

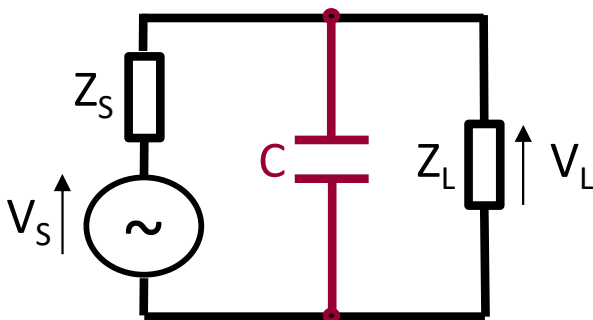
SOLUCIONES CEM CONDUCTIVAS EN DETALLE

2026

De esto ya he tratado, pero ahora un poco más en detalle y con su justificación (no se Ustedes, pero yo necesito saber el porqué de las cosas, aunque sea de una forma preliminar, **se acerca componente matemática...**).

Las soluciones para la atenuación de ruido conducido pueden ser de dos tipos:

CAPACITIVAS (PARALELO)



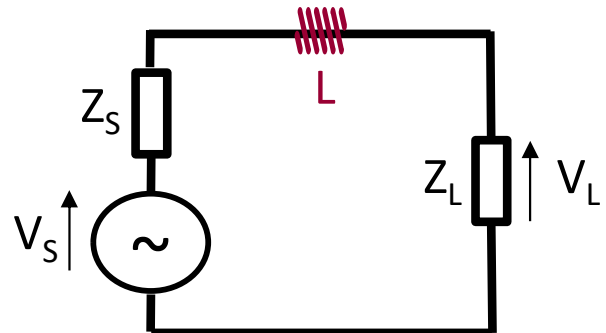
Donde:

- V_s : fuente de CA.
- Z_s : impedancia de la fuente (podría incluirse en ella la del tramo de cable hasta donde se colocó el condensador).
- C : condensador de filtro.
- Z_L : impedancia de la carga (incluso podría incluirse en ella la del tramo de cable desde donde se colocó el filtro).

En honor a la verdad, debería usarse el circuito equivalente del condensador real, pero para no complicar la parte matemática, de momento lo vamos a obviar:



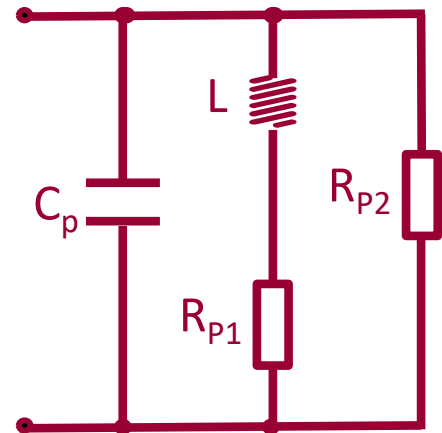
INDUCTIVAS (SERIE)



Donde:

- V_s : fuente de CA.
- Z_s : impedancia de la fuente (podría incluirse en ella la del tramo de cable hasta donde se colocó la inductancia).
- L : inductancia de filtro.
- Z_L : impedancia de la carga (incluso podría incluirse en ella la del tramo de cable desde donde se colocó el filtro).

En honor a la verdad, debería usarse el circuito equivalente de la bobina real, pero para no complicar la parte matemática, de momento lo vamos a obviar:



Para conocer el comportamiento en todo el rango de frecuencias de un circuito eléctrico, lo usual es calcular el "Diagrama De Bode", que indica en dos gráficas separadas el **módulo** y la **fase** de la denominada "función de transferencia $H(s)$ ", que es la relación entre la entrada y la salida del circuito que nos interesa estudiar (en nuestro caso, la relación entre la tensión de salida de la fuente y la que recibe la carga).

- Lo primero es calcular la función de transferencia en el dominio de la frecuencia ($s=2\pi f$). **Tengan en cuenta que llegaremos al mismo resultado en ambos casos.** Antes hacemos algún paso matemático previo:

$$Z_p = \left(\frac{1}{sC} \parallel Z_L \right) = \frac{Z_L}{(1 + sCZ_L)}$$

NO ES NECESARIO

$$H(s) = \frac{V_l(s)}{V_s(s)} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_s} = \frac{Z_l}{(Z_s + Z_l) + sCZ_sZ_l} =$$

$$= \frac{\frac{Z_l}{(Z_s + Z_l)}}{1 + sC\left(\frac{Z_sZ_l}{Z_s + Z_l}\right)} = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_c}}$$

Donde:

- A_0 : ganancia en CC.
- ω_c : frecuencia de corte (rads) = $\frac{1}{CZ_p}$

$$H(s) = \frac{V_l(s)}{V_s(s)} = \frac{Z_l}{(Z_s + Z_l) + sL} = \frac{\frac{Z_l}{(Z_s + Z_l)}}{1 + s\frac{L}{(Z_s + Z_l)}} =$$

$$= \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_c}}$$

Donde:

- A_0 : ganancia en CC.
- ω_c : frecuencia de corte (rads) = $\frac{(Z_s + Z_l)}{L}$

Una vez que tenemos la función $H(s)$ de transferencia, para calcular el diagrama de Bode reemplazamos "s" por "j ω ".

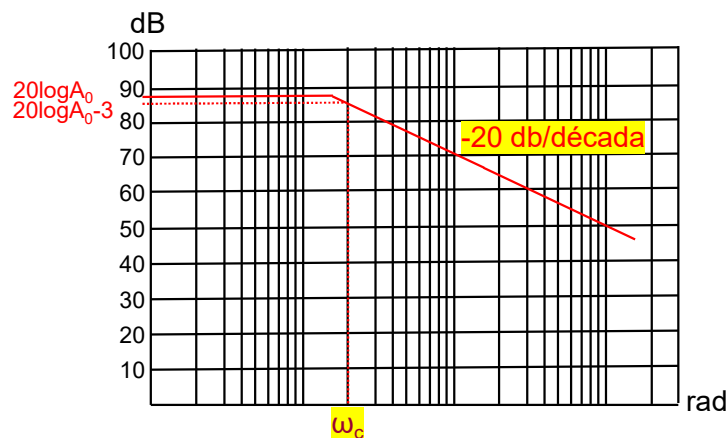
$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}$$

MÓDULO (en dB)

$$20\log H(j\omega) = 20\log A_0 - 20\log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

Donde:

- Para $\omega \ll \omega_c$ entonces el módulo es $20\log A_0$ (dB).
- Para $\omega = \omega_c$ entonces el módulo es $20\log A_0 - 3$ (dB).
- Para $\omega \gg \omega_c$ entonces el módulo cae 20 dB/década (haga el cálculo para $\omega = 10\omega_c$ y para $\omega = 100\omega_c$ si no me cree).



-3dB! ¿VIERON MI PUBLICACIÓN SOBRE EL PALABRO "ANCHO DE BANDA"?

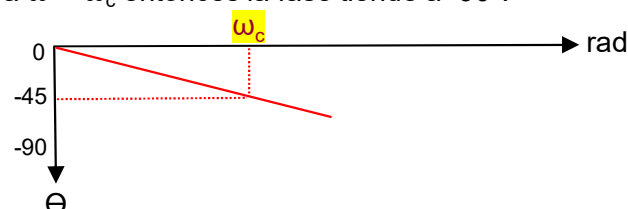
Eso es un FILTRO PASO BAJO, por encima de la frecuencia (pulsación ω_c) de corte se produce atenuación hacia la carga Z_L .

FASE (en ° eléctricos)

$$\theta(\omega) = \angle H(j\omega) = \angle HA_0 - \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$$

Donde:

- Para $\omega \ll \omega_c$ entonces la fase tiende a 0.
- Para $\omega = \omega_c$ entonces la fase es -45° .
- Para $\omega \gg \omega_c$ entonces la fase tiende a -90° .



Si se meten las características reales del condensador o inductancia de filtro y del cable (puede variar según donde se coloque el filtro, cerca de la fuente o cerca de la carga) la obtención de la función de transferencia se complica si se quiere realizar a la manera tradicional ("a mano"). Lo habitual hoy día es usar software de cálculo para calcular "el Bode" a partir de un editor gráfico de un circuito con valores de los componentes o incluso con referencias reales de componentes y cables de mercado.

Una cosa es el esquema de circuito y otra la ejecución. Los componentes de filtro deben tener los terminales más cortos posibles para no añadir más resistencia e inductancias/capacidades parásitas que no se contemplarían en el cálculo del programa y se traducirían en un comportamiento diferente al esperado (normalmente en industria no es tan crítico, pero imagínense en telecomunicaciones, defensa, aeronáutica, cohetes, etc).

Recordemos que los filtros paso bajo:

- En **modo diferencial** derivan a la otra línea la componente de AF (o la atenúan hacia la salida, como hemos expresado en el ejemplo).
- En **modo común** derivan a tierra la componente de AF (o la atenúan hacia la salida, de forma análoga a lo expresado en el ejemplo).

Y reiterando lo dicho, con los componentes reales se tendrán Bodes más complejos, y curvas de atenuación distintas.

En cuanto a los condensadores de filtro pueden ser:

- Con dieléctrico de papel. Hasta varios KHz.
- Con dieléctrico de poliéster o polipropileno metalizado. Hasta pocos MHz.
- Con dieléctrico cerámico. Desde MHz hasta GHz.

En mis cajas de accesorios CEM suelo tener un surtido de condensadores de los dos primeros tipos (yo no suelo adentrarme mucho en el terreno de los muchos MHz-GHz). Evidentemente, son todos condensadores no polarizados (no valen los electrolíticos porque ¡PUM!). En realidad, la mayor parte de las veces tiro de filtros completos, pero de vez en cuando, algún condensador suelto a chasis hay que poner...

Si revisan el esquema de un variador de frecuencia sencillo que les vuelvo a poner en la página siguiente, podrán ver condensadores de filtro con valores reales:

- Para el **modo diferencial**, el valor de C dependerá de la frecuencia de corte que se desee conseguir. En este caso:
 - 1,5µF, 275 V (polipropileno metalizado) inmediatamente a la entrada de alimentación de 230 V y 48-63Hz.
 - 470 nF, 275 V (polipropileno metalizado) después de la reactancia de entrada y antes del rectificador.
- Para el **modo común**, los valores habituales suelen andar entre 10 y 300 nF. En este caso:
 - 47 nF, 275 V (polipropileno metalizado) después de la reactancia de entrada y antes del rectificador.
 - 222 pF, 275 V (cerámicos en cada polo del bus de CC.
 - 331 pF, 275 V (cerámicos) entre cada fase de salida del inversor a motor (aquí tendremos salida de pulsos modulada PWM con frecuencias de conmutación 5-16 KHz). La frecuencia de corte del filtro es mucho más alta que en los del lado de 50 Hz (atenúa la salida a motor para frecuencias mucho mayores).

En cuanto a las inductancias de filtro pueden ser:

- Bobinas sin o con núcleo magnético. Suelen ser para placas de circuito impreso.
- Ferritas cerradas o abiertas por las que se enrolla o introduce el(los) cable(s). Suelen ser las habituales para soluciones "a posteriori".

En mis cajas de accesorios CEM suelo tener un surtido de ferritas tanto para abrazar cables como para meter hilo(s). En realidad, la mayor parte de las veces tiro de filtros completos, pero de vez en cuando, alguna ferrita hay que poner en alguna alimentación o cable de señal...

Si revisan el esquema de un variador de frecuencia sencillo que les vuelvo a poner en la página siguiente, podrán ver una reactancia bobinada con un núcleo que forma parte del filtro del variador (ver esquemas y foto más adelante). Este filtro tiene reactancias en serie y condensadores en paralelo. Es un filtro "paso banda" que será objeto de una publicación posterior. ¿No todo va a explicarse en esta publicación, no...?

El tema es que los filtros de mercado tienen esquemas un poco más complicados de lo que hemos visto hasta ahora.

Esta publicación es un poco resumida, por el momento les pongo cosas por las que ya me van a tratar de "jarto" pero la realidad es que no sirve lo que hemos visto hasta ahora nada más que para empezar a enfocar el problema técnico...

De esto se lleva hablando cincuenta años... Llegamos tarde todos...

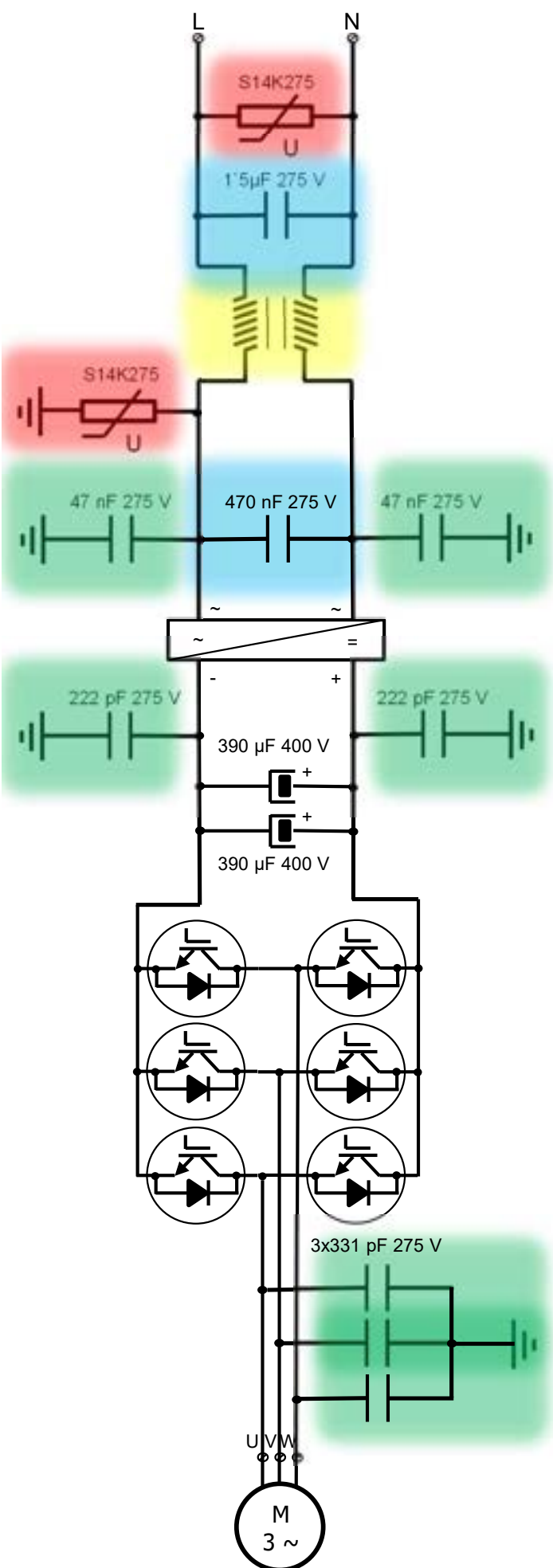
¿Sabe desde cuándo se ha empezado a considerar esta problemática?...

Si le digo "la carrera espacial" ¿se lo cree?...

SUGERENCIAS:

- www.we-online.com (Würth Elektronik). Amplio catálogo de materiales y kits de desarrollo y soluciones CEM.

CONVERTIDOR DE FRECUENCIA SENCILLO DE UNA PRIMERA MARCA (ENTRADA MONOFÁSICA)



Varistor de protección contra sobretensiones de la alimentación eléctrica entre hilos (seguridad funcional).

Filtro EMI **diferencial** (CEM).

CHOKE del filtro (CEM).

Varistor de protección contra sobretensiones de la alimentación eléctrica entre fase y tierra (seguridad funcional).

Filtro EMI de dos etapas, **diferencial** y **de modo común**, en el lado de CA (CEM).

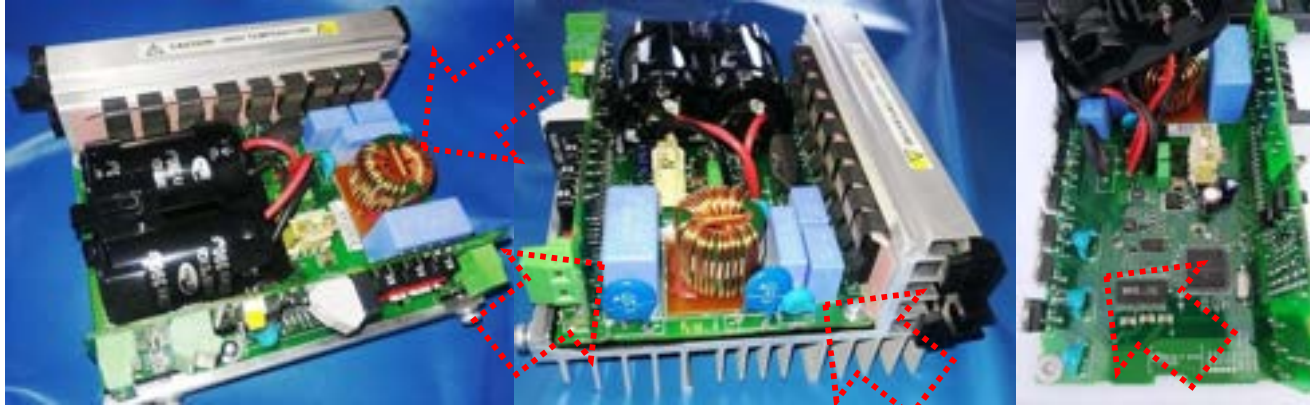
Puente rectificador (RS1506M).

Filtro EMI **de modo común** en el lado de CC (CEM).

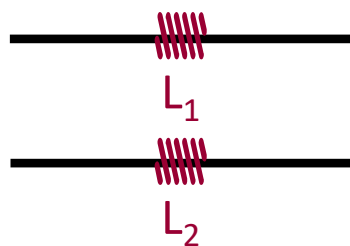
Banco de condensadores del variador.

Puente inversor (6xG10N60QRUFD).

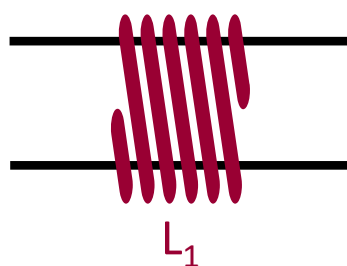
Filtro de salida a motor en **modo común** (CEM).



CABLE DE CONEXIÓN DE PORTÁTIL A VARIADORES DE UNA PRIMERA MARCA



MODO DIFERENCIAL



MODO COMÚN

Según cómo se coloque el filtro, se puede atacar a la corriente en modo común o diferencial. El uso en modo diferencial es más problemático pues afecta a la forma de la señal (en modo común la corriente entra y sale por el mismo núcleo).

- Se deben colocar lo más cerca posible de la fuente de ruido conducido.
- El cable lleva ferritas en los dos lados (lado PC y lado variador) pues ambos son fuentes de ruido conducido por el cable.
- Todos los hilos pasan por el núcleo de la ferrita, luego es para el modo común.
- En caso de necesidad de más atenuación se podrían colocar varias seguidas.
- Se trata de ferritas de núcleo partido para colocar en el cable una vez fabricado (las ferritas “tipo donut” requieren pasar el/los cables durante el proceso de fabricación y, además, no sería práctico para un cable de uso externo).
- El fabricante eligió el valor inductivo del filtro en función del ruido típico superpuesto a la señal útil que encontró en los ensayos realizados con variador y ordenador en uso. Las comunicaciones del variador con el portátil (señal útil) soportan hasta 5 Gbit/s, compatibles con el estándar USB 3.0/3.1 Gen1. con el cable original (no debería usarse un cable mayor de 3 m). Eso serán hasta 2.5 GHz de fundamental como mucho dependiendo de la configuración de los puertos, de la longitud del cable y de la capacidad de la electrónica. **¿Nunca ha usado un cable sin filtros y tenido problemas con el “touch pad” del portátil?. Yo sí: lo que suele ocurrir es que o no funciona o funciona erráticamente (y a saber qué otras consecuencias menos visibles pueden haber como por ejemplo, con la velocidad de las comunicaciones).**

BIBLIOGRAFÍA:

- Mardiguian, M. (2000). EMI Troubleshooting Techniques. McGrawHill.
- Daura Luna, F. (2015). Las ferritas y los cables. Cemdal.

Si desea contactar conmigo (Jose Carlos Álvarez Alonso) para hablar sobre su necesidad puede hacerlo en el 659 488 836 o enviándome un email a icalvarez@rysel.es o info@rysel.es si desea que le conteste por escrito. Estamos en Gijón, Principado De Asturias pero no se preocupe por esto si le interesan nuestros servicios pues normalmente estamos trabajando en la zona noroeste del país.