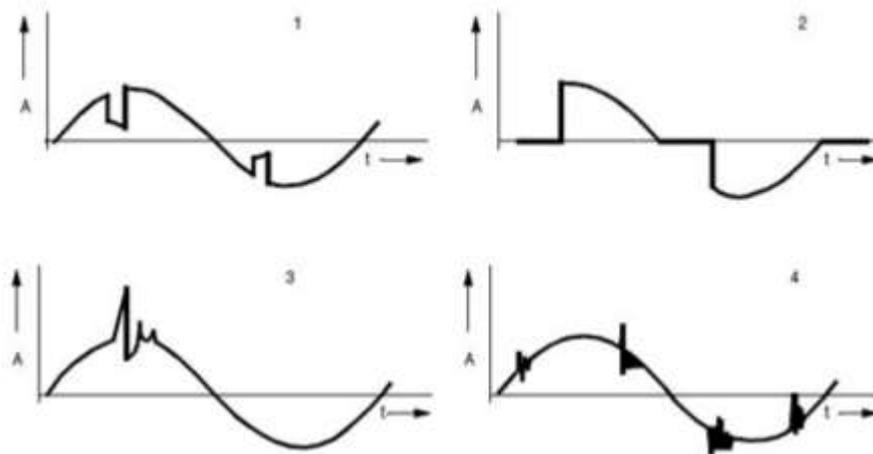
- Procesos habituales de interrupción y conmutación en dispositivos de alta y baja tensión, principalmente a través de contactos mecánicos.
- Cortocircuitos, choques de tensión, descargas de rayos. Magnitudes de perturbación no periódicas



- **Magnitudes no periódicas en la tensión de alimentación**

Las tensiones perturbadoras provocadas por procesos no periódicos en los conductos de la red de alimentación y cables de datos pueden alcanzar el rango de x kV.

Distintas formas de magnitudes de perturbación en redes industriales:



- 1 Interrupciones de conmutación
- 2 Controlador de fase
- 3 Procesos transientes
- 4 Ráfagas

1.4.1. Parámetros perturbadores efectivos

- **Parámetro perturbador**

Los parámetros de magnitudes de perturbación son:

- Tiempo de crecimiento: como medida para la duración de la magnitud de perturbación.
- Velocidad de cambio du/dt , di/dt : como medida para la intensidad de la magnitud de perturbación.
- Pico: como medida para la energía del impulso parásito

- **Causas de las magnitudes efectivas**

Nota: Las magnitudes de perturbación efectivas están causadas exclusivamente por cambios de amplitud de los parámetros eléctricos por unidad de tiempo. La duración de la magnitud de perturbación es idéntica a la duración del cambio en la fuente de perturbaciones.

- **Influencia de la frecuencia**

El espectro de frecuencias de una magnitud perturbadora es importante, ya que la resistencia inductiva y la resistencia capacitiva de un conductor dependen de la frecuencia. Cuanto mayor sea la frecuencia de una magnitud perturbadora, mayor será la señal perturbadora. Las señales perturbadoras de alta frecuencia provocan en la resistencia inductiva de los conductores una caída de la tensión que aparece como una tensión perturbadora. En la capacidad del conductor provocan un flujo de carga que aparece como corriente perturbadora.

- **Espectro de frecuencias de un impulso parásito**

De forma simplificada, podemos considerar un impulso parásito como un impulso rectangular. Se puede calcular como la suma de funciones sinusoidales. Cuanto mayor sea la precisión con que recreemos este impulso (es decir, cuanto mayor sea la pendiente en los flancos del impulso), de mayor frecuencia serán las tensiones necesarias para la recreación.

1.5. Tipos de perturbaciones electromagnéticas.

Perturbaciones de baja frecuencia <<BF>>

Zona de frecuencia: $0 \leq$ Frecuencia \leq 1 a 5 MHz.

Las perturbaciones de baja frecuencia <<BF>> se producen en la instalación principalmente por CONDUCCIÓN (cables...).

Duración: Generalmente prolongada (algunas decenas de ms). En algunos casos, el fenómeno puede ser permanente (armónico).

Energía: La energía conducida puede ser elevada y como resultado los aparatos interconectados funcionan mal o se averían.

$$(Energía) W_{(J)} = U_{(V)} I_{(A)} t_{(seg)}$$

Perturbaciones de alta frecuencia «AF»

Zona de frecuencia: Frecuencia \geq 30 MHz.

Las perturbaciones de alta frecuencia AF >> se producen en la instalación principalmente por RADIACIÓN (aire...).

Duración: Impulsos AF Tiempo de subida del impulso < 10 ns.

El fenómeno puede ser permanente (rectificadores, relojes...).

Energía: Generalmente, la energía radiada es baja y, como resultado, los dispositivos del entorno funcionan mal.

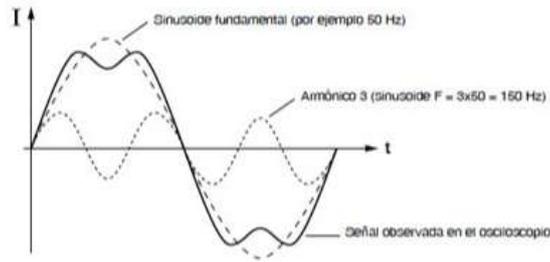
1.5.1. Armónicos

Con independencia de su forma, una señal periódica puede descomponerse matemáticamente en una suma de señales sinusoidales con amplitudes y fases diferentes, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental.

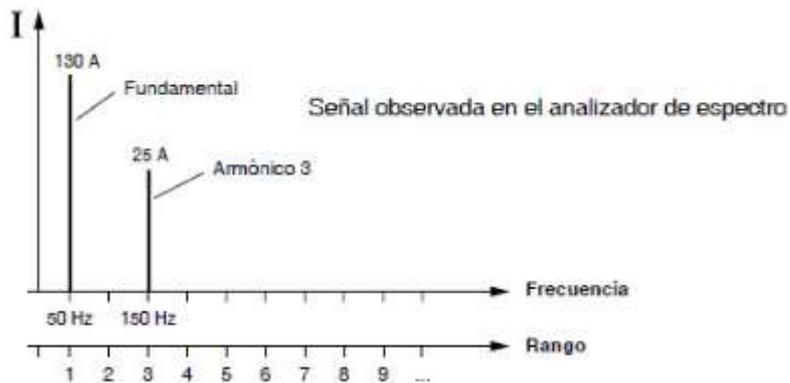
Fundamental: frecuencia más baja y útil de la señal.

Procede de la descomposición de una señal en una serie de FOURIER.

- Representación temporal

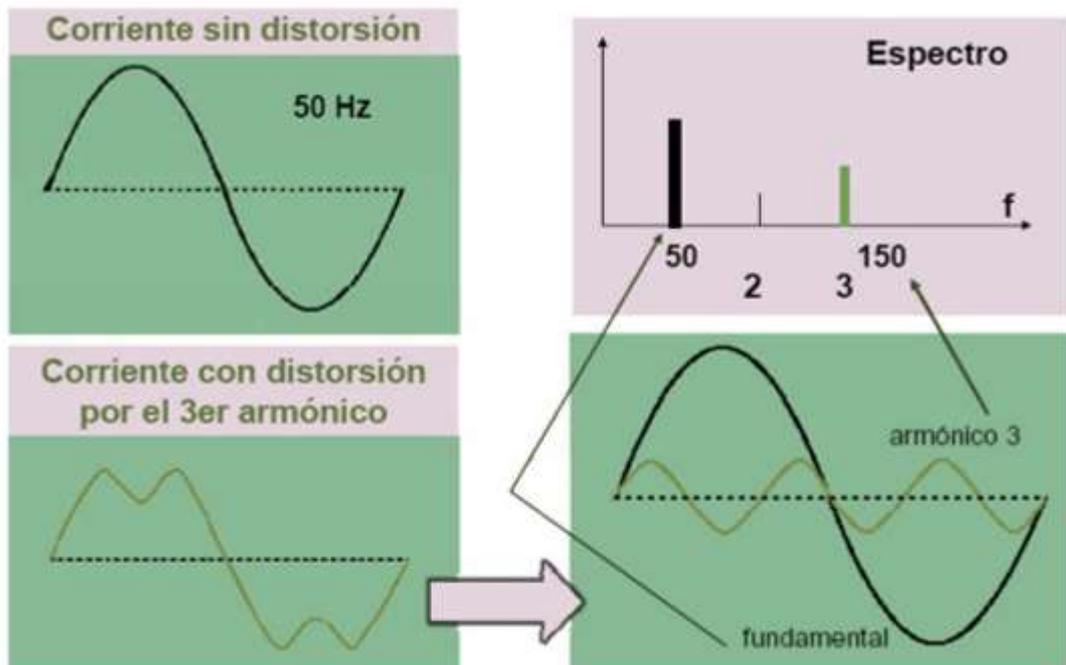


- Representación espectral



Las perturbaciones armónicas son perturbaciones de tipo baja frecuencia «BF» y se transmiten principalmente por «conducción».

Concepto de Armónicos



Generador de Armónicos

Las conmutaciones generan ondas cuadradas o similares, con un gran contenido en armónicos.

Si el ciclo de trabajo es cercano al 50% se emiten gran cantidad de energía concentrada en los armónicos impares.

⇒ Si se modifica su ciclo de trabajo los armónicos impares no concentrarán tanta energía en la misma frecuencia.



Índice de distorsión armónica (IDA)

El índice de distorsión armónica total permite calcular la deformación de una señal cualquiera respecto de la señal sinusoidal fundamental (rango 1).

$$IDA \% = \sqrt{\sum_2^n \left(\frac{A_i}{A_1}\right)^2}$$

A_i = amplitud del armónico de rango
 A_1 = amplitud de la fundamental (rango 1)

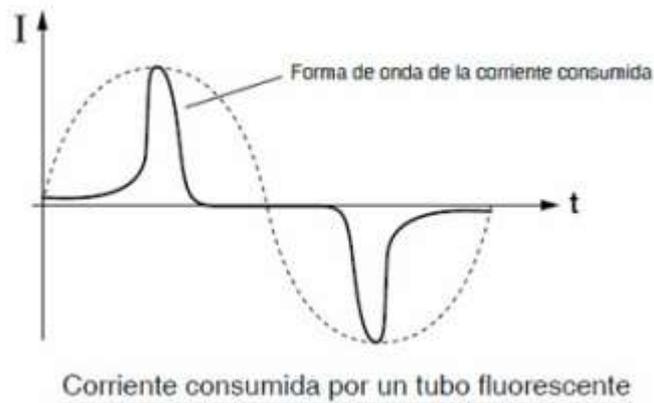
Que puede simplificarse como sigue:

$$IDA \approx \frac{\Sigma \text{Amplitudes de todos los armónicos de rango } > 2}{\text{Amplitud de la fundamental o armónico de rango 1}}$$

El efecto de los armónicos de rango superior a 40 sobre el índice de distorsión armónica es despreciable (pero su efecto sobre las instalaciones no lo es).

Origen

Todas las cargas (receptores) no lineales (alumbrado fluorescente, rectificador...) consumen una corriente no sinusoidal y, por tanto, generan corrientes armónicas.



La fuente de alimentación transforma estas corrientes armónicas en tensiones armónicas por medio de su impedancia «Z» interna.

$$U = ZI$$

Esta tensión armónica conducida por la red es la que genera perturbaciones en otros receptores.

Principales generadores de armónicos

- onduladores, convertidores directos de corriente continua,
- puentes rectificadores: electrolisis, grupos de soldadura, etc,
- hornos de arco,
- hornos de inducción,
- arrancadores electrónicos,
- variadores de velocidad para motores de corriente continua,
- convertidores de frecuencia para motores asíncronos y síncronos,
- electrodomésticos tales como televisores, lámparas de descarga, tubos fluorescentes, etc,
- circuitos magnéticos saturados (transformadores...).

Este tipo de receptores se utilizan cada vez más y la «potencia» que controlan es cada vez más alta, de ahí la importancia creciente de las perturbaciones.

Principales receptores a los que perturban los armónicos

Receptores	Resultado de la perturbación
Motores síncronos:.....	Calentamientos suplementarios.
Transformadores:	Pérdidas y calentamientos suplementarios. Riesgos de saturación si se producen armónicos pares.
Motores asíncronos:.....	Calentamientos suplementarios, principalmente en motores de jaula y especialmente en los de aletas. Pares pulsatorios.
Cables:	Aumento de las pérdidas resistivas y dieléctricas.
Ordenadores:	Problemas de funcionamiento provocados, por ejemplo, por los pares pulsatorios de los motores.
Electrónica de «potencia»:	Problemas relacionados con la forma de la onda: conmutación, sincronización, etc.
Condensadores:	Calentamiento, envejecimiento, resonancia del circuito, etc.
Reguladores, relés, contadores: ...	Mediciones falseadas, funcionamiento intempestivo, pérdida de precisión, etc.

1.5.2. Transitorios

Con el término «perturbaciones transitorias» nos referimos a las sobretensiones por impulsos acopladas en los circuitos eléctricos, que se encuentran en forma conducida en los cables de alimentación y en las entradas de control y señal de los equipos eléctricos o electrónicos.

- **Características de los transitorios normalizados (tipo IEC 1000-4-4)**

Los elementos significativos de estas perturbaciones son:

- El muy bajo tiempo de subida del impulso ≈ 5 ms
- La duración del impulso ≈ 50 ms
- La repetitividad del fenómeno: ráfagas de impulsos durante ≈ 15 ms
- La frecuencia de repetición: sucesión de ráfagas cada ≈ 300 ms
- La muy baja energía de los impulsos $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ Julios
- La muy alta amplitud de la sobretensión $\lesssim 4$ kV

- **Origen**

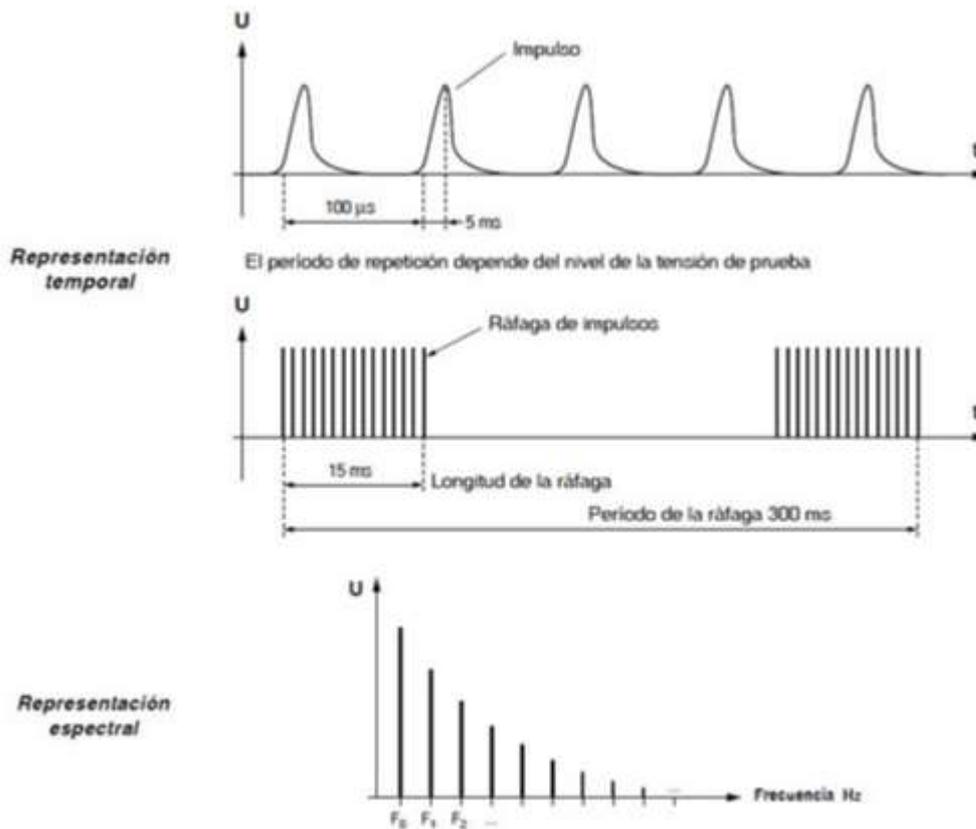
Proceden de la conmutación rápida de los «interruptores» mecánicos y, sobre todo, electrónicos...

Cuando se conmuta un «interruptor», la tensión en sus bornas pasa con mucha rapidez de su valor nominal a cero y viceversa, generando variaciones bruscas y elevadas de la tensión (dv/dt) conducida a través de los cables.

- **Fuentes principales**

- Rayos, fallos de la conexión a tierra, fallos en la conmutación de circuitos inductivos (bobinas de contactores, electroválvulas...).

- Las perturbaciones transitorias son perturbaciones de tipo alta frecuencia «AF». Se transmiten por conducción a través de los cables, pero se acoplan fácilmente a otros cables por radiación.



Según el tipo de la señal transitoria considerada, el espectro puede ser de banda ancha (0... 100 MHz o más).

1.5.3. Descargas electrostáticas «DES»

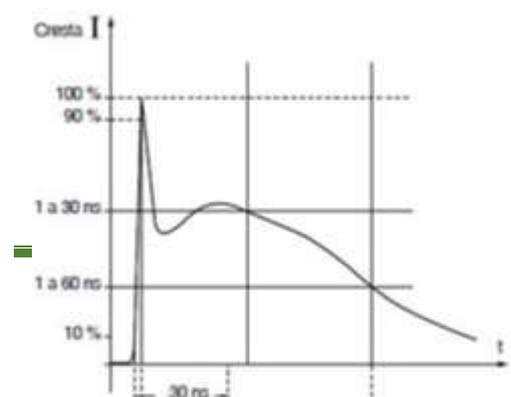
Con el término «descarga electrostática» nos referimos a los impulsos de corriente que recorren un objeto cualquiera cuando este objeto conectado a masa entra en contacto (directo o indirecto) con otro cuyo potencial con respecto a la masa del anterior es elevada.

- Características de las descargas electrostáticas normalizadas (tipo IEC 1000-4-2)

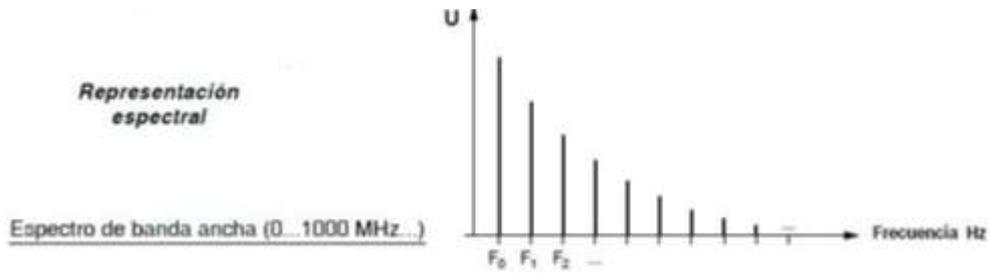
Representación temporal

Los elementos significativos de estas perturbaciones son:

- El muy bajo tiempo de subida del Impulso ≈ 1 ns
- La duración del Impulso ≈ 60 ns
- El carácter aislado del fenómeno: 1 descarga
- La muy alta tensión que origina la descarga (2...15 kV...)



Ejemplo:



- Origen

Las descargas electrostáticas proceden del intercambio de electrones entre los materiales o entre el cuerpo humano y los materiales. La combinación de materiales sintéticos (plásticos, tela...) y un ambiente seco favorece este fenómeno.

Las cargas electrostáticas se generan en los aislantes por rozamiento.

El cuerpo humano puede llegar a cargarse a 35 kV solo caminando por una moqueta en un ambiente seco con un 20% o 30% de humedad.

- Fuentes principales

El fenómeno se produce, por ejemplo, cuando una persona camina sobre suelo de moqueta (intercambio de electrones entre el cuerpo y el tejido), debido al frotamiento de la ropa con la silla en la que está sentado el operario...

Las descargas pueden producirse entre una persona y un objeto o entre dos objetos cargados...



Valores máximos de tensión electrostática con que se pueden cargar los operarios



- Efectos

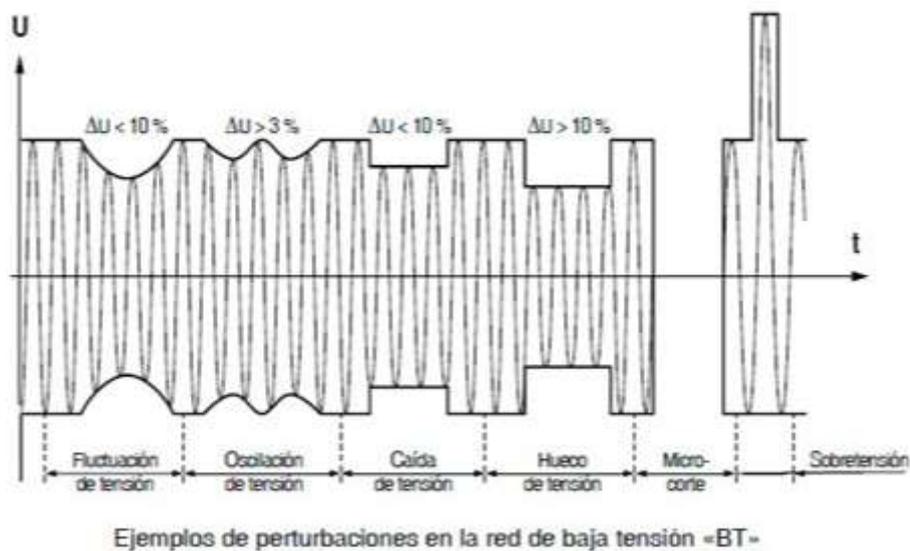
Cuando la tensión electrostática acumulada en un operario se descarga en un dispositivo, éste puede funcionar mal o incluso estropearse. Provocan la ruptura de dieléctricos, fallos sobre los equipos y una posible destrucción a través del efecto "latch-up".

- Las perturbaciones que generan los distintos tipos de descargas electrostáticas son perturbaciones de tipo alta frecuencia «AF» que se producen por conducción, pero se acoplan fácilmente a otros dispositivos por radiación.

1.5.4. Perturbaciones de la red pública de alimentación «BT»

- **Tensión:** variaciones, cortes, caídas, sobretensiones
- **Frecuencia:** variaciones
- **Forma de onda:** armónicos, transitorios, corrientes portadoras
- **Fases:** desequilibrio
- **Potencia:** cortocircuitos, sobrecargas (efectos sobre la tensión)

Principalmente son perturbaciones de tipo baja frecuencia «BF»



1.6. Solapamiento de señales perturbadoras y útiles en los conductores

La estructura de los circuitos eléctricos es decisiva para el modo en que una señal perturbadora solapa la señal útil y la facilidad con que se pueden volver a separar estas dos señales.

Este apartado aclara los conceptos "circuitos simétricos" y "circuitos asimétricos" y las interferencias en modo común y en modo diferencial como principales tipos de solapamiento de las señales perturbadoras y útiles en los circuitos.

Estos principios básicos resultan necesarios para comprender las medidas para compatibilidad electromagnéticas de la simetría de circuitos.

1.6.1. Circuitos de funcionamiento simétrico y asimétrico

▪ Circuitos simétricos

En un circuito de funcionamiento simétrico, los conductores de ida y de vuelta están separados de la masa de referencia. El circuito está conectado a la masa de referencia con un tercer conductor, de modo que un circuito simétrico conforma un sistema de tres conductores. La señal útil fluye por el conductor de ida hasta el equipo y retorna por el conductor de vuelta.

Es posible reducir gran número de interferencias mediante una conexión simétrica, lo que constituye la razón habitual para su utilización. Circuitos simétricos típicos:

- Conexiones en sistemas de medición entre el sensor y el sistema electrónico.
- Conexiones en los sistemas de datos simétricos (RS422 o V.11)
- Conexiones telefónicas entre el participantes y la central de conexión

▪ Circuitos asimétricos

En un circuito asimétrico, el circuito se cierra con la conexión a la masa de referencia. La señal útil fluye al equipo por medio de un conductor de un hilo y vuelve a través de la masa de referencia.

Nota: Entre las conexiones asimétricas encontramos todas las conexiones basadas en cables coaxiales.

▪ Modo común y modo diferencial

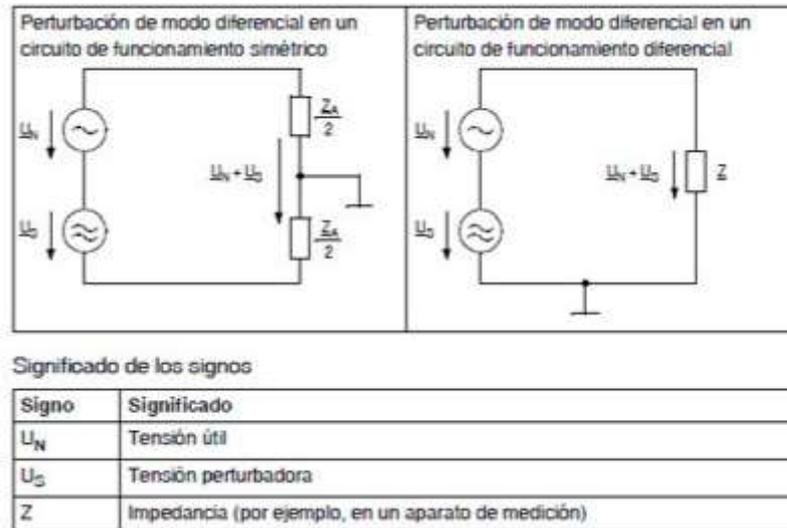
En el modo diferencial, la señal útil se alimenta en el circuito de corriente, es decir, la corriente útil fluye en el conductor de ida y retorna por el de vuelta o masa de referencia.

Las perturbaciones se pueden alimentar como señales de modo diferencial; sin embargo, también pueden hacerlo como señales de modo común. En el caso de las perturbaciones de modo común, la corriente perturbadora fluye en las dos ramas del circuito en la misma dirección y retornan a través de la masa de referencia. Si las conexiones del conductor de referencia no son correctas, la corriente perturbadora causada por la interferencia de modo común también se puede transmitir a otros cables de señal conectados al mismo aparato.

1.6.2. Perturbación de modo diferencial

Las perturbaciones de modo diferencial aparecen cuando una tensión perturbadora sólo se acopla en una rama del circuito. Entonces se produce una diferencia de potencial entre los conductores de ida y vuelta. Las causas se hayan en las corrientes que fluyen en el conductor de ida y vuelta hasta la masa de referencia en sentidos contrarios. El circuito de perturbación se cierra únicamente con una conexión galvánica.

Esquemas de conexiones para circuitos simétricos y asimétricos con perturbaciones de modo diferencial.



Causas

Las perturbaciones de modo diferencial se deben a muy distintas causas y se acoplan de forma inductiva o galvánica:

- Frecuencia de conmutación y sus ondas armónicas.
- Oscilaciones que pueden deberse a capacidades o inductancias de los componentes o de la dirección de la línea (parasitarias).
- Conversión de modo común a modo diferencial en asimetrías no deseadas del circuito

Separación de la señal útil y la señal perturbadora

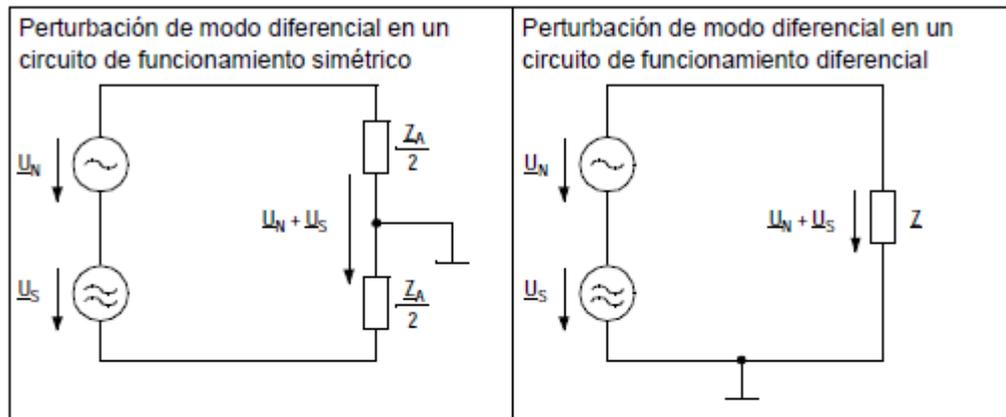
Nota: En las perturbaciones de modo diferencial, no es posible separar la señal útil y la señal perturbadora, tanto del funcionamiento simétrico como en el asimétrico. Por esta razón, se debe impedir las perturbaciones de modo diferencial.

1.6.3. Perturbación de modo común

Definición de perturbación de modo común

Las perturbaciones de modo común aparecen cuando la interferencia se acopla en las dos ramas del circuito. De esta forma aumenta el potencial en el conductor de ida y en el de vuelta. Las corrientes de modo común fluyen en los conductores de conexión en la misma dirección. El circuito se cierra a través de masa de referencia o a través de capacidades no deseadas.

Esquemas de conexiones para un circuito simétrico y otro asimétrico con perturbaciones de modo común.



Significado de los signos

Signo	Significado
U_N	Tensión útil
U_S	Tensión perturbadora
Z	Impedancia (por ejemplo, en un aparato de medición)

Causas

Las perturbaciones de modo común se deben a muy distintas causas y se acoplan de forma inductiva o capacitiva:

- El acoplamiento inductivo se da cuando los campos electromagnéticos se encuentran en el área entre el par de conductores simétricos y la tierra.
- El emisor de un sistema de transmisión envía una señal de modo común a un par de conductores cercanos que se acopla a otro par de conductores como componentes de tensión longitudinal.
- La carcasa del transistor de conmutación se encuentra en potencial de tensión de servicio o en posición cero dependiendo del pulso del oscilador; estos saltos de tensión se acoplan de forma capacitiva al disipador de calor y, de esta forma, a la masa de referencia.

Conversión de modo común a modo diferencial

Normalmente, las perturbaciones aparecen en primer lugar como tensiones longitudinales o de modo común y causan la señal perturbadora de modo diferencial debido a una simetría insuficiente.

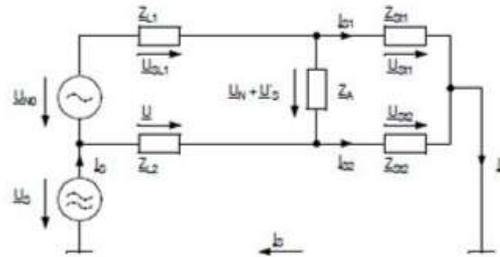
Si las impedancias de los conductores o de las capacidades parásitas son irregulares, se produce una conversión de modo común a modo diferencial. Las relaciones asimétricas crean a continuación un voltaje diferencial que solapa la señal útil.

Tan pronto como aparezca alguna asimetría, se producirá un acoplamiento de la fuente de perturbaciones con la carga útil.

1.6.4. Conversión de modo común a modo diferencial

Si las impedancias de los conductores o de las capacidades de son irregulares, se produce una conversión de modo común a modo diferencial. Las relaciones asimétricas crean a continuación un voltaje diferencial que solapa la señal útil.

Esquema de conexión de la conversión de modo común a modo diferencial a través de impedancias parásitas Z_{St} entre la conmutación y la masa de referencia y a través de distintas impedancias de línea Z_L .



Significado de los signos:

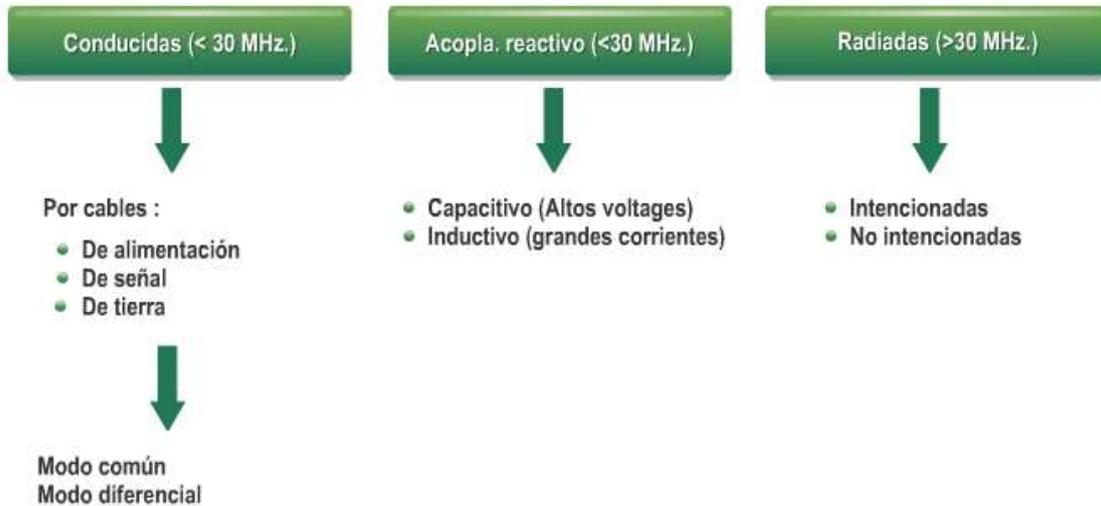
Signo	Significado
U_N	Tensión útil
U_S	Tensión perturbadora en la fuente
U_S'	La tensión útil se solapa con la tensión perturbadora; esta parte se debe a la conversión de modo común a modo diferencial
Z	Impedancia (por ejemplo, en un aparato de medición)
$Z_{L1,2}$	Distintas impedancias de línea en los conductores 1 y 2
$Z_{St1,2}$	Impedancias parásitas
I_S	Corriente perturbadora
$I_{S1,2}$	Corrientes parciales en las dos ramas del circuito

1.7. Mecanismos de propagación de las EMI

Según el medio de propagación que utilice la perturbación o interferencia electromagnética para perjudicar el funcionamiento de un equipo o la calidad de una señal, se puede establecer una clasificación de EMI como EMI conducidas, EMI de acoplamiento capacitivo o inductivo y EMI radiadas.

- Las EMI conducidas se propagan a través de cables ya sean de alimentación, señal o tierra, y su contenido frecuencial nunca superará los 30 MHz..
- Las EMI propagadas por acoplamiento capacitivo se producen por efecto de campo eléctrico. Su principal fuente son los puntos donde haya grandes variaciones de tensión respecto al tiempo.
- Las EMI propagadas por acoplamiento inductivo se producen por efecto de campo magnético. Su principal fuente son los bucles de intensidad que presentan grandes derivadas respecto al tiempo.
- Las EMI radiadas son debidas a la generación de ondas electromagnéticas. Se consideran radiadas y no acopladas cuando la distancia entre fuente y víctima es superior a la mitad de la longitud de onda de la interferencia.

1.7.1. Tipos de propagación de las EMI

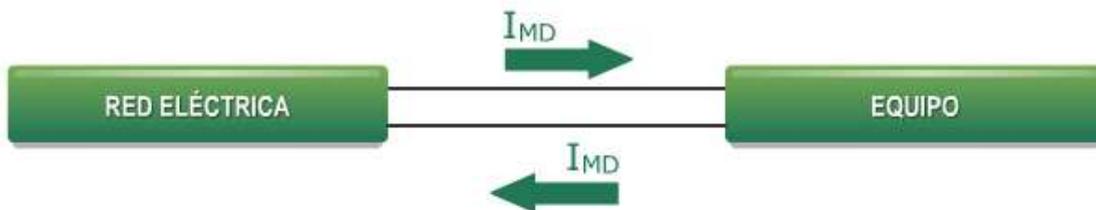


1.7.2. EMI conducidas.

Las EMI conducidas pueden aparecer en modo diferencial (cuando se propagan solo por conductores activos del sistema), o en modo común (son las que se propagan por los conductores activos y la tierra del sistema).

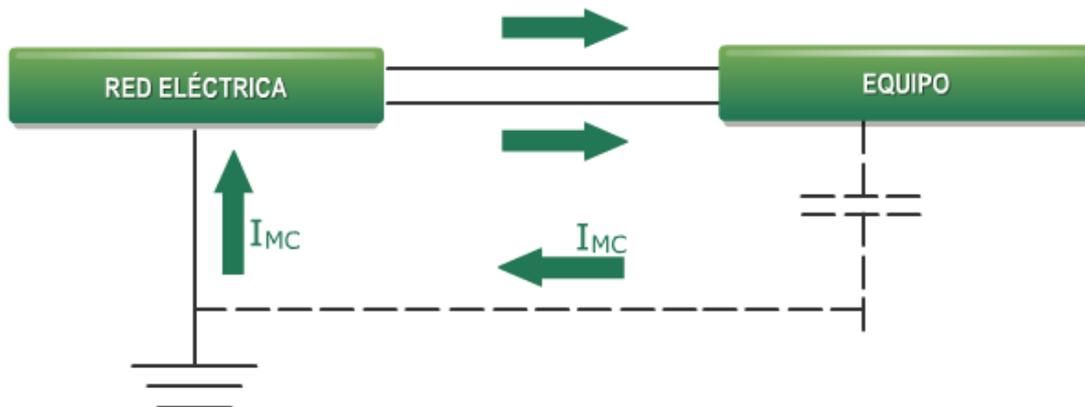
Las interferencias en modo diferencial principalmente son debidas bucles de corriente que presentan grandes di/dt .

EMI en modo diferencial



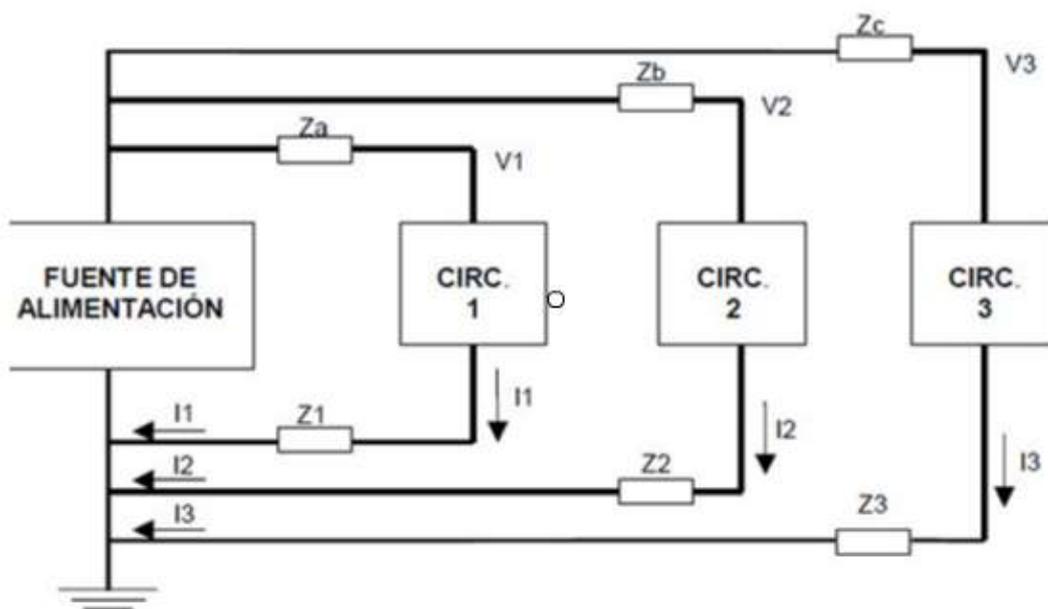
Las interferencias en modo común se propagan principalmente por acoplamientos capacitivos, por lo cual los puntos de interés son aquellos en los que se presentes grandes dv/dt .

EMI en modo común



En la siguiente figura se puede observar a título de ejemplo una forma correcta de conectar diferentes circuitos a una misma fuente de alimentación. De esta forma se evita que las interferencias producidas por un circuito afecten a los demás, ya que no comparten caminos de alimentación.

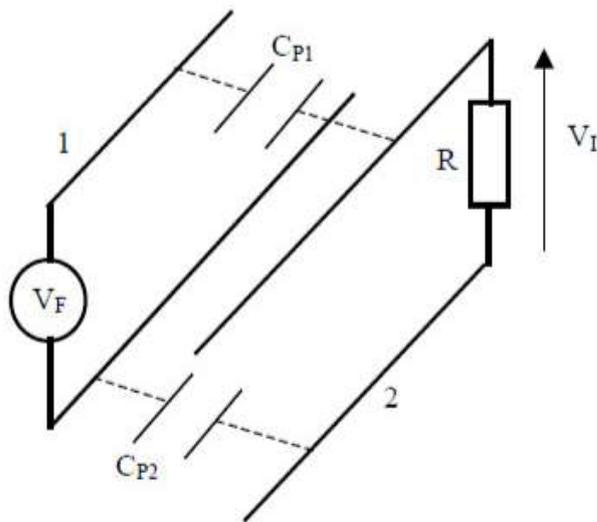
Ejemplo de una buena conexión de diferentes circuitos a una misma alimentación



1.7.3. EMI por acoplamiento capacitivo

Este acoplamiento también se llama diafonía capacitiva. El principio teórico se puede resumir de la siguiente manera:

Si el campo eléctrico generado por una tensión fuente aplicada entre dos conductores atraviesa otro conductor cercano (víctima) se inducirá en él una corriente parasita, la cual podrá provocar a la vez una tensión parasita.



Ejemplo de acoplamiento capacitivo

En la esta figura se puede ver un ejemplo de acoplamiento capacitivo. Si aplicamos una diferencia de potencial V_F al circuito 1 se inducirá una corriente parásita al circuito 2 que se cerrará a través de la resistencia R y las capacidades parásitas entre los conductores 1 y 2 (C_{P1} y C_{P2}).

Aproximadamente el valor de la tensión inducida V_I vendrá dada por la expresión:

$$V_I = R \cdot C_T \cdot \frac{dV_F}{dt}$$

$$\frac{1}{C_T} \approx \frac{1}{C_{P1}} + \frac{1}{C_{P2}}$$

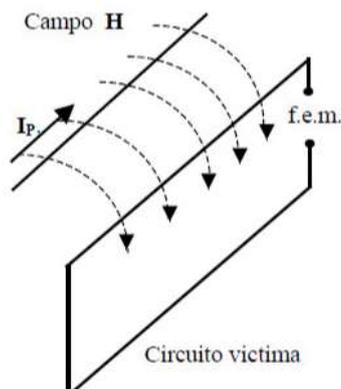
Se observa que la tensión inducida será mayor:

- Cuanto mayor sea la variación respecto al tiempo de V_F , o cuanto mayor sea su frecuencia.
- Cuanto menor sea la distancia entre el conductor fuente y el conductor víctima.
- Cuanto mayor sea la longitud de los dos circuitos enfrentados. Este punto y el anterior se deducen de la fórmula de la capacidad de un condensador plano.

La forma de reducir la diafonía capacitiva es utilizar cables apantallados. Recordamos que el campo eléctrico no atraviesa una pantalla conductora.

1.7.4. EMI por acoplamiento inductivo

También se llama diafonía inductiva. Para que se produzca necesitamos un hilo conductor que lleve una corriente la cual creará un campo magnético y una espira o bucle víctima en la que se generará una f.e.m. perturbadora. El principio teórico es la conocida ley de Faraday.



Ejemplo de diafonía inductiva

En la esta figura se presenta un ejemplo de diafonía inductiva. Según la ley de Faraday la f.e.m. inducida en el bucle víctima es proporcional a la variación respecto al tiempo del flujo de campo magnético que atraviesa lo atraviesa:

$$|E| = \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

Sabemos que el flujo magnético que atraviesa la espira y en consecuencia la f.e.m. será mayor cuanto mayor sea:

- El valor de la corriente I_p .
- El área del bucle víctima.
- Distancia entre el cable perturbador y el bucle.

Por otra parte su derivada temporal será mayor cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente generadora del campo magnético.

Formas de reducir el acoplamiento inductivo:

- Reduciendo el área del bucle víctima y esto se puede conseguir trenzando el cable.
- Poner lo más juntos posibles el cable que lleva la corriente perturbadora y el cable de retorno de esta corriente (la cual irá en sentido contrario). De esta forma se anulara el campo magnético que crea.
- Si el cable perturbador es perpendicular al bucle víctima no habrá Φ_B que atraviese a este último y por lo tanto no se producirá en él perturbación.

1.7.5. Acoplamiento por radiación electromagnética

Los acoplamientos capacitivos e inductivos que hemos visto en las dos secciones anteriores también se llaman de campo cercano y el acoplamiento por radiación electromagnética se denomina de campo lejano. La frontera entre los dos campos es cuando la víctima está a una distancia igual o superior a $\lambda/2\pi$. Siendo λ la longitud de onda de la perturbación. Lo que marca la diferencia es la distancia y la frecuencia.

En campo próximo grandes dV/dt pueden provocar acoplamientos capacitivos y grandes di/dt acoplamientos inductivos y hay que estudiarlos por separado, pero en campo lejano el campo eléctrico y magnético van juntos en forma de radiación electromagnética y hay que estudiarla como tal.

En esta pequeña introducción a la CEM no se entrará en detalle en este tipo de acoplamiento.

En esta figura podemos ver un ejemplo de acoplamiento radiado. A altas frecuencias las interconexiones sirven de antenas para emitir energía radiada.



1.7.6. Medición de las EMI conducidas.

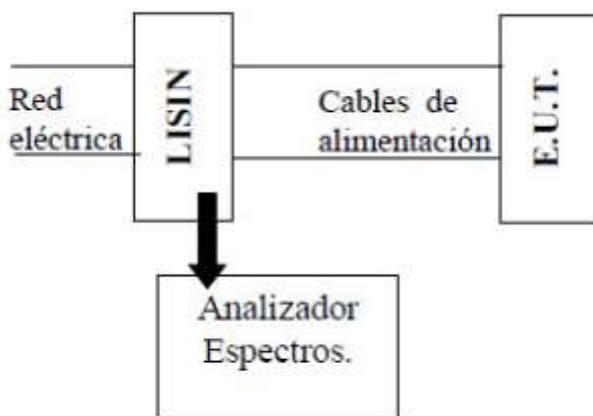
Actualmente los dispositivos electrónicos tienen que cumplir unas normas que dictaminan los límites de las interferencias que pueden generar y de las que deben poder recibir sin dejar de

funcionar correctamente (emisión e inmunidad). En Europa el organismo encargado de dictar estas normas es el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica).

Las normas abarcan los cuatro problemas básicos de la compatibilidad electromagnética:

- Susceptibilidad radiada
- Emisiones radiadas
- Susceptibilidad conducida
- Emisiones conducidas.

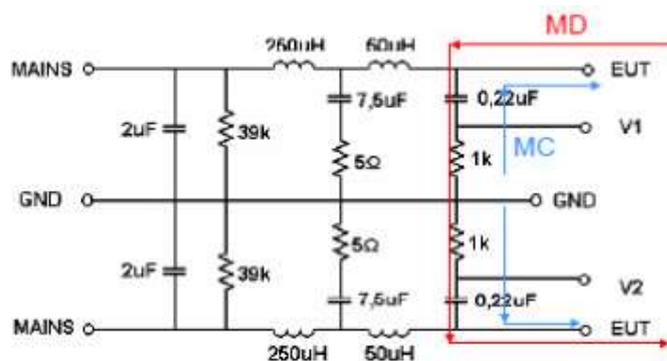
Está claro que hay que medir las perturbaciones, pero ¿CÓMO?. El esquema básico para medir las perturbaciones conducidas se puede ver en la siguiente figura.



- **LISIN** = Red estabilizadora de Impedancia de línea. Sus misiones principales son dos:
 - Proporcionar una impedancia definida en R.F. sobre el punto de medida.
 - Aislar el equipo de pruebas de Interferencias provenientes de la red.
- **E.U.T.** = Es el Equipo bajo test.
- **Analizador de espectros** = Equipo de medida de las perturbaciones.

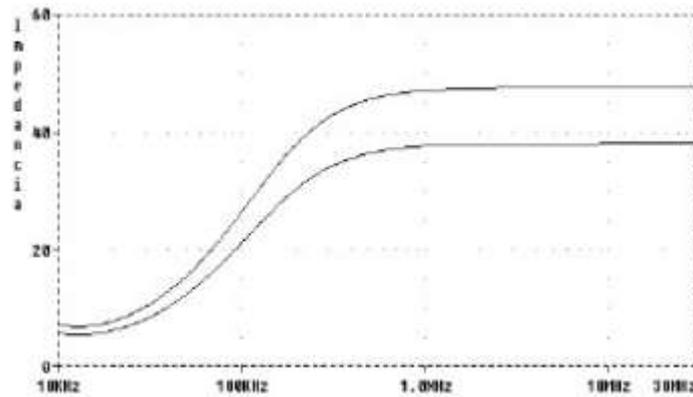
Esquema básico de medida de EMI conducidas

En la siguiente figura se puede observar el esquema de una posible LISIN, podríamos decir que es un filtro pasa bajos en las dos direcciones.



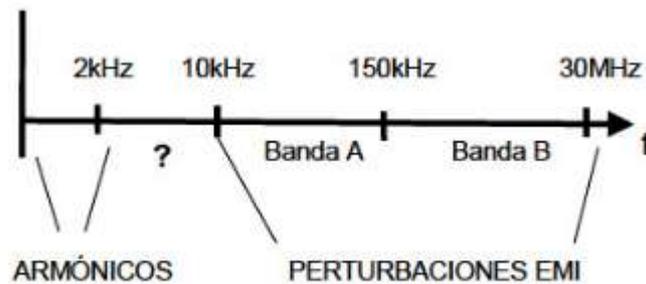
Esquema de una LISIN

Los puntos V1 y V2 de la figura "Esquema básico de medida de EMI conducidas" son los puntos de medida de las perturbaciones. La impedancia de estos puntos es de 50Ω para frecuencias altas, tal como puede verse en la siguiente figura.



Impedancia de la LISIN en función de la frecuencia

Se considera que puede haber perturbaciones conducidas hasta 30 MHz y se clasifican según la siguiente figura.



Clasificación de las perturbaciones conducidas según su frecuencia

1.8. Conclusiones

La Compatibilidad Electromagnética (EMC) estudia los fenómenos de generación, propagación y captación de interferencias electromagnéticas desde dos puntos de vista:

- **Emisión:** interferencias que genera un equipo.
- **Inmunidad:** capacidad de un equipo o sistema para no ser afectado por las interferencias.

La Compatibilidad Electromagnética (CEM) ha tornado gran relevancia en los últimos años, y se ha convertido en una preocupación para fabricantes y diseñadores de todo tipo de equipos eléctricos y electrónicos.

1.8.1. Terminología usada en compatibilidad electromagnética.

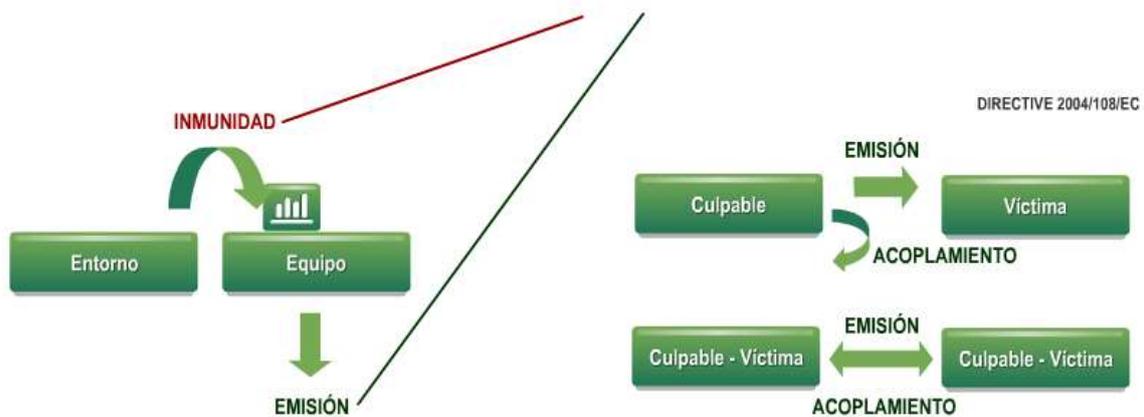
A continuación se definen algunos términos relacionados con la EMC:

- **COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (CEM):** capacidad de un equipo para no generar interferencias electromagnéticas (emisión), o para no ser afectado por las interferencias producidas por otros equipos (inmunidad). También se entiende por CEM el estudio de los fenómenos de generación, propagación y captación de interferencias electromagnéticas.

- **ACOPLAMIENTO:** interrelación de dos o más circuitos cuando se establece una transferencia de energía entre ellos. Cuando este acoplamiento se produce por radiación electromagnética se denomina acoplamiento radiado. Si se produce a través de conductores o componentes, se denomina acoplamiento conducido.
- **INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS (EMI):** son perturbaciones de tipo electromagnético no deseadas, que pueden interferir en el normal funcionamiento de un dispositivo.
- **INMUNIDAD:** capacidad de un equipo para no ser afectado en su función por la presencia de interferencias electromagnéticas.
- **SUSCEPTIBILIDAD:** capacidad de un equipo para modificar su comportamiento cuando se ve influenciado por interferencias electromagnéticas.

1.8.2. Compatibilidad electromagnética

"Compatibilidad electromagnética" significa la capacidad de un equipamiento para **funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas** intolerables a otro equipamiento en ese ambiente.



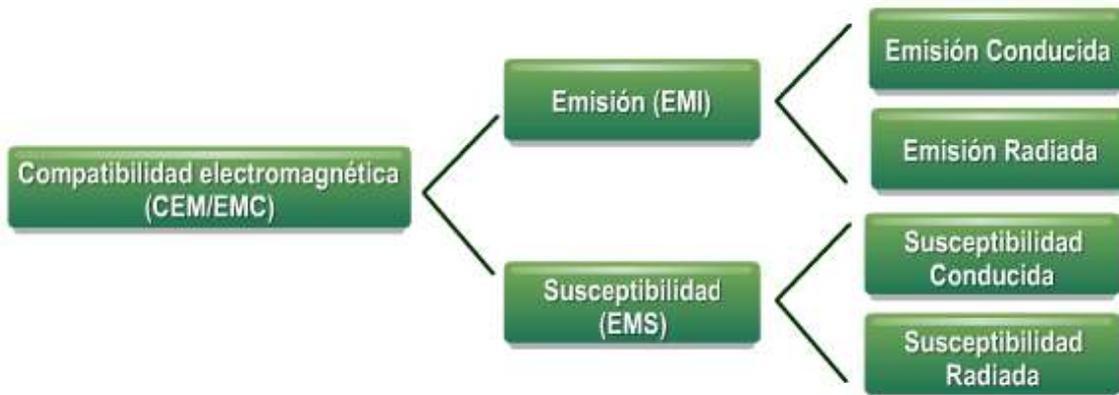
Para que un objeto sea compatible debe satisfacer tres criterios:

- No produce perturbaciones sobre potenciales víctimas.
- No produce perturbaciones sobre sí mismo.
- Es inmune a las emisiones de otros sistemas.

1.8.3. Elementos del fenómeno EMI.

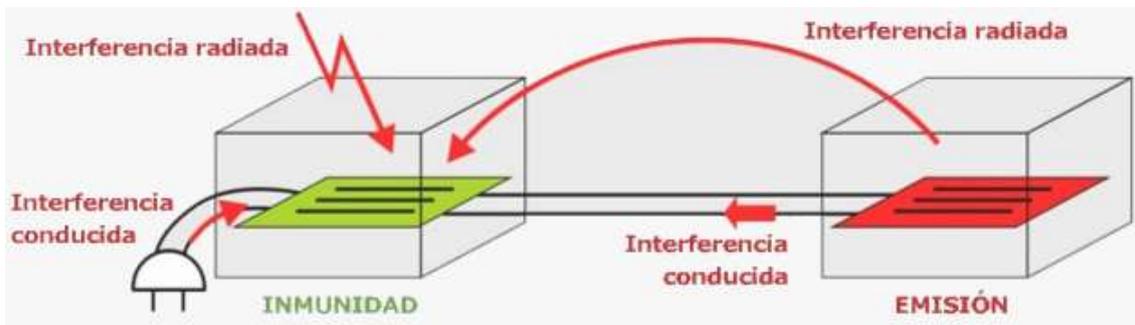


1.8.4. Clasificación de la CEM



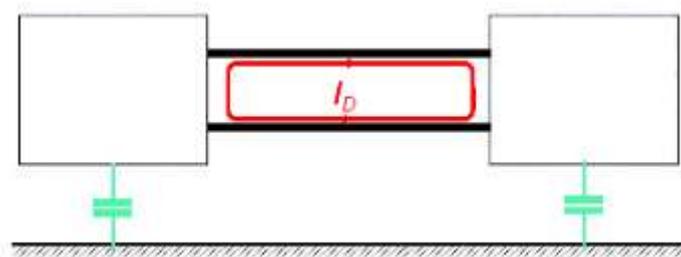
1.8.5. Mecanismos de acoplamiento

- **Conducción.** El acoplamiento se produce a través de señales transportadas por conductores que unen ambos equipos. Existe contacto galvánico. Una posible solución es el filtrado de las señales ofensivas.
- **Radiación.** El acoplamiento se produce a través de campos electromagnéticos. No existe contacto galvánico. La posible solución es el blindaje o apantallamiento de los campos ofensivos.

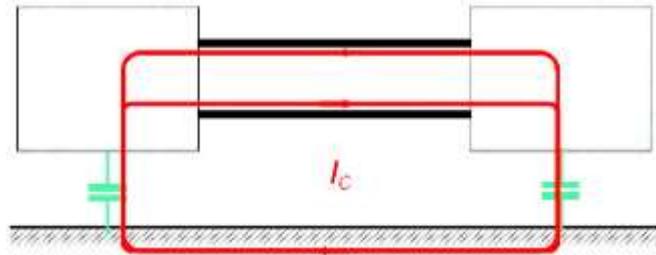


1.8.6. Acoplamiento por conducción

- **En modo diferencial:** En el modo diferencial la corriente I_D fluye en pares de conductores con polaridad opuesta en cada conductor del par. Como los conductores del par se hallan normalmente cercanos, las tensiones inducidas por perturbaciones externas así como los campos radiados en modo diferencial son débiles.



- **En modo común:** En el modo común, las corrientes de interferencia en el par de conductores están en fase, y el retorno se realiza por tierra. Estas corrientes se pueden generar por inducción electromagnética en el lazo formado por el par de conductores y tierra o por fuentes internas a los equipos que interfieren. Las corrientes también pueden dar lugar a radiación de campos de interferencia. Este modo de acoplamiento es habitualmente de mayor intensidad que el modo diferencial.

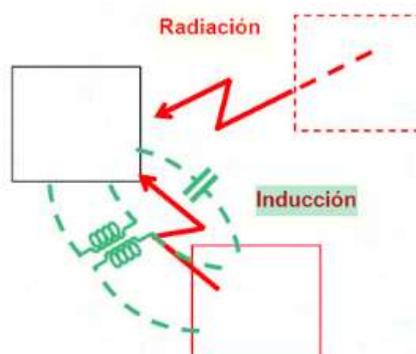


- **Interferencias conducidas:** En interferencias conducidas, la frecuencia de la señal es el factor predominante:
 - Baja frecuencia influencia de los 61000-3-2 armónicos.
 - Alta frecuencia: señales de 150 KHz a 30 MHz



1.8.7. Acoplamiento por radiación

- **Radiación/Inducción:** La interferencia radiada se divide en:
 - interferencia de campos de radiación propiamente dichos, creados por fuentes de energía, que habitualmente transportan energía, habitualmente lejanas de la víctima.
 - Campos de inducción cuasi-estáticos, creados por fuentes cercanas y que se describen mediante modelos de parámetros circuitales parásitos. Los campos perturbadores crean tensiones y corrientes inducidas en el equipo víctima.

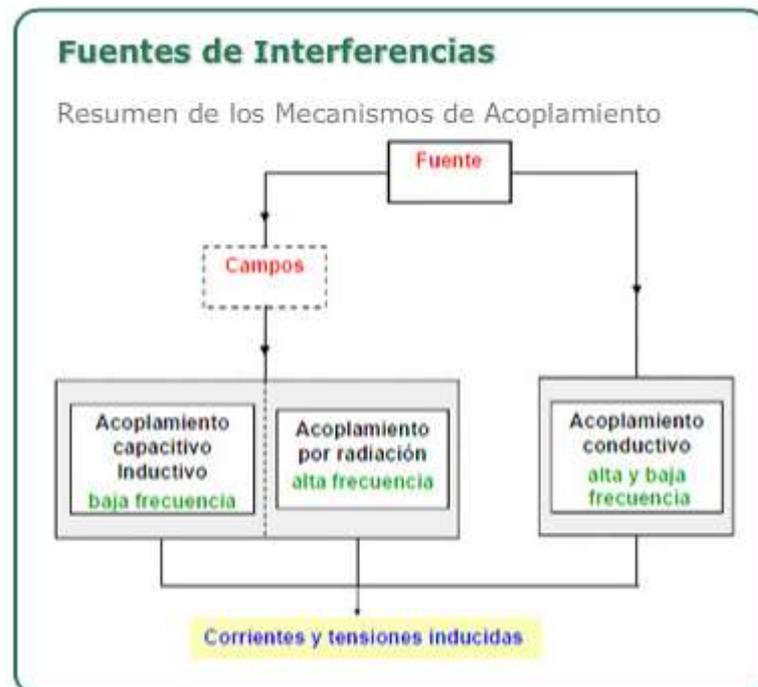


- **Interferencias radiadas:** EN INTERFERENCIAS RADIADAS LA FRECUENCIA DETERMINA EL CAMPO PREDOMINANTE. Las ondas se radian a partir de estructuras radiantes:
 - Cuando son deseadas son antenas.
 - Pueden aparecer antenas ocultas que desconocemos y son las causantes del problema (hay que saber identificarlas).

EL OBJETIVO ES RECONOCER ESTAS ESTRUCTURAS Y MINIMIZARLAS.
DE FRECUENCIAS OBJETIVO 30 A 1 GHz.

1.8.8. Modos de acoplamiento.

- **INTEFERENCIAS CONDUCIDAS:**
 - ENTRADA DIRECTA DE RUIDO: A través de alimentación sucia.
 - IMPEDANCIA COMÚN: Compartir el mismo conductor de retorno varios sistemas.
 - ACOPLAMIENTO INDUCTIVO: Las corrientes crean campos y los campos crean corrientes.
 - ACOPLAMIENTO CAPACITIVO: Superficies paralelas actúan como condensadores, los condensadores tienen menos impedancia a medida que aumenta frecuencia la frecuencia.
- **INTEFERENCIAS RADIADAS:**
 - EFECTO ANTENA - BUCLES Y CABLES: El bucle más grande y que siempre está presente es el bucle de masa.



Un ruido Radiado puede convertirse en Conducido y viceversa.

