

de captar una interferencia generada por el equipo a la frecuencia a la que se están midiendo los parámetros S ; interferencia que por los motivos explicados anteriormente puede falsear la medida si no se ha implementado el algoritmo de interpolación.

4.2. Caracterización de la emisión conducida

4.2.1. Introducción

A la hora de diseñar o seleccionar un filtro de red eficiente es necesaria una completa caracterización del comportamiento del equipo electrónico al cual será conectado, en cuanto a generación de interferencia se refiere, para poder predecir la atenuación real del filtro, y los niveles de interferencia que el equipo filtrado suministra a la red eléctrica en forma de emisión conducida.

El capítulo 3 (caracterización multimodal de filtros de red) presenta una manera de caracterizar los filtros de red mediante sus parámetros S , físicos y modales. Esta caracterización es más general que aquellas basadas sólo en la medida separada de las atenuaciones en modo común y modo diferencial [13], ya que tiene en cuenta las interferencias espurias que fluyen entre puertos debido a asimetrías en el diseño de los filtros, de modo común a diferencial y viceversa. Para que esta caracterización sea útil en un contexto de diseño, una caracterización similar del ESE, que considere los puertos físicos del equipo electrónico (línea-tierra y neutro-tierra) o sus equivalentes modales (común y diferencial), ha de ser empleada.

El apartado 4.1 (caracterización multimodal de la impedancia de entrada de equipos electrónicos) presenta un modelo completo (usando puertos físicos y modales) para caracterizar la impedancia del equipo electrónico (vista desde sus terminales de alimentación). El dispositivo electrónico se modela mediante un circuito equivalente de tres impedancias en pi, el cual se obtiene a partir de la medida de parámetros S , considerando el equipo como un dispositivo de dos puertos: línea-tierra y neutro-tierra. A partir de este modelo se obtiene un nuevo modelo modal equivalente, mediante el cual se puede predecir la atenuación real de un filtro de red conectado al equipo electrónico. Pero, debido a la falta de información acerca de las fuentes de interferencia, este modelo no puede ser utilizado para predecir el nivel de interferencia generado por el dispositivo electrónico después del filtro de red.

Este apartado propone y valida un nuevo modelo (circuital y modal) para caracterizar el comportamiento de un ESE. La nueva técnica de medida, también basada en analizador de redes y LISN, tiene como objeto obtener un circuito equivalente más completo, compuesto por una red de tres impedancias en pi y dos fuentes de tensión, que modelan la interferencia generada por el equipo electrónico [69], [71]. El procedimiento es válido para frecuencias comprendidas dentro del margen de frecuencias de trabajo de la LISN. Puesto que este modelo contiene fuentes de tensión que modelan

las fuentes de interferencia con precisión, puede ser utilizado para predecir los niveles de interferencia cuando el ESE está conectado a cualquier carga (filtro de red, red eléctrica, etc.).

En resumen, los modelos que este apartado propone son dos:

- Modelo circuital: permite conocer el nivel de interferencia conducida que el equipo inyecta en ambas líneas de la red eléctrica (línea y neutro) independientemente de la impedancia que éstas presenten.
- Modelo modal: permite conocer el nivel de interferencia conducida en modo común y en modo diferencial, y la interacción entre ambos modos, que resultará de gran interés en el diseño y/o elección del filtro de red más adecuado para mitigar la emisión del equipo.

4.2.2. Caracterización circuital

Si se sigue la misma definición de puertos empleada en las figuras 4.1 y 4.2 para representar un ESE, éste se puede modelar mediante una red de tres impedancias en pi más dos fuentes externas de interferencia AC conectadas en serie a los terminales de línea y neutro (figura 4.32). Estas fuentes equivalentes generan la misma interferencia en los terminales que las fuentes interferentes internas del ESE. Como se puede observar, el modelo de la figura 4.32 es una extensión del modelo de tres impedancias presentado en la figura 4.3. Existen otros posibles modelos para caracterizar de manera completa la interferencia generada por cualquier equipo electrónico [54], [55], pero se ha seleccionado esta estructura (figura 4.32) por su simple interpretación.

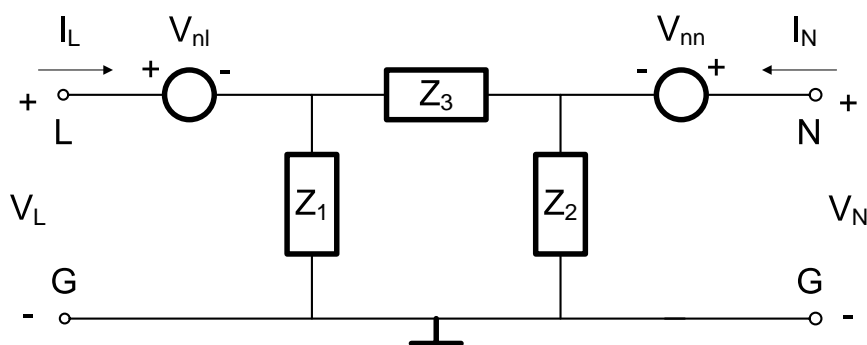


Figura 4.32: Modelo circuital completo para un ESE.

Los valores de las tres impedancias (Z_1 , Z_2 , Z_3) del modelo circuital de la figura 4.32 se hallan a partir de la medida de parámetros S en ambos puertos del ESE (puertos "L-G" y "N-G") y posterior aplicación de la ecuación 4.2 (apartado 4.1.2).

Los valores de las dos fuentes de tensión externas de interferencia (V_{nl} , V_{nn}) presentes en el modelo circuital de la figura 4.32 se hallan a partir de la medida (sistema de medida que se describe a continuación) de tensiones y corrientes en los puertos del ESE: V_L , I_L , V_N , I_N . La relación entre estos parámetros se extrae de aplicar las leyes de *Kirchoff* al modelo circuital de la figura 4.32:

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{V_L - V_{nl}}{Z_1} + \frac{V_L - V_{nl} - V_N + V_{nn}}{Z_3} \\ I_N &= \frac{V_N - V_{nn}}{Z_2} + \frac{V_N - V_{nn} - V_L + V_{nl}}{Z_3} \end{aligned} \quad (4.37)$$

De estas expresiones se pueden aislar las dos fuentes externas de tensión interferente (V_{nl} , V_{nn}):

$$\begin{aligned} V_{nl} &= V_L - \frac{Z_1(Z_2 + Z_3)I_L + Z_1Z_2I_N}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ V_{nn} &= V_N - \frac{Z_2(Z_1 + Z_3)I_N + Z_1Z_2I_L}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{aligned} \quad (4.38)$$

4.2.3. Caracterización modal

El modelo circuital presentado permite caracterizar el comportamiento de un equipo electrónico, pero no aporta información acerca de la generación de interferencias conducidas en modo común y en modo diferencial. Un modelo en términos de impedancias y fuentes de interferencia en modo común y en modo diferencial resulta más interesante de cara a analizar su comportamiento, ya que el análisis desde un punto de vista modal permite una mejor interpretación de la generación y propagación de las interferencias. La figura 4.33 propone un nuevo modelo modal compuesto por una red en pi de tres impedancias (Z_{CM} , Z_{DM} , Z_{TM}) y dos fuentes de tensión (V_{nCM} , V_{nDM}), que modelan la generación de interferencias en modo común y en modo diferencial del equipo electrónico. Este modelo modal permitirá la evaluación del comportamiento modal del filtro de red (pérdidas de inserción en modo común y en modo diferencial e intercambio de energía entre modos) al cual será conectado el equipo.

A continuación se lleva a cabo un desarrollo matemático para, a partir de la relación entre las tensiones y corrientes circuitales (V_L , I_L , V_N , I_N) y modales (V_{CM} , I_{CM} , V_{DM} , I_{DM}) presentes en los terminales del ESE, obtener los valores de la impedancia en modo común (Z_{CM}), la impedancia en modo diferencial (Z_{DM}), la transimpedancia modal (Z_{TM}) y las fuentes de tensión (V_{nCM} , V_{nDM}) que conforman el modelo modal del ESE (figura 4.33).

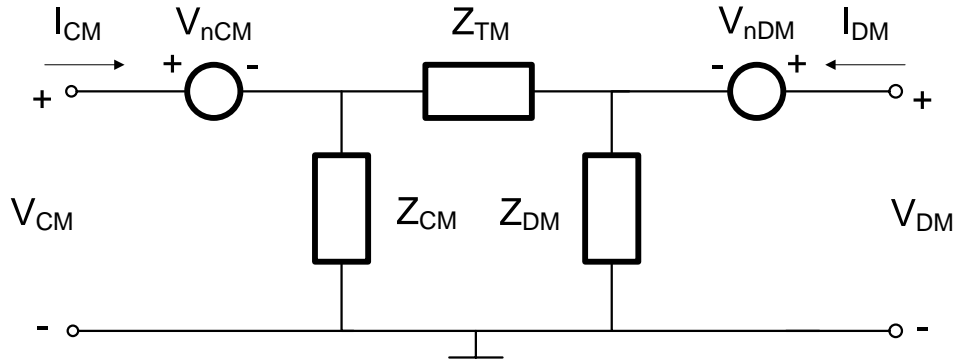


Figura 4.33: Modelo modal completo para un ESE.

Sustituyendo la ecuación 4.3 en 4.37, y ésta a su vez en 4.4, se obtienen las corrientes modales:

$$\begin{aligned}
 I_{CM} &= \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) V_{CM} + \left(\frac{1}{2Z_1} - \frac{1}{2Z_2} \right) V_{DM} - \frac{V_{nl}}{Z_1} - \frac{V_{nn}}{Z_2} \\
 I_{DM} &= \left(\frac{1}{2Z_1} - \frac{1}{2Z_2} \right) V_{CM} + \left(\frac{1}{4Z_1} + \frac{1}{4Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) V_{DM} - \\
 &\quad - \left(\frac{1}{2Z_1} + \frac{1}{Z_3} \right) V_{nl} + \left(\frac{1}{2Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) V_{nn}
 \end{aligned} \quad (4.39)$$

Analizando el circuito de la figura 4.33 y aplicando las leyes de *Kirchoff* sobre éste, se extraen las corrientes modales I_{CM} , I_{DM} :

$$\begin{aligned}
 I_{CM} &= \frac{V_{CM} - V_{nCM}}{Z_{CM}} + \frac{V_{CM} - V_{nCM} - V_{DM} + V_{nDM}}{Z_{TM}} \\
 I_{DM} &= \frac{V_{DM} - V_{nDM}}{Z_{DM}} + \frac{V_{DM} - V_{nDM} - V_{CM} + V_{nCM}}{Z_{TM}}
 \end{aligned} \quad (4.40)$$

Agrupando términos en la ecuación 4.40:

$$\begin{aligned}
 I_{CM} &= \left(\frac{1}{Z_{CM}} + \frac{1}{Z_{TM}} \right) V_{CM} - \frac{1}{Z_{TM}} V_{DM} - \\
 &\quad - \left(\frac{1}{Z_{CM}} + \frac{1}{Z_{TM}} \right) V_{nCM} + \frac{1}{Z_{TM}} V_{nDM} \\
 I_{DM} &= -\frac{1}{Z_{TM}} V_{CM} + \left(\frac{1}{Z_{DM}} + \frac{1}{Z_{TM}} \right) V_{DM} + \\
 &\quad + \frac{1}{Z_{TM}} V_{nCM} - \left(\frac{1}{Z_{DM}} + \frac{1}{Z_{TM}} \right) V_{nDM}
 \end{aligned} \quad (4.41)$$

Si se comparan las ecuaciones 4.39 y 4.41, se obtiene la ecuación 4.9, de la cual se extraen los valores de las impedancias modales Z_{CM} , Z_{DM} , Z_{TM} , ya deducidas anteriormente en la ecuación 4.10. De nuevo se pone de manifiesto la existencia de una transimpedancia modal, causa de la transferencia de energía entre modos (por ejemplo, una señal en modo común que incide sobre el equipo puede ser reflejada como una señal en modo común más una señal en modo diferencial). No se puede considerar del todo preciso modelar un equipo electrónico mediante dos generadores aislados (uno para el modo común con la impedancia Z_{CM} , y otro para el modo diferencial con la impedancia Z_{DM}) [48], [50], [51], sino que ha de considerarse un circuito más complejo como el de la figura 4.33 para obtener unos resultados más exactos. Por tanto, la caracterización descrita aquí mejora las ya existentes, que consideran el modo común y el modo diferencial de un equipo como fenómenos independientes.

De comparar las ecuaciones 4.39 y 4.41 se establecen también las siguientes igualdades:

$$\begin{aligned} \frac{V_{nl}}{Z_1} + \frac{V_{nn}}{Z_2} &= \left(\frac{1}{Z_{CM}} + \frac{1}{Z_{TM}} \right) V_{nCM} - \frac{1}{Z_{TM}} V_{nDM} \quad (4.42) \\ \left(\frac{1}{2Z_1} + \frac{1}{Z_3} \right) V_{nl} - \left(\frac{1}{2Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) V_{nn} &= \frac{1}{Z_{TM}} V_{nCM} + \left(\frac{1}{Z_{DM}} + \frac{1}{Z_{TM}} \right) V_{nDM} \end{aligned}$$

La ecuación 4.42 forma un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, por tanto basta con despejar una de las variables (V_{nCM} o V_{nDM}) de una ecuación y sustituirla en la otra. De esta manera, y tras una larga operatoria, se hallan los valores de las dos fuentes de tensión del modelo modal equivalente presentado en la figura 4.33:

$$\begin{aligned} V_{nCM} &= \frac{V_{nl} + V_{nn}}{2} \quad (4.43) \\ V_{nDM} &= V_{nl} - V_{nn} \end{aligned}$$

Todo y no ser obvio observando el circuito de la figura 4.33, las ecuaciones de las fuentes modales (V_{nCM} , V_{nDM}) toman la misma definición que las tensiones modales (V_{CM} , V_{DM}):

$$\begin{aligned} V_{CM} &= \frac{V_L + V_N}{2} \quad (4.44) \\ V_{DM} &= V_L - V_N \end{aligned}$$

Este hecho demuestra que la única fuente de intercambio de energía entre los modos común y diferencial en cualquier ESE es la transimpedancia modal Z_{TM} .

4.2.4. Sistema de medida

Método de medida

Para hallar el modelo circuital completo de un ESE (figura 4.32) se han de realizar dos medidas:

- Medida de los parámetros S en los puertos “L-G” y “N-G” del ESE, a partir de los cuales se hallan los valores de las impedancias Z_1, Z_2, Z_3 (4.2). El sistema de medida, basado en analizador de redes y LISN, corresponde al presentado en la figura 4.6.
- Medida de las tensiones y corrientes en los puertos “L-G” y “N-G” del ESE (V_L, I_L, V_N, I_N), a partir de las cuales se hallan los valores de las fuentes de tensión interferentes V_{nl}, V_{nn} (4.38). Este apartado presenta un nuevo método de medida, aprovechando la disposición de la instrumentación mencionada anteriormente, para medir las tensiones y corrientes en los puertos del ESE.

La configuración utilizada para medir las tensiones e intensidades en los puertos del ESE (figura 4.34) consiste en un analizador de espectros vectorial y una red de acoplamiento (LISN). Resulta imprescindible un analizador de espectros vectorial para realizar la medida porque las señales presentes en los puertos del ESE se deben medir simultáneamente, y así recuperar de esta manera la fase relativa entre ellas. También se puede utilizar un analizador de redes vectorial si sus receptores están accesibles.

El conjunto formado por ESE, analizador de espectros vectorial, LISN, limitadores de transitorios y cableado se puede representar como en la figura 4.35, siempre y cuando ambos canales de la LISN estén suficientemente aislados (p.e. 50 dB). El analizador de espectros mide los valores de las tensiones V_{BL} (amplitud y fase de referencia (nula)) y V_{BN} (amplitud y fase relativa a V_{BL}). Por tanto, es necesario compensar los efectos de la LISN, limitadores y cables para obtener las tensiones V_L y V_N , ya que éstas son las que permiten computar las fuentes de tensión interferentes V_{nl} y V_{nn} (4.38), y no las tensiones medidas V_{BL}, V_{BN} . Para hallar el valor de V_L y V_N se ha de seguir el siguiente procedimiento:

1. Medir los parámetros S del conjunto formado por LISN, limitadores de transitorios y cables de interconexión (S_L, S_N) mediante la utilización de un analizador de redes.
2. Transformar los parámetros S_L, S_N en parámetros Z_L, Z_N mediante las siguientes expresiones [65]:

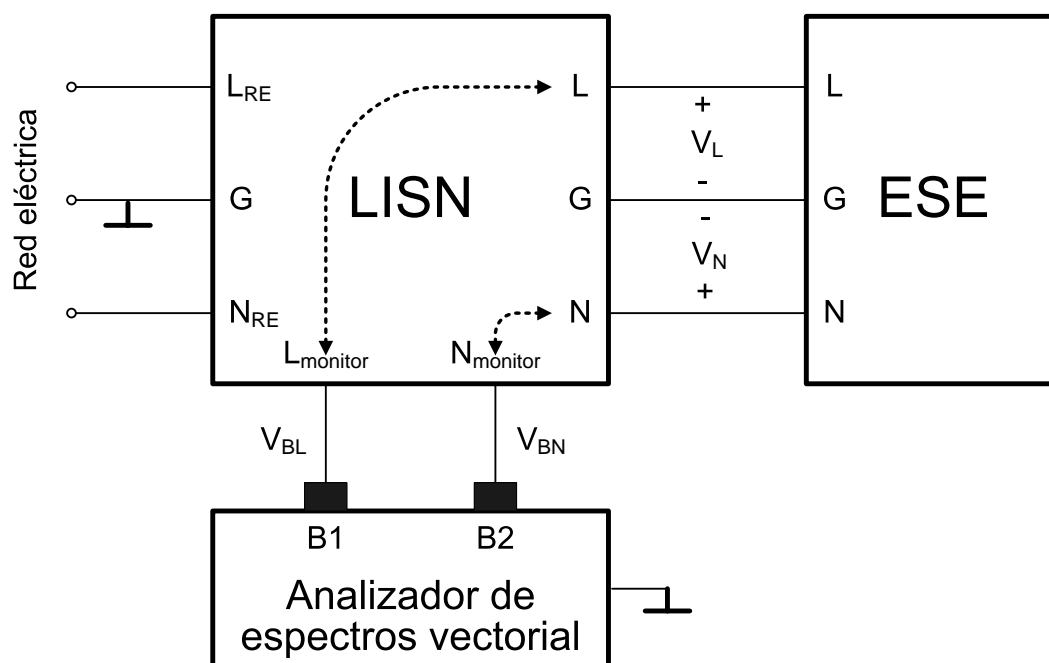


Figura 4.34: Diagrama de bloques del sistema de medida de tensiones en los puertos del ESE.

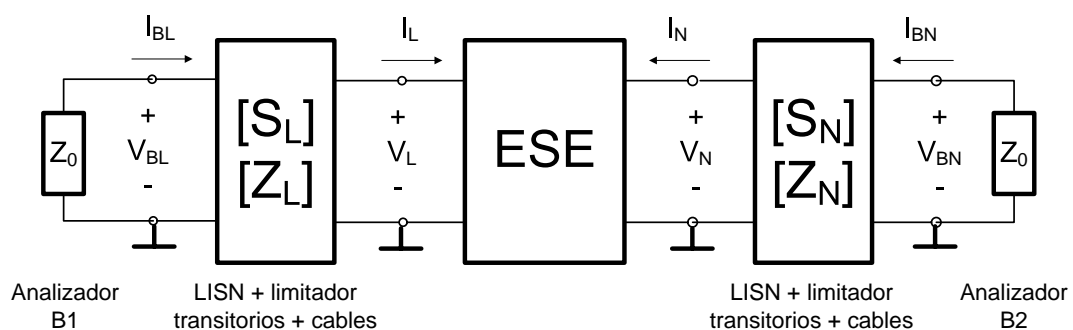


Figura 4.35: Circuito equivalente del sistema de medida de la figura 4.34.

$$\begin{aligned}
Z_{11} &= \frac{Z_0(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + Z_0 S_{12} S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12} S_{21}} \\
Z_{12} &= \frac{2Z_0 S_{12}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12} S_{21}} \\
Z_{21} &= \frac{2Z_0 S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12} S_{21}} \\
Z_{22} &= \frac{Z_0(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + Z_0 S_{12} S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12} S_{21}}
\end{aligned} \tag{4.45}$$

3. Medir las tensiones V_{BL} , V_{BN} (ambas amplitudes y fase relativa) con el analizador de espectros vectorial.
4. Hallar las tensiones V_L y V_N , y las corrientes I_L e I_N , utilizando las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
V_L &= Z_{21L} I_{BL} - Z_{22L} I_L \\
V_N &= Z_{21N} I_{BN} - Z_{22N} I_N \\
I_L &= \frac{Z_{11L} I_{BL} - V_{BL}}{Z_{12L}} \\
I_N &= \frac{Z_{11N} I_{BN} - V_{BN}}{Z_{12N}}
\end{aligned} \tag{4.46}$$

$$\begin{aligned}
I_{BL} &= -\frac{V_{BL}}{Z_0} \\
I_{BN} &= -\frac{V_{BN}}{Z_0}
\end{aligned} \tag{4.47}$$

donde Z_0 es la impedancia de referencia del sistema de medida (50Ω en nuestro caso). Substituyendo la ecuación 4.47 en 4.46 se obtienen las tensiones y corrientes en los puertos del ESE:

$$\begin{aligned}
V_L &= V_{BL} \left(\frac{Z_{22L}}{Z_{12L}} + \frac{Z_{11L} Z_{22L}}{Z_0 Z_{12L}} - \frac{Z_{21L}}{Z_0} \right) \\
V_N &= V_{BN} \left(\frac{Z_{22N}}{Z_{12N}} + \frac{Z_{11N} Z_{22N}}{Z_0 Z_{12N}} - \frac{Z_{21N}}{Z_0} \right) \\
I_L &= -V_{BL} \left(\frac{Z_{11L}}{Z_0 Z_{12L}} + \frac{1}{Z_{12L}} \right) \\
I_N &= -V_{BN} \left(\frac{Z_{11N}}{Z_0 Z_{12N}} + \frac{1}{Z_{12N}} \right)
\end{aligned} \tag{4.48}$$

5. Finalmente, se calculan las fuentes equivalentes de interferencia V_{nl} y V_{nn} utilizando la ecuación 4.38.

Validación experimental

Para validar el método de medida propuesto, que extrae el valor de las fuentes de interferencia V_{nl} y V_{nn} a partir de las tensiones y corrientes circuitales en los terminales del ESE (V_L, I_L, V_N, I_N), se ha empleado el circuito de prueba descrito en el apartado 4.1.4 (figura 4.7), pero añadiéndole dos fuentes de tensión, resultando una estructura como la representada en la figura 4.36. Se ha implementado este circuito, y no uno con la estructura de la figura 4.32, porque los dos generadores tienen una referencia común, siendo más sencillo implementarlos utilizando la instrumentación de laboratorio disponible. Las fuentes de interferencia V'_{nl} y V'_{nn} se han conseguido empleando un generador de RF con dos salidas de igual amplitud (97 dB μ V) y diferencia programable de fase, que en este caso se ha fijado a 53°. El generador barre de los 50 kHz a los 35 MHz. Los 50 Ω de impedancia interna del generador de RF (Z'_{gl}, Z'_{gn}) se han añadido a las impedancias Z'_1 y Z'_2 del circuito de prueba.

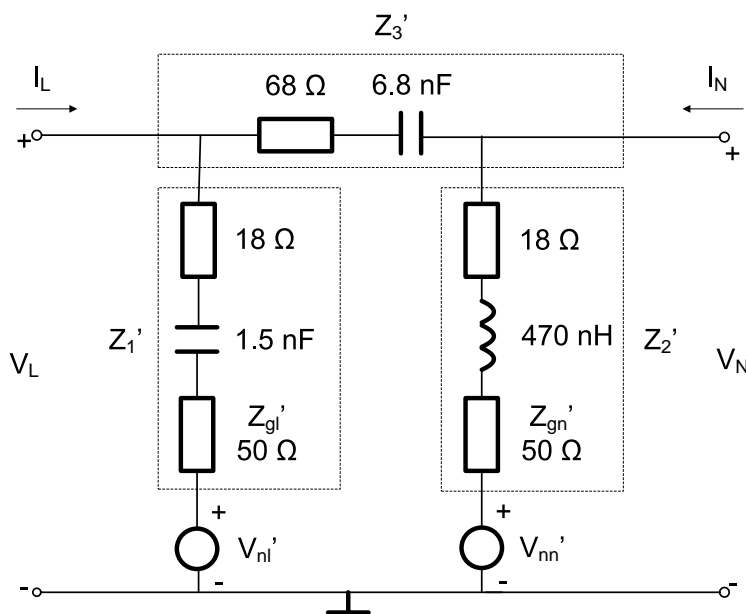


Figura 4.36: Circuito de prueba utilizado como ESE para la medida de fuentes de interferencia.

A partir del esquema eléctrico del circuito de prueba de la figura 4.36 se puede hallar teóricamente, y por tanto de manera exacta, su modelo circuital (figura 4.32) aplicando las leyes de *Kirchoff* sobre éstos:

$$\begin{aligned}
Z_1 &= Z'_1 \\
Z_2 &= Z'_2 \\
Z_3 &= Z'_3 \\
V_{nl} &= \frac{(Z_2 + Z_3)V'_{nl} + Z_1V'_{nn}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\
V_{nn} &= \frac{(Z_1 + Z_3)V'_{nn} + Z_2V'_{nl}}{Z_1 + Z_2 + Z_3}
\end{aligned} \tag{4.49}$$

Las figuras 4.8 a 4.13 muestran las impedancias circuitales (Z_1, Z_2, Z_3) del circuito de prueba utilizado (figura 4.36). La figura 4.37 muestra las amplitudes y la fase relativa de las fuentes interferentes (V_{nl}, V_{nn}) de su modelo circuital equivalente (figura 4.32), las cuales se han obtenido de dos maneras distintas:

1. Valores reales de las fuentes V_{nl}, V_{nn} (usando ecuación 4.49), que se utilizan para corroborar la validez del método.
2. Valores calculados de las fuentes V_{nl}, V_{nn} a partir de las tensiones y corrientes circuitales (V_L, I_L, V_N, I_N) medidas (usando el método propuesto en este apartado).

Las figuras 4.14 a 4.19 muestran las impedancias modales (Z_{CM}, Z_{DM}, Z_{TM}) del circuito de prueba utilizado (figura 4.36). La figura 4.38 muestra las amplitudes y la fase relativa de las fuentes interferentes (V_{nCM}, V_{nDM}) de su modelo modal equivalente (figura 4.33), las cuales se han obtenido de aplicar la ecuación 4.43 a las fuentes circuitales.

Las figuras 4.37 y 4.38 demuestran que el método de medida propuesto para determinar el valor de las dos fuentes de interferencia que componen el modelo circuital y modal de un equipo electrónico es válido. Observar que la diferencia de fase entre las fuentes de tensión V_{nl} y V_{nn} (aproximadamente -15°) del modelo circuital (figura 4.37), más próxima a 0° que a 180° , hace que la amplitud de la fuente equivalente de modo común V_{nCM} sea mayor que la amplitud de la fuente equivalente de modo diferencial V_{nDM} (figura 4.38).

La figura 4.39 muestra una fotografía del circuito de prueba implementado, formado por un generador de RF y una red de impedancias montadas sobre una placa de circuito impreso. La figura 4.40 muestra el conexionado de los elementos que conforman el sistema de medida siguiendo el esquema descrito en la figura 4.6 para la medida de parámetros S , y el esquema descrito en la figura 4.34 para la medida de tensiones en los puertos del ESE.

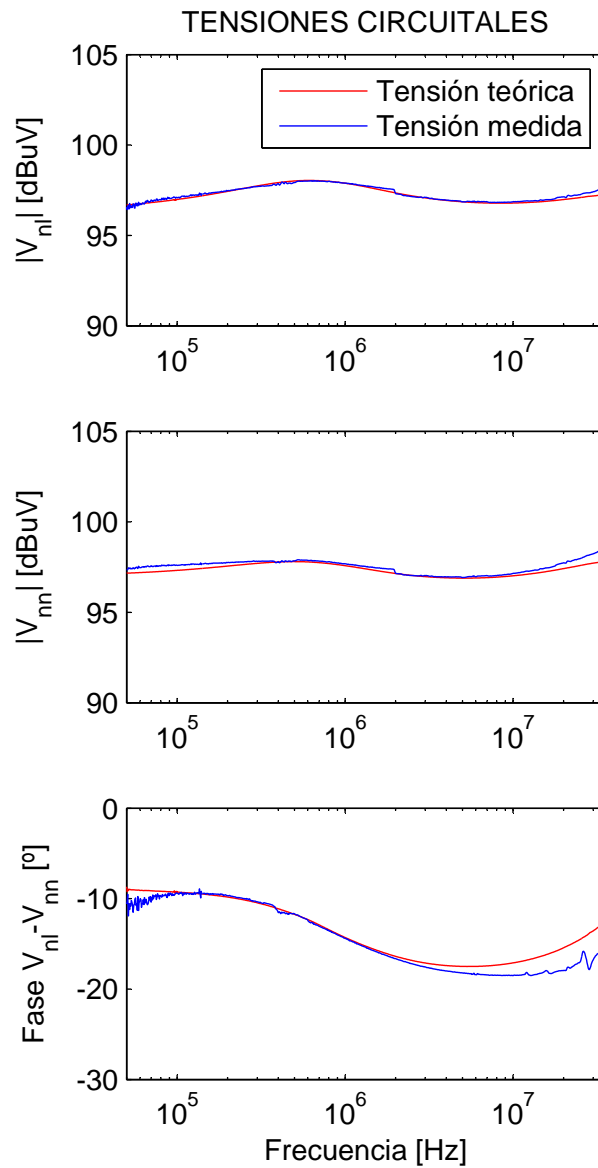


Figura 4.37: Comparación de fuentes de interferencia V_{nl} , V_{nn} medidas y teóricas para el circuito de prueba de la figura 4.36.

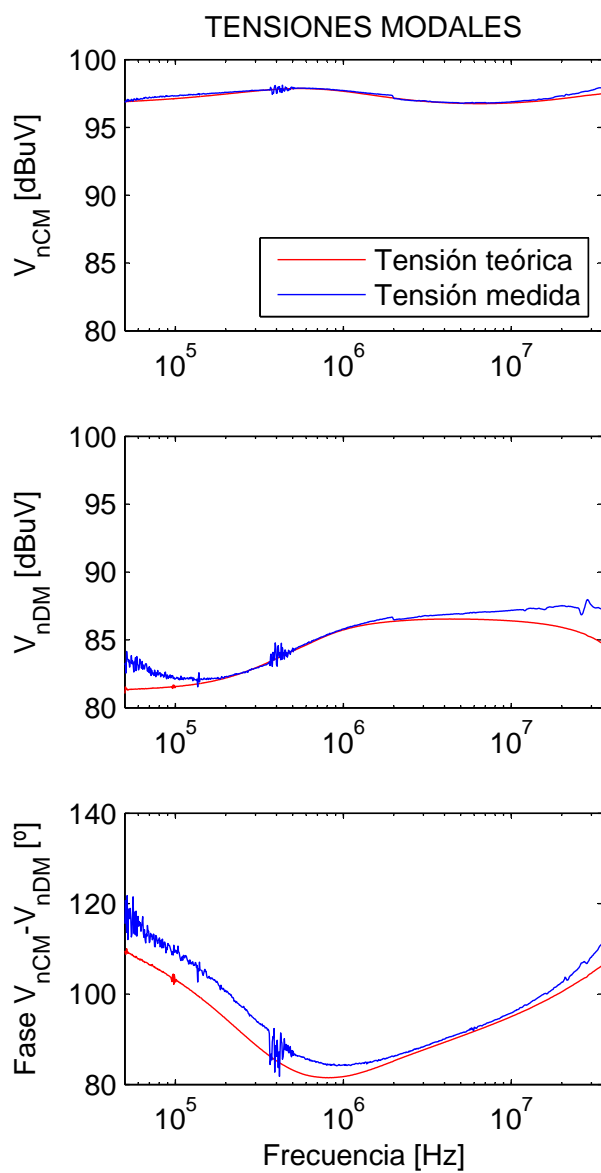


Figura 4.38: Comparación de fuentes de interferencia V_{nCM} , V_{nDM} medidas y teóricas para el circuito de prueba de la figura 4.36.

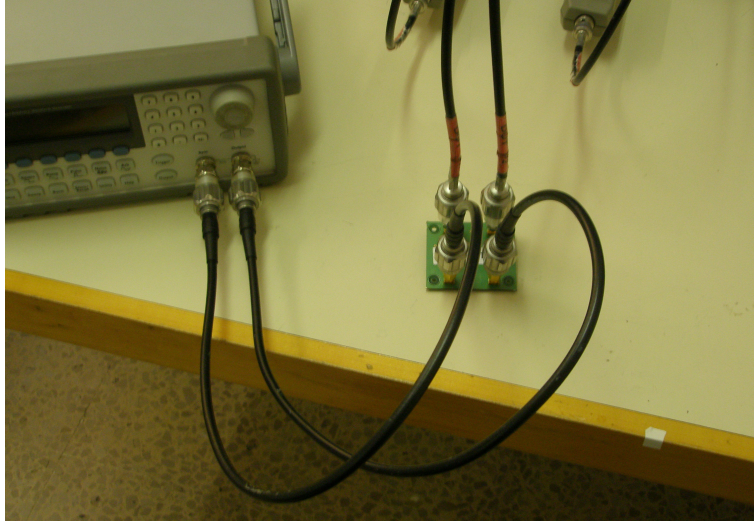


Figura 4.39: Circuito de prueba para la medida de fuentes de interferencia.

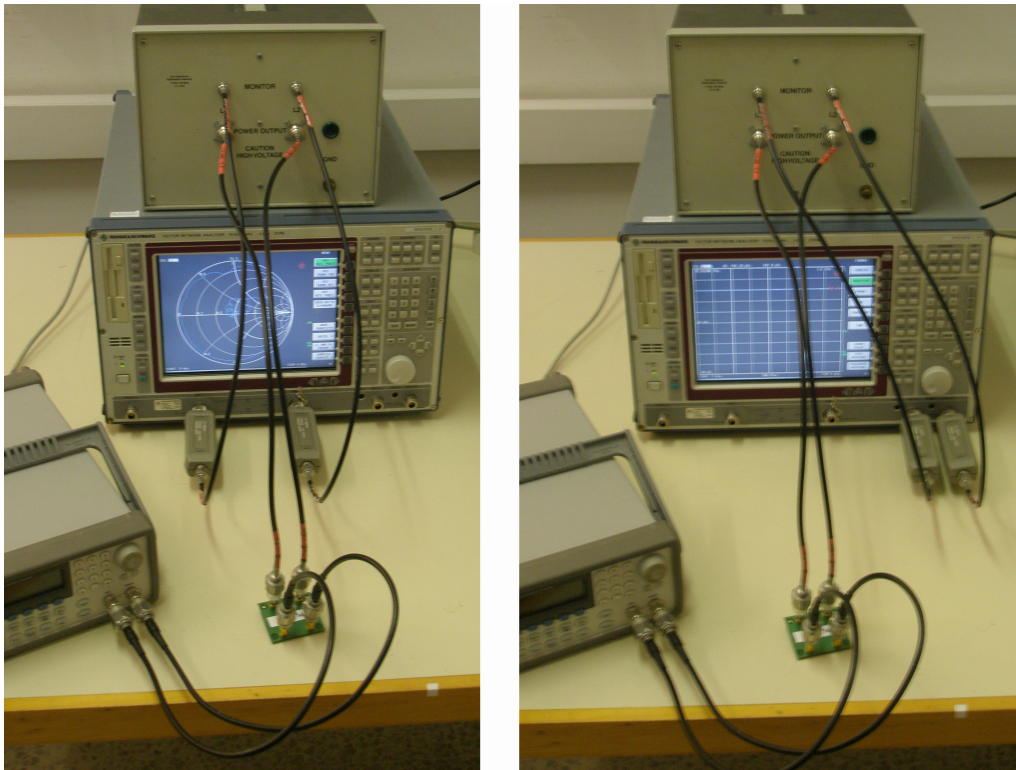


Figura 4.40: Medida de parámetros S (izquierda) y medida de tensiones (derecha).