

## T3 EL RUIDO EN LOS SISTEMAS DIGITALES

T3.1. El problema del ruido

T3.2. Consideraciones previas al estudio de interferencias

T3.3. Elementos para reducir el efecto del ruido

T3.4. Mecanismos de producción/transmisión de interferencias

T3.5. Reglas básicas para el diseño

*El ruido es un compañero inevitable y molesto de los sistemas digitales, con el que tienen que convivir. La realidad no es nada «limpia»: los circuitos electrónicos han de sobrevivir entre la propia «basura electromagnética» que ellos generan y la basura de los demás, la que se genera en su entorno.*

*Los circuitos electrónicos trabajan con señales eléctricas, que son, por sí mismas, señales electromagnéticas. Por ello, los circuitos son sensibles a cualquier señal electromagnética y, al recibir señales externas, son perturbados por ellas: se ven afectados por interferencias que pueden alterar su buen funcionamiento, causando errores. Además, los propios circuitos producen señales electromagnéticas parásitas: son generadores de interferencias que les afectan a ellos mismos y que afectan también al resto de los circuitos de su entorno.*

*Este capítulo pretende tratar en detalle las causas y efectos del «ruido electromagnético» y las formas de actuar frente al mismo. Como punto de partida se presentan los fenómenos físicos que pueden dar lugar a perturbaciones para llegar a identificar los mecanismos concretos de producción y transmisión de interferencias sobre los circuitos digitales.*

*Desde el conocimiento de sus causas y modos de operar, la defensa frente a las perturbaciones electromagnéticas pasa por un adecuado diseño de las placas circuitales (placas de circuito impreso o similares); esta adecuación del diseño se refiere, por un lado, a la disposición mecánica de componentes y de sus conexiones y, de otro, a la utilización de determinados componentes electrónicos auxiliares que se oponen al ruido.*

*Como norma general, es preciso minimizar la longitud de las conexiones, el área de los bucles y las impedancias compartidas: la disponibilidad de «un plano de masa», de una capa completa del circuito impreso dedicada a la tensión de referencia, facilita plenamente estos objetivos en lo que se refiere a las líneas de retorno, las cuales tienen una importancia primordial respecto al ruido.*

*A la vez, filtros separadores como los condensadores de desacoplo, los optoacopladores o los filtros de red reducen en gran medida la propagación de interferencias y el apantallamiento, en forma de jaula de Faraday, sirve de protección frente a la incidencia de campos electromagnéticos externos.*

*Una útil referencia bibliográfica: como complemento a este capítulo, un libro que recoge una muy amplia diversidad de aspectos relativos al ruido electromagnético es el texto de J. Balcells, F. Daura, R. Esparza y R. Pallás, **Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos**, publicado por Mundo Electrónico. Marcombo Boixareu Editores. Barcelona. 1992.*

### T3.1. El problema del ruido

El problema del «ruido» aparece como consecuencia de que el comportamiento de los circuitos electrónicos no se reduce a los términos de «teoría de circuitos», no queda confinado en el simple análisis circuital resultante del diseño; sino que la realidad física actúa en la forma de «campos electromagnéticos», con una doble incidencia: las ondas y los campos externos presentes en el entorno actúan como interferencias sobre el circuito y, además, su propio funcionamiento produce perturbaciones que también le afectan.

Los circuitos electrónicos procesan energía electromagnética para poder llevar a cabo la función para la que han sido diseñados. El diseñador, habitualmente, maneja el problema teniendo en cuenta tensiones y corrientes en el circuito: *análisis de circuitos*.

Pero las leyes físicas ignoran las fronteras conceptuales que el diseñador impone a su circuito y cualquier energía de tipo electromagnético presente en el entorno interfiere sobre el mismo; además, por causa de esas mismas leyes físicas, los componentes no se comportan de forma ideal (no se limitan a ser los elementos de circuito en los que el diseñador piensa) sino que presentan efectos parásitos. Es preciso un punto de vista más amplio que el propio análisis circuital para entender y controlar los fenómenos que provocan la aparición de interferencias: *presencia de campos electromagnéticos*.

De esta forma los sistemas digitales se encuentran sometidos a interferencias que les llegan desde el medio ambiental en que se encuentran (motores, relés, transformadores, radiofrecuencias, emisiones de los cables de red, deformaciones y perturbaciones de la propia red eléctrica, etc....) y a perturbaciones debidas a los campos electromagnéticos que ellos mismos producen (variaciones de consumo que generan parásitos sobre la alimentación, oscilaciones propias de los circuitos, acoplamiento entre pistas del circuito impreso, radiación de las pistas y cables de interconexión, etc....).

Todas estas señales son indeseables para un sistema electrónico por cuanto pueden afectar a su correcto funcionamiento; en el caso de un sistema digital las interferencias pueden modificar puntualmente los valores booleanos por desplazamiento de las tensiones en los nudos del circuito.

**Ruido** es toda perturbación electromagnética que afecta a un circuito digital, toda señal parásita no propia del comportamiento booleano del circuito y que, por tanto, puede producir errores al modificar los valores booleanos correctos.

El ruido puede proceder del exterior o puede ser producido en el propio circuito y puede ser **conducido**, si se propaga a través de conductores y componentes del mismo circuito o de sus líneas de alimentación, de entrada o de salida, o **radiado**, si se acopla a través de campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos. El ruido conducido puede ser razonado en términos de tensión mientras que el radiado requiere términos de potencia (energía perturbativa por unidad de tiempo).

En circuitos combinatoriales un ruido momentáneo puede causar un error transitorio en el vector de salida, pero no repercutirá posteriormente; en los secuenciales, el efecto es más duradero y por tanto más peligroso: puede dar lugar a una modificación del estado que se propagará como error hacia el futuro, es decir, provocará un error permanente.

## Fuentes de ruido electromagnético

En general, debe tenerse en cuenta que cualquier equipo o circuito eléctrico o electrónico es una fuente potencial de interferencias electromagnéticas **EMI**. Parte de las señales parásitas son producidas por los propios circuitos y afectan a ellos mismos (EMI intraequipo) y también al resto de los circuitos de su entorno (EMI interequipos).

A continuación, se enumeran algunas de las principales fuentes de interferencias; se citan tanto elementos ruidosos como situaciones que llevan aparejadas la aparición de problemas de EMI.

## Interferencias generadas por el propio circuito:

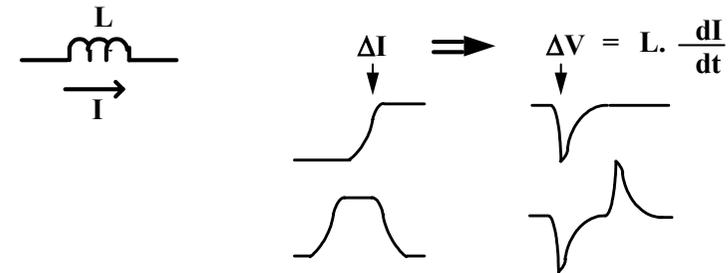
- ◆ **conducidas:**
  - variaciones de intensidad ( $dI/dt$ )
    - por carga y descarga de capacidades
    - por conmutaciones
  - acoplo por impedancia compartida por varias etapas
  - resonancias y oscilaciones asociadas a ellas (LC)
  - acoplo capacitivo entre pistas
- ◆ **radiadas:**
  - osciladores, señal de sincronismo,...
  - emisión de altas frecuencias (acoplamiento electromagnét.)
  - acoplo inductivo entre bucles (espiras)
  - componentes magnéticos (transformadores, bobinas,...)
  - contactos mecánicos (contactores, relés,...)

## Interferencias procedentes del entorno:

- ◆ **radiadas:**
  - motores y máquinas eléctricas
  - equipos electrónicos que operan a alta frecuencia
  - contactores y relés
  - bobinas y transformadores
  - cables, fluorescentes,...
  - emisoras de radiofrecuencia
  - transitorios debidos a fenómenos atmosféricos
- ◆ **conducidas:**
  - perturbaciones de la red
    - por conexión o desconexión de cargas
    - por variaciones bruscas de consumo
    - por conmutación (troceadores) sobre la red
    - por transferencia de altas frecuencias
  - perturbaciones recogidas por las líneas de entrada y salida

## T3.2. Consideraciones previas al estudio de interferencias

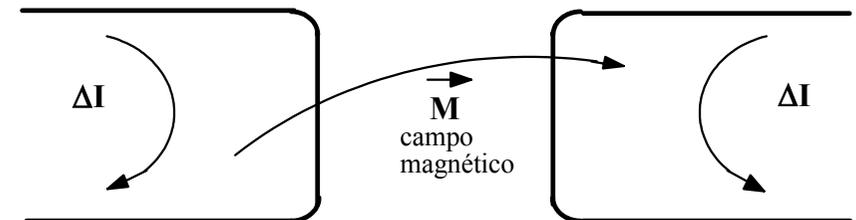
- 1 Las autoinducciones responden con transitorios de tensión a las variaciones de intensidad: todo elemento de naturaleza inductiva responde, ante los cambios de intensidad, con alteraciones de tensión.



- 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  $\Delta I$  reducidas pero muy rápidas pueden producir  $\Delta V$  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).

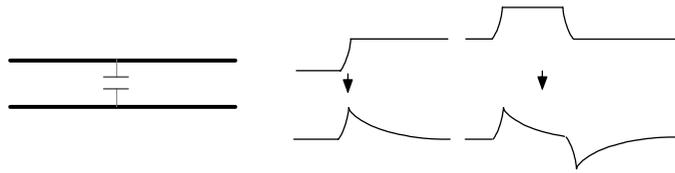
- 2 Los bucles de intensidad (*espiras*) generan campos magnéticos y cuando tales campos son variables (debidos a variaciones de intensidad) producen corrientes inducidas sobre otros bucles (*espiras*) próximos. El acoplo inductivo es proporcional al área de los bucles.



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.

- 3 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.



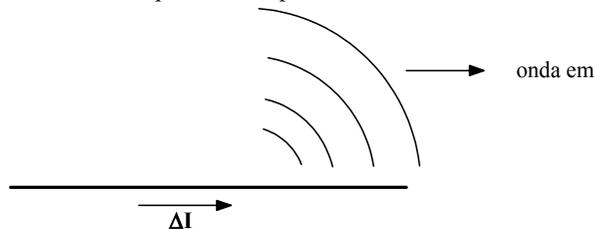
- 4 La presencia de autoinducciones y capacidades parásitas determina la posibilidad de oscilaciones, generalmente amortiguadas (debido a las componentes resistivas presentes también en el circuito): toda variación brusca de tensión o de intensidad puede provocar la activación del circuito oscilante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



Frecuencia de oscilación:

$$f = 1 / 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

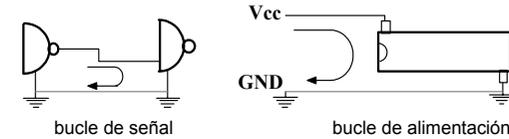
- 5 Cuando una señal variable se propaga por un conductor, parte de la energía que transporta se pierde en forma de radiación electromagnética hacia el entorno; la efectividad de esta transmisión aumenta fuertemente con la frecuencia y depende mucho de la geometría de emisor y receptor. Dicho en otras 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.

- 6 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:

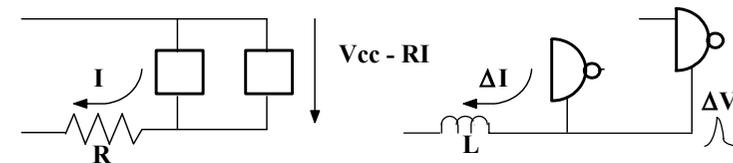
- la tensión de alimentación de un circuito forma bucles de alimentación para cada una de las etapas del mismo
- cada señal que se transmite de una etapa a otra forma un bucle de señal
- la existencia de varias «tomadas a tierra» (conexiones de la línea de *masa* del circuito a tierra) dan lugar a «bucles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

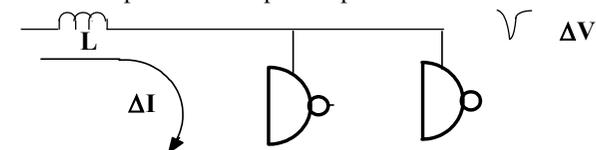
- 7 Toda línea conductora presenta una impedancia (R, L) y, cuando por dicha línea viajan dos señales, es compartida por ambas (IMPEDANCIA COMÚN) y las variaciones de tensión producidas por una de ellas afectan también a la otra.

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.



### T3.3. Elementos para reducir el efecto del ruido

#### Conexiones cortas y bucles de área mínima; plano de masa

La primera norma frente al ruido es minimizar la longitud de los cables o líneas de conexión y el área de los bucles que conforman; la reducción de la longitud de las conexiones (en cuanto a antenas) y del área de los bucles (en cuanto a espiras) afecta tanto a la generación como a la captación de ruido electromagnético. La geometría final del circuito electrónico tiene una incidencia trascendental respecto al ruido: longitudes cortas y áreas reducidas emiten y captan menos interferencias.

De ahí la extraordinaria importancia que presenta el diseño de la placa de circuito impreso en relación con el ruido. Los circuitos impresos no son un mero soporte mecánico y un simple conexionado eléctrico, sino que determinan la topología del circuito y, con ella, los acoplamientos de las perturbaciones: un buen diseño geométrico del circuito impreso es fundamental para prevenirlas.

Particular atención merece la distribución de la tensión de alimentación y la de la señal de reloj, por cuanto que tales líneas suelen ir a múltiples integrados y, en general, serán las que mayor trayecto recorren.

La «masa» o referencia de tensión (0 V) actúa como camino de retorno tanto para la alimentación como para las señales y precisa de un tratamiento especial ya que las líneas de retorno cierran los bucles, siendo determinantes en la conformación de su área; además, suelen ser líneas compartidas por varias señales con los consiguientes efectos de «impedancia común» a ellas.

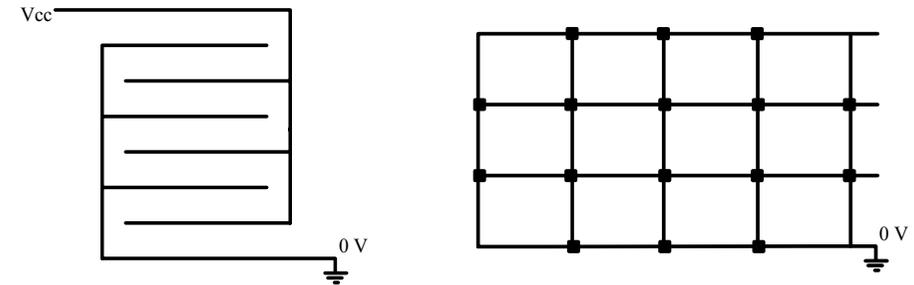
Siempre que sea posible conviene dedicar toda una capa de circuito impreso a la tensión de referencia, es decir, un «plano de masa» que permitirá que los «caminos de retorno» sean lo más directos posibles; de esta forma, el retorno se producirá por el camino de menor impedancia:

- lo cual minimiza la impedancia común a varias señales;
- en el caso de señales de baja frecuencia el camino de mínima impedancia será el de menor resistencia y, por tanto, menor longitud (una línea recta directa);
- mientras que para señales de alta frecuencia dicho camino será el de menor autoinducción que corresponde a mínima área de bucle (camino de retorno siguiendo en paralelo y lo más próximo posible al camino de ida de la señal).

Si no se puede disponer de una capa entera para la tensión de referencia, conviene expandir la masa todo lo posible, aprovechando los huecos libres de pistas del circuito impreso para generar amplios islotes de masa. En general, a falta de un plano de masa, un circuito impreso que presenta amplias zonas «sin cobre» es una mala solución por desaprovechar la oportunidad de utilizar como «islotes de masa» dichos espacios

En todo caso, debe cuidarse que las líneas de masa sean lo más directas y cortas posibles y, también, que los bucles que se forman a través de dichas líneas (como caminos de retorno) sean de la menor área posible:

- distribuciones en forma de «peine» facilitan la reducción de longitud
- y la conexión de las diversas pistas de masa en forma de retícula posibilitan caminos de retorno de área reducida.

Distribución de las líneas de alimentación *en peine*Distribución de las líneas de masa *en retícula*

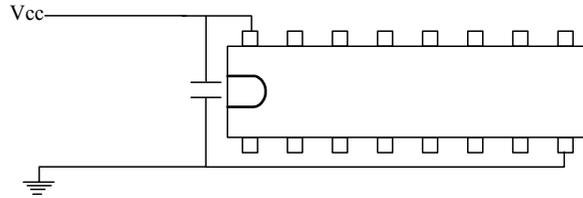
La distribución de la tensión de alimentación «en peine» minimiza la longitud de las líneas que van a múltiples circuitos integrados. Además, dado que la tensión de referencia conforma los caminos de retorno de las señales, es conveniente unir las líneas paralelas de «masa» para formar una retícula (*mallado de masa*) que permita a los caminos de retorno acercarse lo más posible a los caminos de ida de las señales; se esta forma se consiguen áreas de bucle reducidas, en relación con las señales de alta frecuencia.

Asimismo, es conveniente separar las líneas de alimentación de las partes digitales, analógicas y de potencia: para evitar los efectos de impedancia compartida es bueno que, caso de existir en la misma placa de circuito impreso etapas analógicas o de potencia, sus líneas de alimentación sean diferentes de la alimentación de la parte digital; ello evita transferir caídas resistivas o variaciones inductivas en las líneas de alimentación desde la parte analógica o de potencia a la parte digital.

#### Condensadores de desacoplo sobre la tensión de alimentación

Los condensadores de desacoplo se conectan en paralelo sobre las líneas de alimentación ( $V_{cc} - 0 V$ ) para formar filtros pasa-baja que reducen fuertemente la posibilidad de que la tensión de alimentación sea afectada por perturbaciones de alta frecuencia. Se utiliza un condensador de desacoplo (del orden de 10 nF) para cada circuito integrado, situado lo más cerca posible de los terminales de alimentación del mismo.

Los condensadores de desacoplo no deben ser electrolíticos ya que éstos son deficientes a altas frecuencias (los de aluminio, por encima de los 25 KHz y los de tantalito por los 100 KHz) por presentar un efecto inductivo en serie; deben utilizarse condensadores cerámicos o de poliéster (no de mylar).



Los efectos «antirruído» de un condensador de desacoplo son los siguientes:

- suministra los rápidos «picos de intensidad» que el circuito integrado precisa en las conmutaciones, evitando que tales variaciones de intensidad actúen sobre la autoinducción que presentan las líneas de alimentación y se reflejen en perturbaciones de la tensión de alimentación; tales perturbaciones afectarían al propio circuito integrado que las provoca y, también, al resto de los circuitos integrados conectados a las mismas líneas de alimentación;
- configura un filtro pasa-baja (constituido por la impedancia resistivo-inductiva de las líneas de alimentación y el condensador de desacoplo) que reduce las perturbaciones de alta frecuencia que pudieran llegar al circuito integrado a través de la tensión de alimentación (el filtrado pasa-baja actúa en ambas direcciones: también filtra el paso de perturbaciones del circuito integrado hacia el exterior);
- desacopla los efectos capacitivos propios del circuito integrado respecto de las autoinducciones que presentan las líneas de alimentación, evitando las oscilaciones de alta frecuencia que se podrían producir por acoplo LC;
- divide en dos el bucle que conforman las líneas de alimentación (ya que el condensador actúa como cortocircuito para frecuencias altas) y consigue que el bucle de alimentación en la parte del circuito integrado sea de área mínima (por hallarse el condensador muy próximo a los terminales del integrado).

En relación con el ruido que el propio circuito integrado produce al conmutar, ha de tenerse en cuenta que el «pico de intensidad» que se genera en la conmutación se debe a dos causas que se suman:

- la carga y descarga de las capacidades efectivas al cambiar su tensión (para pasar de un valor booleano a otro)
- y la conducción simultánea de los dos planos de transistores al iniciar la conducción de uno de ellos dentro del transistor hacia corte del otro.

Los condensadores de desacoplo suministran ambos «picos de intensidad», evitando que repercutan sobre las líneas de alimentación.

Por otra parte, el ruido debido a la conmutación es tanto mayor cuanto lo es la rapidez de la misma: flancos muy verticales producen más ruido que flancos suaves, ya que el efecto inductivo de las variaciones de intensidad aumenta con  $dI/dt$ . En las salidas de dispositivos programables complejos o de circuitos integrados de aplicación específica suele existir la posibilidad de optar entre flancos más o menos rápidos: es muy adecuado optar por flancos suaves para aquellas señales que no precisan muy alta velocidad.

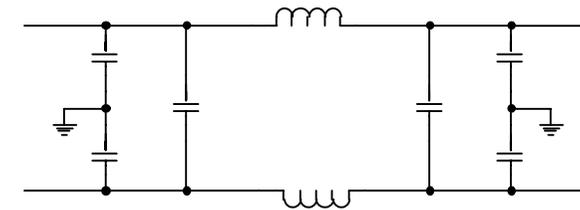
Además del condensador de desacoplo de cada circuito integrado suele incluirse un par de condensadores de desacoplo (uno electrolítico del orden de  $100\ \mu\text{F}$  y otro no electrolítico de unos  $100\ \text{nF}$ ) en la entrada de la tensión de alimentación de la placa de circuito impreso (o en la salida de la propia fuente de alimentación si se encuentra en la misma placa). Estos condensadores presentan, en relación con la placa circuital global, los mismos efectos antes comentados (desacoplo de variaciones de intensidad, filtrado en ambos sentidos, eliminación de oscilaciones parásitas y división del bucle de alimentación en dos). El condensador electrolítico, por su mayor capacidad puede suministrar mayores intensidades y asegura un mayor filtrado pero solamente para frecuencias no muy altas, mientras que el otro condensador en paralelo actúa en relación con las frecuencias altas.

### Filtros de red para desacoplar la red de suministro eléctrico

Los sistemas digitales conectados a la red de tensión eléctrica (como fuente de energía para su tensión de alimentación) pueden recibir, a través de la misma, perturbaciones electromagnéticas producidas por otros sistemas eléctricos y pueden también transmitir a la red perturbaciones generadas por ellos. Este segundo aspecto (la inserción de perturbaciones sobre la red) resulta, en ocasiones, el más importante, puesto que las normas de compatibilidad electromagnética limitan fuertemente las interferencias que un sistema puede comunicar a la red eléctrica.

Los filtros de red son de tipo pasa-baja y ejercen su efecto en ambas direcciones, limitando el paso de perturbaciones de alta frecuencia tanto de la red hacia el sistema digital como desde dicho sistema hacia la red.

Suelen ser filtros de tercer orden en  $\pi$  (condensador – bobina – condensador), duplicados para filtrar las dos líneas de la red eléctrica, con las dos bobinas enrolladas sobre un mismo núcleo circular de ferrita para evitar su saturación por la propia intensidad que consume el sistema.



*Apantallamientos: carcasa y cables*

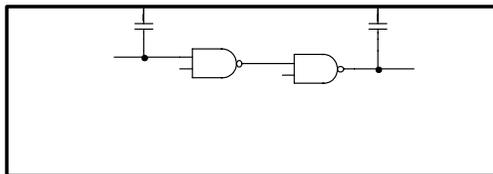
Las perturbaciones presentes en el entorno inciden sobre un sistema digital en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio (no precisan ni siquiera de un medio material para transmitirse).

Las cajas o carcasas metálicas suponen una barrera que impide en gran medida el paso de tales ondas. Los materiales conductores reflejan parcialmente las ondas electromagnéticas, reduciendo su energía; los materiales ferromagnéticos las atenúan, disipando la energía electromagnética. La combinación de ambos materiales, conductor por fuera de la caja y ferromagnético por dentro, consigue un excelente aislante en relación con los campos electromagnéticos.

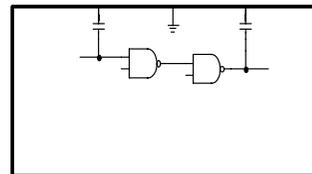
Importa en este caso que la carcasa conforme un recinto cerrado sin fisuras, con conexión completa de la tapa de la misma respecto al resto, para lo cual existen juntas conductoras que facilitan un cierre total. Asimismo importa minimizar las aberturas de la carcasa (necesarias para cables de alimentación y entradas y salidas); como dichas aberturas se encuentran con un frente de onda bidimensional, resulta óptimo que una de las dos dimensiones sea lo más reducida posible.

La carcasa que apantalla a un circuito digital debe ir conectada a la tensión de referencia del mismo (*masa*) para evitar que los posibles acoplos capacitivos que se produzcan entre circuito y carcasa den lugar a peligrosas realimentaciones positivas:

- las líneas del circuito presentan un pequeño acoplo capacitivo con la carcasa metálica
- un amplificador no inversor adquiere una realimentación positiva a través de dichas capacidades: salida del amplificador – carcasa y carcasa – entrada del amplificador
- las propias puertas booleanas (en caso de ser inversoras, las parejas de puertas sucesivas) son etapas amplificadoras
- una realimentación positiva es pernicioso para el ruido, ya que lo amplifica en gran medida.



Amplificador no inversor (formado por dos puertas inversoras sucesivas) con realimentación positiva (a través de los efectos capacitivos con la carcasa)



La realimentación positiva se anula al conectar la carcasa a "masa" (0 V)

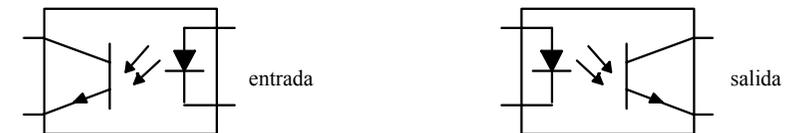
La forma de eliminar el efecto de realimentación de las capacidades parásitas que se forman con la carcasa es conectar la carcasa a una tensión fija, por ejemplo a la tensión de referencia del circuito; de esta forma tales capacidades quedan conectadas a 0 V y no forman lazo de realimentación. La conexión carcasa – masa no suele ser directa (mediante un simple cable) sino a través de un condensador (no electrolítico, de valor alto cercano a 1µF); tal conexión debe hacerse en un solo punto para evitar la formación de bucles.

Una vez apantallado un circuito digital, los cables que conectan sus entradas y salidas exteriores pueden actuar como antenas efectivas: pueden recoger perturbaciones electromagnéticas del entorno y conducirlas directamente dentro de la carcasa. Por ello, es necesario plantearse el tipo de cables a utilizar y el apantallamiento de los mismos; existen muchas soluciones en cuanto a blindaje de cables: malla trenzada, laminado recto (en forma de tubo), laminado en espiral, combinaciones laminado y trenzado,...

En caso de cables conectados a equipos que manejan señales de altas frecuencias (como, por ejemplo, los conectados a monitores, pantallas de TV,...) suelen utilizarse abrazaderas de ferrita sobre los propios cables, en el extremo de conexión con tales equipos, para formar una barrera energética que rechaza la transmisión de las componentes de alta frecuencia.

*Optoacopladores para las entradas y salidas*

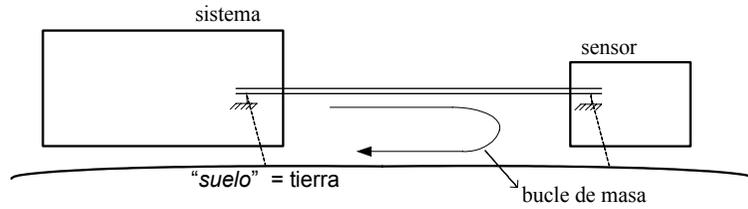
Un optoacoplador está formado por un diodo emisor de radiación luminosa y un fototransistor que detecta dicha radiación. El diodo emisor traduce los valores booleanos 0/1 a situaciones de ausencia/emisión de radiación y de esta forma comunica dichos valores al fotodetector, con separación galvánica entre ambos (emisor y receptor no tienen conexión eléctrica entre ellos).



Los optoacopladores se sitúan en las entradas y salidas de los circuitos digitales hacia el exterior para conformar una separación galvánica respecto de las líneas que conectan el circuito integrado con el entorno exterior al mismo.

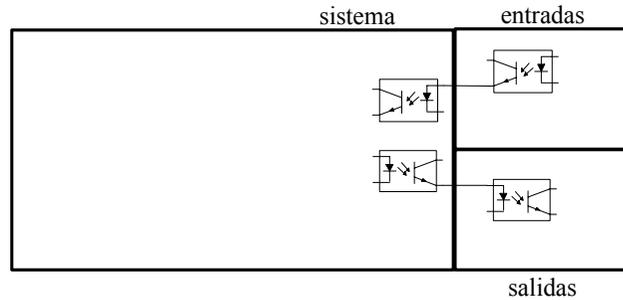
Los efectos de un optoacoplador son los siguientes:

- introduce una ruptura en la continuidad eléctrica de los dos conductores que corresponden a una línea de entrada o de salida exterior; tanto la conexión que transmite la señal como la de retorno quedan interrumpidas y se evita su efecto como antenas de captación de interferencias;
- configura un fuerte filtro pasa-baja frente a las perturbaciones, pues no es posible el paso de interferencias desde el fotodetector al emisor de radiación (pues no hay conexión alguna en tal sentido) y el paso desde el emisor hacia el fototransistor presenta un alto escalón energético;
- divide en dos el bucle que conforma la línea de entrada o salida y consigue que dicho bucle sea de área mínima en la parte que afecta al sistema digital;
- rompe el posible «bucle de tierra» que puede formarse por la línea de masa si está conectada a tierra en más de un punto (dicho bucle se forma entre la línea de masa y la tierra como línea de retorno y puede contener un área muy amplia, ver figura siguiente).



En situaciones de muy alto ruido ambiental puede ser necesario someter a las entradas y salidas digitales a una doble separación galvánica en la forma siguiente:

- transferir todas las líneas de salida y todos los dispositivos de control de potencia (adaptadores de todo tipo: *drivers*, tiristores, triacs, etc....) a una segunda carcasa adjunta a la del sistema digital, en la cual se aplique un segundo acoplo optoelectrónico
- de igual forma, recibir todas las líneas de entrada a través de una tercera carcasa adjunta, en la que se efectúe también un acoplo optoelectrónico adicional
- las fuentes de alimentación de ambas carcasas anexas deben ser diferentes de la alimentación del sistema digital (ubicado en la carcasa principal), a fin de asegurar una efectiva separación galvánica.



Es bueno, también, que las salidas que van a manejar potencia de la red eléctrica lo hagan a través de triacs con disparo en cruce por cero de la red, a fin de que la conmutación de potencia sea lo más suave posible.

El acoplo optoelectrónico de señales analógicas presenta mayor problema pues se requieren acopladores de extraordinaria precisión para asegurar que los valores de tensión en su salida coincidan con los de su entrada; dicha precisión entraña una dificultad y un coste considerables, lo cual hace que en muchas ocasiones se utilice un simple filtrado en frecuencia que, sin afectar a la señal analógica a transmitir, elimine las perturbaciones de alta frecuencia.

**T3.4. Mecanismos de producción/transmisión de interferencias**

**A CONDUCCIÓN DIRECTA** de perturbaciones ya existentes en el circuito o en sus líneas de conexión (alimentación / red, entradas, salidas,...); tales perturbaciones se han producido inicialmente por alguno de los mecanismos que consideraremos a continuación y, una vez presentes en el circuito en términos de tensión, son transmitidas a través de los conductores:

- Soluciones:
- ← filtrado
  - ← separación galvánica
    - filtros de red
    - condensadores de desacoplo
    - optoacopladores
    - abrazaderas de ferrita sobre los cables
    -

**B EFECTO AUTOINDUCTIVO** que genera transitorios de tensión (*glitches*) en respuesta a los cambios de intensidad:

- Soluciones:
- ← reducir L de las líneas de transmisión
  - ← disminuir  $dI/dt$
  - ← absorber  $\Delta I$ 
    - líneas cortas, directas
    - líneas anchas para la alimentación
    - flancos suaves: *slew-rate*
    - condensadores de desacoplo
    -

**C ACOPLA CAPACITIVO** entre líneas próximas y paralelas, que transmite de una a otra las variaciones de tensión:

- Soluciones:
- ← reducir la longitud de las líneas
  - ← aumentar su separación
  - ← reducir  $dV/dt$
  - ← interponer un conductor entre ellas
    - adecuada distribución de los circuitos integrados
    - líneas de señal cortas
    - flancos suaves: *slew-rate*
    - conductor intermedio conectado a 0 V
    -

**D IMPEDANCIA COMÚN** que transite de unas etapas a otras los efectos del consumo de intensidad (resistivos: caídas de tensión  $RI$ ) y los propios de las variaciones de intensidad (inductivos: transitorios de tensión  $L.dI/dt$ ):

- Soluciones: ← reducir  $R$  (por ejemplo, disminuyendo la longitud o aumentando la sección del conductor)
- ← buena distribución de las líneas de alimentación
- ← configuración adecuada de las líneas de retorno (*masa*)
- ← las mismas que en el caso B (efecto autoinductivo)

líneas cortas y anchas  
plano de masa  
esquemas de alimentación en peine o retícula  
líneas de alimentación directas, anchas y cuidadas  
condensadores de desacoplo  
limitar  $dI/dt$  (*slew-rate*)  
separación de alimentaciones: digital, potencia, analógica  
•••

**E ACOPLAMIENTO INDUCTIVO** que hace incidir sobre los bucles de corriente el efecto de los campos magnéticos variables (producidos a su vez, por lo general, por otros bucles de corriente variable):

- Soluciones: ← reducir el área de los bucles de corriente
- Normalmente, los bucles se cierran por la línea de retorno o masa; por ello, el diseño geométrico de la «masa» es transcendental

plano o malla (retícula) de masa  
expandir al máximo la superficie de masa  
buena distribución de la línea de alimentación  $V_{CC}$   
dividir los bucles de alimentación:  
condensadores de desacoplo  
evitar los bucles de masa: una sola conexión a tierra  
romper los bucles de masa: optoacopladores  
•••

- ← aislar el circuito mediante blindajes
- ← evitar la producción de campos magnéticos

carcasas ferromagnéticas  
cables apantallados  
optoacopladores  
apantallar transformadores y bobinas  
no utilizar relés ni contactores  
•••

**F ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO** por el que los diversos conductores y los bucles de corriente actúan como antenas receptoras que recogen el efecto de las ondas electromagnéticas presentes en el entorno:

- Soluciones: ← reducir el área de los bucles
- ← aislar el circuito mediante blindajes
- ← introducir separaciones galvánicas

carcasas dobles: ferromagnéticas con exterior conductor  
juntas con continuidad eléctrica  
ranuras de anchura mínima  
cables apantallados  
acoplo optoelectrónico de entradas y de salidas  
•••

**G OSCILACIONES** debidas a acoplos entre autoinductancias y capacidades parásitas:

- Soluciones: ← reducir  $L$  de las conexiones
- ← filtrado

líneas cortas y anchas  
condensadores de desacoplo  
•••

**T3.5. Reglas básicas para el diseño***Reducción del ruido producido por el propio circuito*

- Cuidar mucho el diseño del circuito impreso y los cables de conexionado
- Cables y pistas muy cortos
  - Evitan oscilaciones, acoplos, antenas, caídas de tensión,...
  - Reducen el área de los bucles
- Condensadores de desacoplo en la alimentación
  - Resuelven variaciones de I, dividen los bucles,...
  - \* Filtrado en la entrada de V<sub>CC</sub> de cada placa: 100 µF // 100 nF
  - \* Filtrado de las alimentaciones de cada circuito integrado: 10 nF
- Buena distribución de las alimentaciones
  - Minimiza L, R, bucles e impedancias compartidas
  - \* Líneas directas, cortas y anchas
  - \* Plano o malla de masa
  - \* Separación de alimentaciones: potencia, analógica, digital
- Eliminar / apantallar componentes magnéticos
- Sustituir contactores / relés por triacs que conmuten en cruce por cero
- En los buses de conexión, intercalar líneas de masa intermedias
  - Reducen los acoplos capacitivos

*Defensa frente al ruido que le llega del entorno*

- Minimizar bucles: reducir su área
  - Reduce su efectividad como receptores
- Aislar el circuito mediante carcasa metálica
  - \* aislamiento electrostático: conductores
  - \* aislamiento magnético: materiales ferromagnéticos
  - \* aislamiento ante ondas electromagnéticas: ambos tipos
    - Los materiales conductores reflejan las ondas, por tanto, deben encontrarse en el lado exterior, y los ferromagnéticos las absorben (interior)
  - \* Minimizar las dimensiones lineales de las aberturas
  - \* Asegurar la continuidad eléctrica en las juntas
  - \* Conectar la masa del circuito a la carcasa mediante un condensador en un solo punto
    - Evita acoplos capacitivos carcasa - circuito
    - El contacto en un solo punto evita bucles

- Aislar las líneas de conexión al exterior.
  - \* Filtro de red
  - \* Separación galvánica de entradas y salidas mediante optoacopladores
    - Interrumpen la conexión directa y la transmisión de ruido
    - Rompen los bucles de masa
- Apantallar los cables de conexión
  - \* Cable coaxial o cable entrelazado
- Evitar los bucles de tierra
  - \* Conexión a tierra, a ser posible, en un solo punto.

*Limitación del ruido enviado a otros circuitos*

- A través de la red
  - \* No trocear la intensidad
  - \* Ajustar el consumo de intensidad a la senoide de la red
  - \* Disparar componentes de potencia en cruce por cero de red
  - \* Filtrar adecuadamente la conexión a red
  - \* Los flancos de conmutación deben ser lo más suaves posible
- Por ondas electromagnéticas
  - \* Apantallar
  - \* Evitar antenas
  - \* Minimizar el área de los bucles
  - \* Evitar contactos mecánicos (pulsadores, contactores, relés, ...)
  - \* Evitar componentes magnéticos.

*Consideraciones complementarias*

- El ruido electromagnético es un problema a tener en cuenta desde las etapas iniciales del diseño: una vez completado el diseño de un equipo se hace más difícil y costosa su protección frente al ruido.

- Los problemas debidos al ruido externo (interequipos o ambiental) no se suelen manifestar en la fase de desarrollo en el laboratorio: son en gran medida problemas de contaminación ambiental que aparecen al llevar el circuito a su ambiente real.

- En los circuitos digitales conviene:

- no ir nunca a muy alta velocidad si no es necesario
- no utilizar series ultrarrápidas si no es preciso
- no emplear flancos muy verticales innecesariamente

ya que, todo ello, además de aumentar el consumo dinámico, colabora en gran medida en aumentar el nivel de ruido.