

Modelos circuitales y modales de equipos reales

Este apartado muestra los modelos equivalentes completos (circuital y modal) medidos para dos equipos electrónicos diferentes: fuente de alimentación conmutada de ordenador personal de 200 W (figura 4.28) y transceptor HF comercial de 100 W transmitiendo una portadora modulada de 4 MHz en AM (figura 4.41).

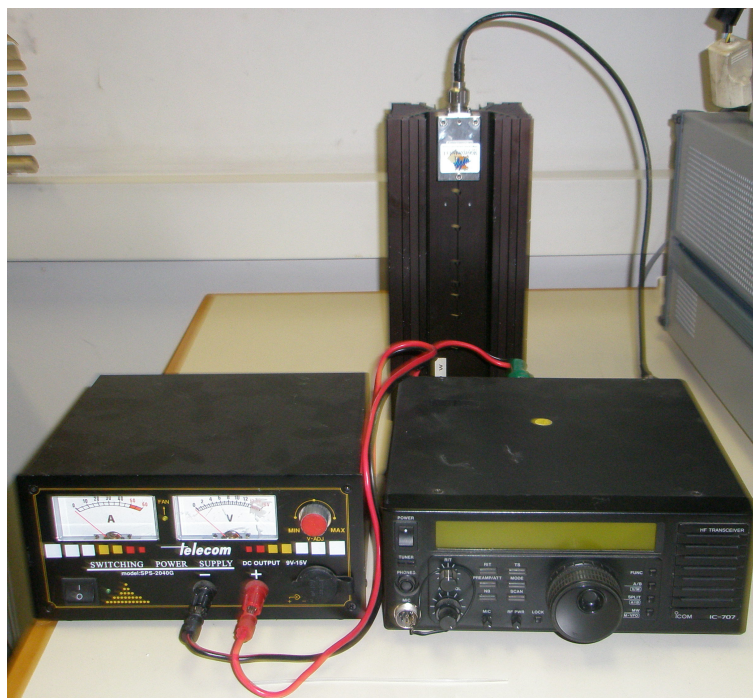


Figura 4.41: Transceptor HF de 100 W con fuente de alimentación y carga para conector de antena.

1. Fuente de alimentación conmutada

Las figuras 4.42 y 4.43 muestran el valor de las impedancias circuitales y modales de la fuente de alimentación conmutada. Se puede observar como en ciertas bandas de frecuencia el valor de la transimpedancia modal (Z_{TM}) es similar a los valores de la impedancia en modo común (Z_{CM}) y en modo diferencial (Z_{DM}), por lo que se puede prever una cierta conversión de modos en el equipo.

Las figuras 4.44 y 4.45 muestran el valor de las fuentes de tensión interferentes circuitales y modales. Se observan interferencias entre 60 KHz y 3 MHz cada 30 KHz, que es la frecuencia de conmutación del dispositivo. Las fuentes circuitales V_{nl} y V_{nn} presentan unas amplitudes muy similares, mientras que la contribución de la fuente modal V_{nCM} es notoriamente superior a la de V_{nDM} en la parte baja del espectro, lo que lleva a pensar que las interferencias producidas por la frecuencia de conmutación de la fuente se emiten sobretodo en modo común.

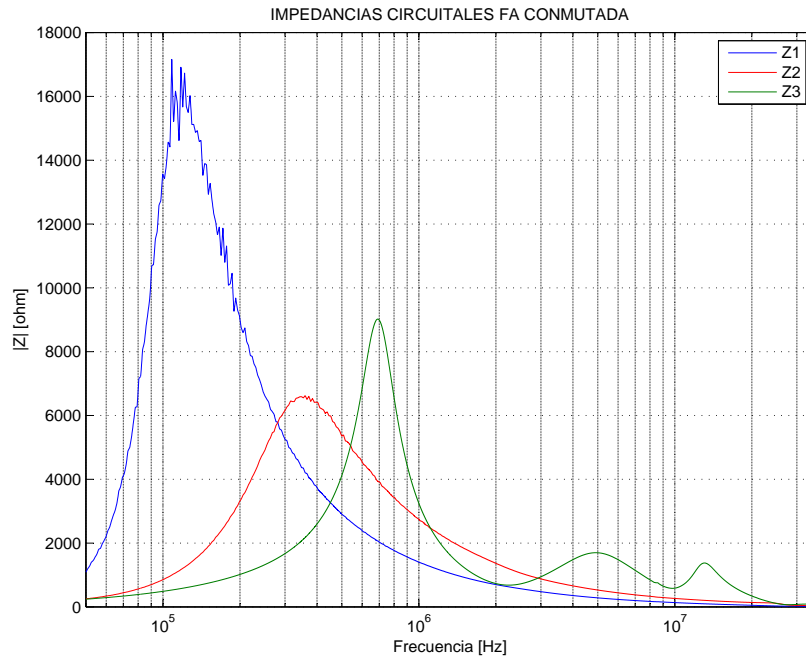


Figura 4.42: Impedancias circuitales para fuente de alimentación conmutada.

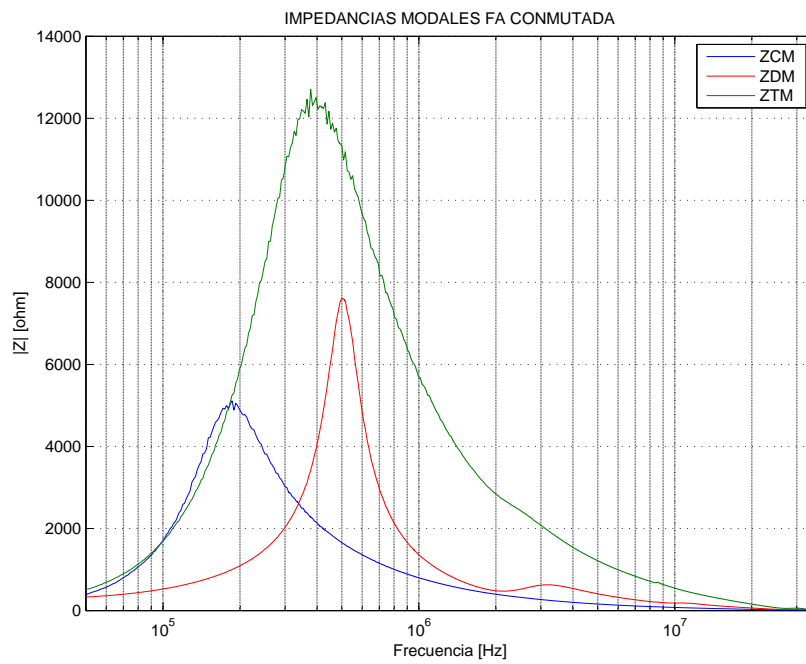


Figura 4.43: Impedancias modales para fuente de alimentación conmutada.

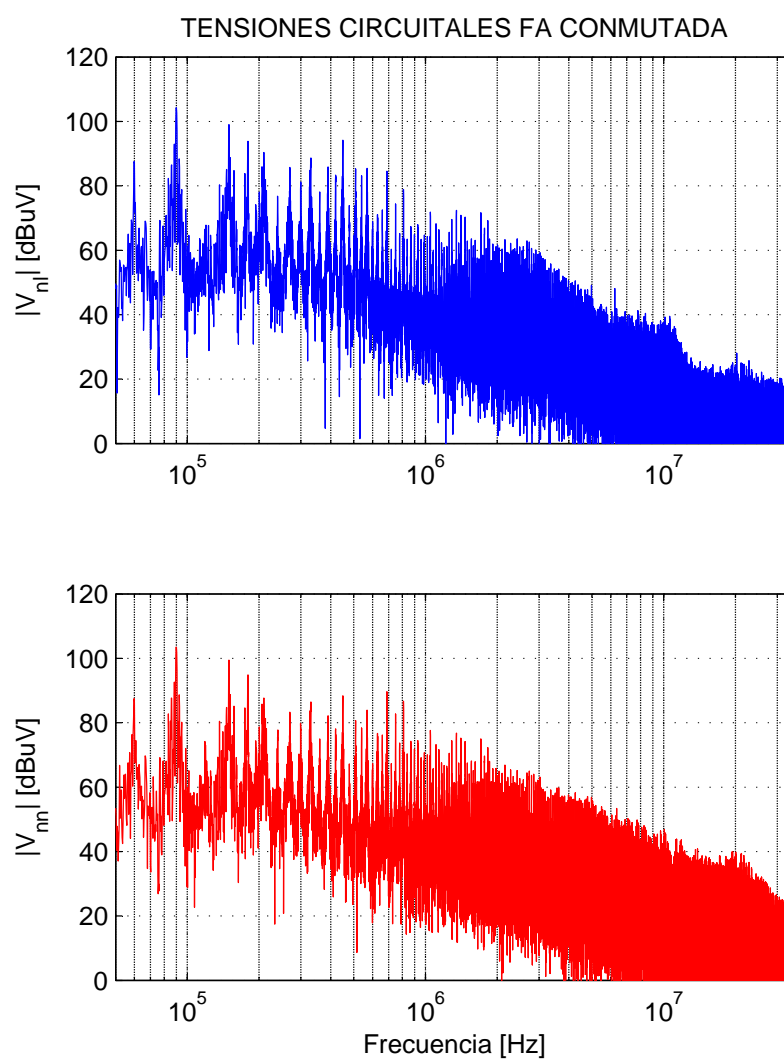


Figura 4.44: Fuentes de interferencia circuitales para fuente de alimentación conmutada.

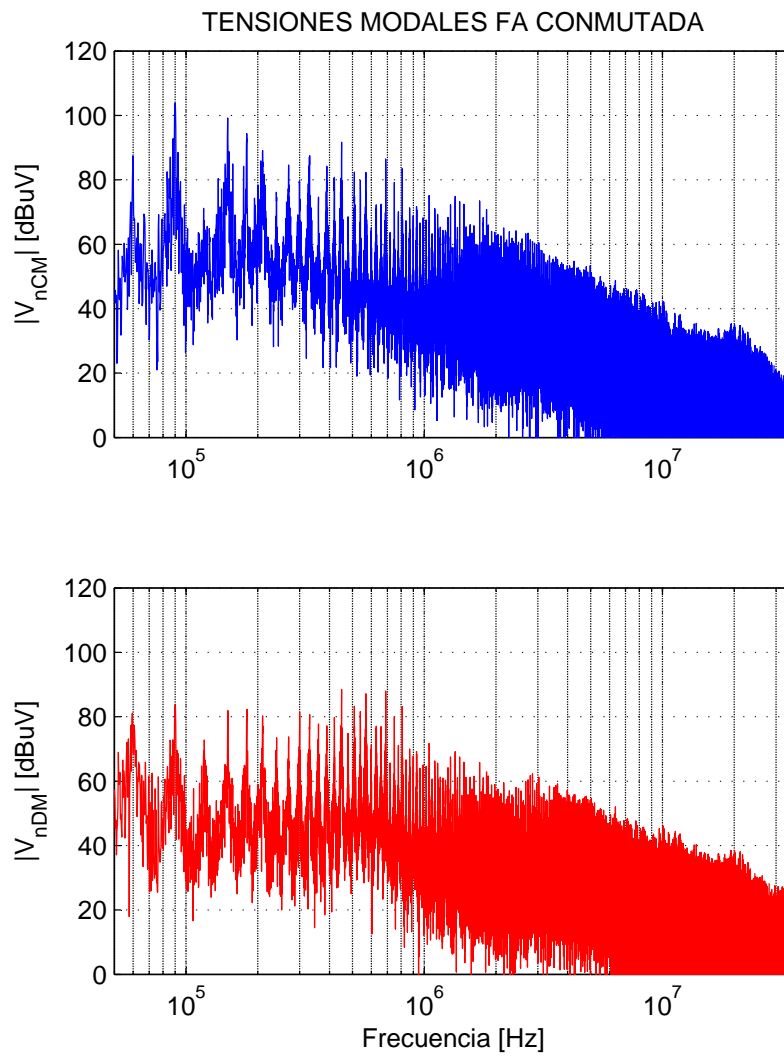


Figura 4.45: Fuentes de interferencia modales para fuente de alimentación conmutada.

2. Transceptor de HF

Las figuras 4.46 y 4.47 muestran el valor de las impedancias circuitales y modales del transceptor HF. Por lo general, los valores de Z_{TM} son superiores a los de Z_{CM} y Z_{DM} , excepto entre 150 y 200 KHz, banda en que la transimpedancia modal y la impedancia en modo común son similares.

Las figuras 4.48 y 4.49 muestran el valor de las fuentes de tensión interferentes circuitales y modales. Se observa un conjunto de interferencias entre 50 KHz y 2 MHz generadas por la fuente de alimentación del transceptor, además de interferencias a múltiplos de la frecuencia portadora de 4 MHz. En este caso también la emisión del equipo es predominantemente en modo común.

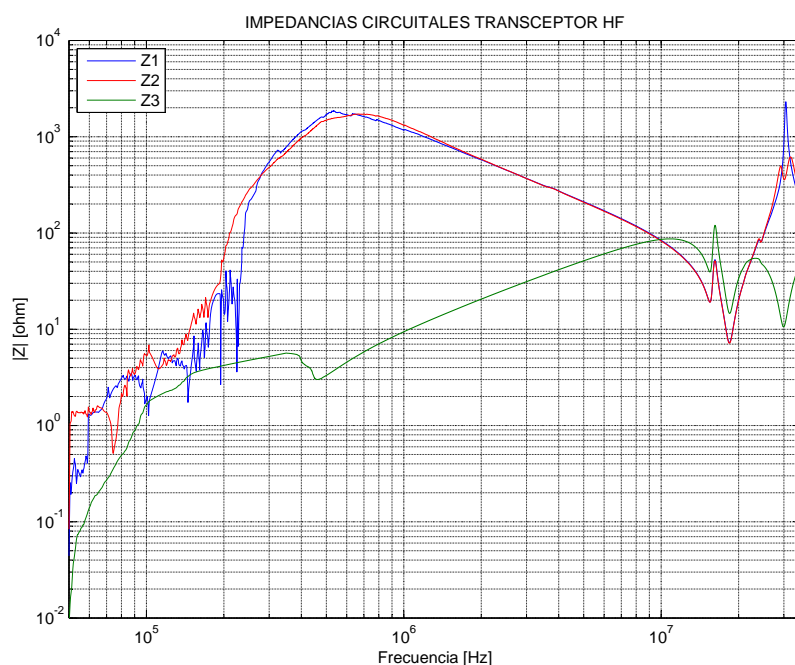


Figura 4.46: Impedancias circuitales para transceptor HF.

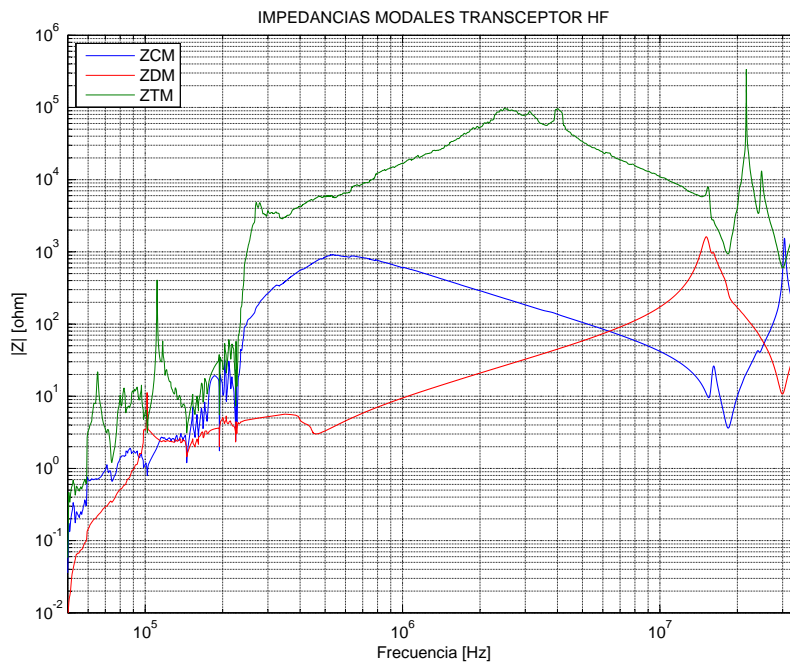


Figura 4.47: Impedancias modales para transceptor HF.

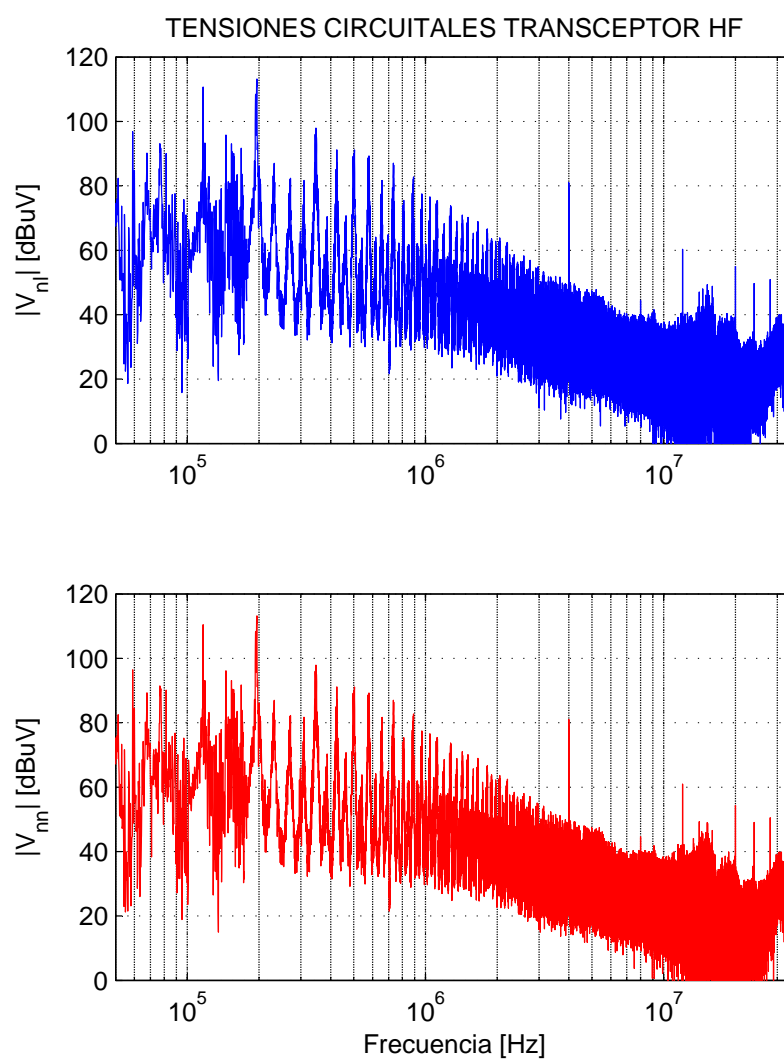


Figura 4.48: Fuentes de interferencia circuitales para transceptor HF.

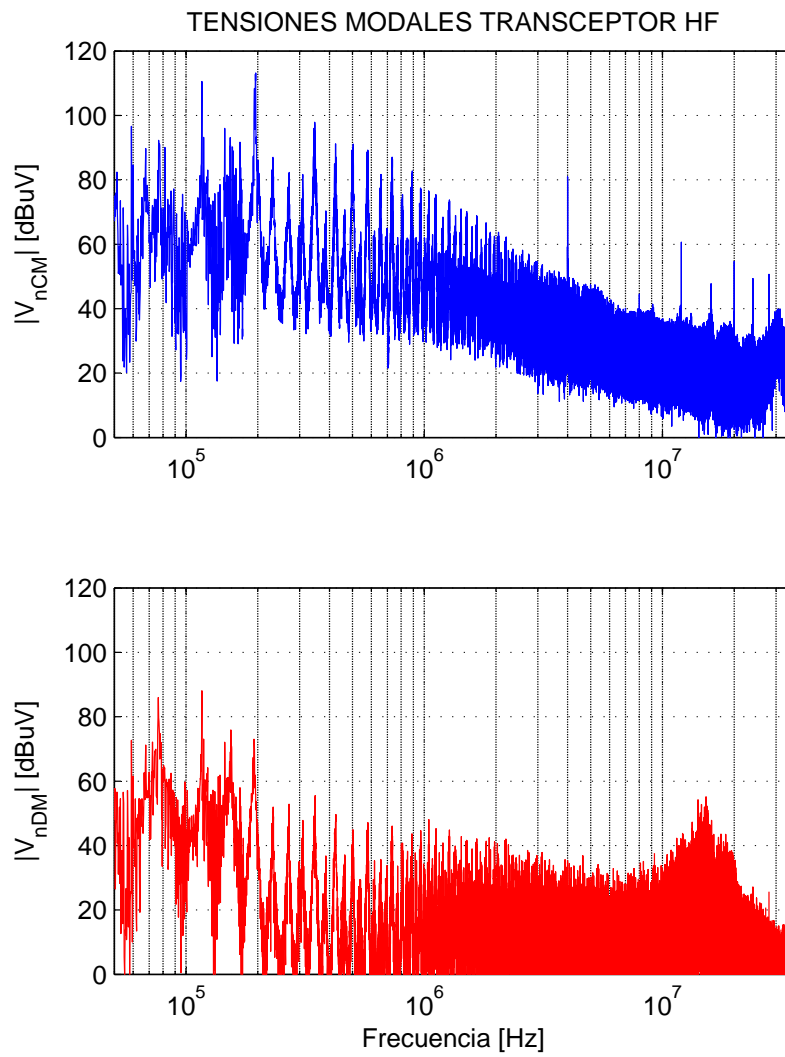


Figura 4.49: Fuentes de interferencia modales para transceptor HF.

Capítulo 5

PREDICCIÓN EMISIÓN CONDUcida MEDIANTE MODELOS EQUIVALENTES

Contenidos de este capítulo

5.1. Introducción	108
5.2. Predicción circuital	108
5.3. Predicción modal	111
5.4. Resultados experimentales	112
5.4.1. Circuito de test	112
Predicción emisión conducida	112
Comparación con predicción ofrecida por estándares actuales	117
5.4.2. Transceptor HF	118
Predicción emisión conducida	118
Comparación con predicción ofrecida por estándares actuales	121
5.4.3. Fuente de alimentación conmutada	121

Hasta aquí se ha analizado el comportamiento de filtros de red y equipos electrónicos mediante sus modelos equivalentes circuitales y modales. Este capítulo emplea dichos modelos para desarrollar una nueva metodología capaz de predecir con exactitud la emisión conducida generada por un equipo electrónico conectado a un filtro de red.

5.1. Introducción

Los estándares y métodos de medida actuales no permiten predecir con exactitud el nivel de interferencia conducida que un equipo electrónico conectado a un filtro de red suministra a la red eléctrica (o a su equivalente normalizado, la LISN). Este capítulo pretende, a partir de los modelos equivalentes hallados para ambos dispositivos (filtros de red y equipos electrónicos), desarrollar una nueva metodología que permita predecir de manera correcta el nivel de las interferencias en los terminales de línea del filtro de red, sea cual sea la configuración de filtro, equipo y red que se presente [71].

De nuevo, la predicción de las interferencias se aborda bajo dos puntos de vista: circuital (considerando señales en los terminales de línea y neutro) y modal (considerando señales en modo común y modo diferencial). El punto de vista multimodal facilita la comprensión de algunos fenómenos, como la pérdida de eficiencia del filtro de red o el intercambio modal debido a desadaptaciones y asimetrías entre filtro y equipo.

5.2. Predicción circuital

Para llevar a cabo una predicción circuital de los niveles de interferencia conducida generados por un equipo electrónico conectado a un filtro de red se han de seguir los siguientes pasos:

1. Caracterización circuital del filtro de red mediante sus parámetros S medidos (apartado 3.2).
2. Caracterización circuital del equipo electrónico mediante una red de tres impedancias en pi más dos fuentes de tensión interferentes (apartado 4.2.2).
3. Caracterización circuital de la red eléctrica, tal y como se describe más adelante.
4. Simulación combinada de los tres modelos previos mediante un simulador de circuitos comercial o la programación directa de sus ecuaciones. La figura 5.1 muestra los elementos utilizados en la simulación: modelos circuitales del equipo electrónico, el filtro de red y la red eléctrica. El resultado que se obtendrá de la simulación son los valores de las tensiones V_L y V_N en función de la frecuencia.

En cuanto al modelo circuital utilizado en la simulación para caracterizar la red eléctrica, se pueden emplear tres variantes distintas:

1. Modelo de impedancia nominal de una LISN estandarizada (por ejemplo 50Ω || $50 \mu\text{H}$ si se desea emular el estándar [29] (figura 5.2(a))). Este modelo resulta

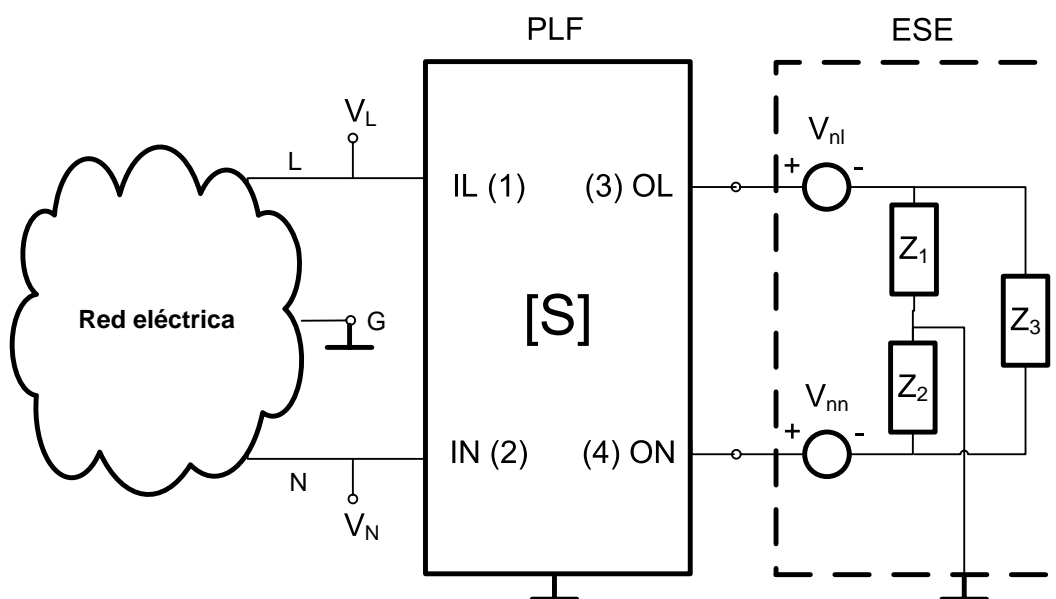


Figura 5.1: Simulación circuital de un equipo electrónico (ESE) con un filtro de red (PLF).

interesante de cara a comparar los niveles de interferencia conducida en los terminales de línea del filtro de red con los límites establecidos por las normas de Compatibilidad Electromagnética en ensayos de emisión conducida [29] para la certificación de equipos electrónicos.

2. Parámetros S reales de la LISN utilizada en una medida eventual (figura 5.2(b)), los cuales se pueden medir utilizando el procedimiento descrito en los apartados 3.2 y 3.4. Para caracterizar una LISN como un dispositivo de cuatro puertos, los terminales que están en contacto con la red eléctrica (" $L_{RE} - G$ ", " $N_{RE} - G$ ") no se tienen en cuenta, ya que éstos están lo suficientemente aislados del resto como para que la red no afecte a las medidas. En la simulación, los puertos de medida de la LISN (" $L_{monitor} - G$ ", " $N_{monitor} - G$ ") se cargan con 50Ω . Este modelo de red eléctrica es más preciso que el anterior, ya que considera los parámetros de la LISN real en el sistema de medida.
3. Impedancia real que presenta la red eléctrica en el punto concreto donde se encuentra conectado el equipo electrónico (figura 5.2(c)). En [58], [61], [62] se proponen varias técnicas para medir la impedancia de la red eléctrica, las cuales se deberían adaptar para obtener un modelo circuital de la red similar al mostrado en la figura 4.3.

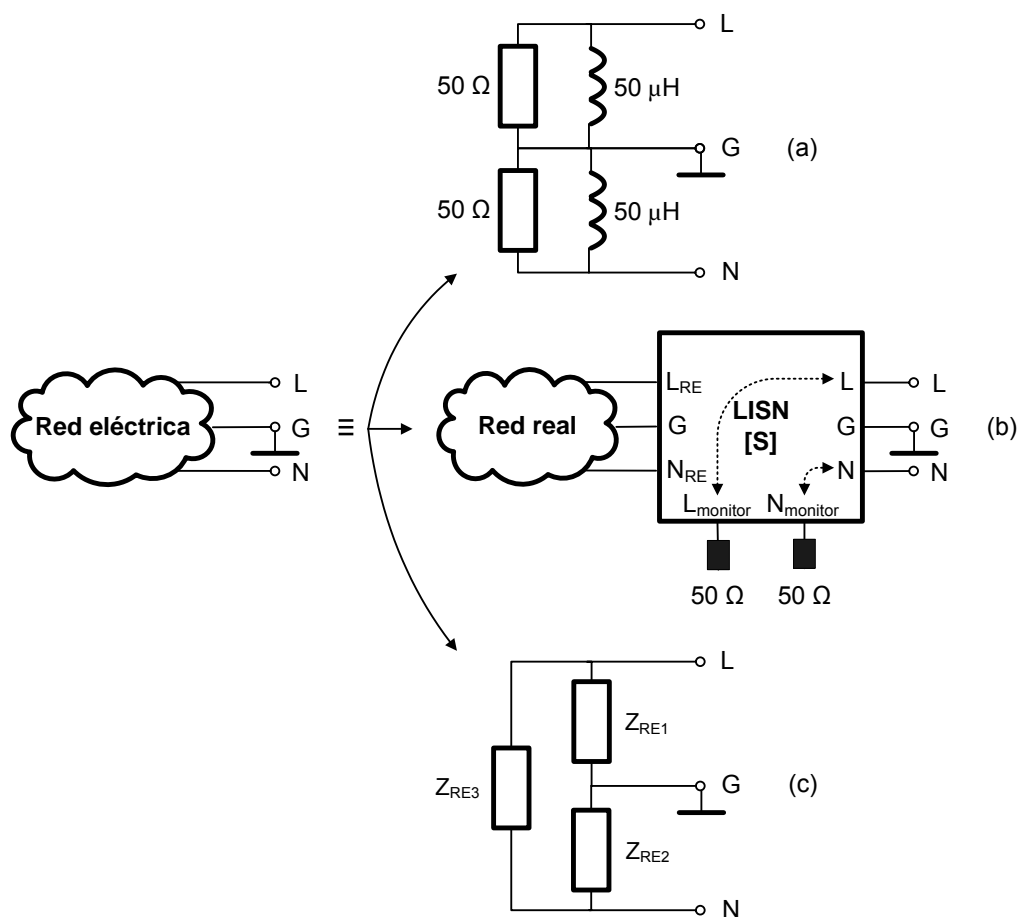


Figura 5.2: Modelos circuitales equivalentes para la red eléctrica: (a) modelo de impedancia nominal de una LISN estandarizada; (b) modelo real de la LISN empleada; (c) modelo real de la red eléctrica.

5.3. Predicción modal

Para llevar a cabo una predicción modal de los niveles de interferencia conducida generados por un equipo electrónico conectado a un filtro de red (tensiones en modo común y en modo diferencial en los terminales de línea del filtro) se han de seguir los siguientes pasos:

1. Caracterización modal del filtro de red mediante sus parámetros S modales, los cuales se han calculado a partir de los medidos (apartado 3.3).
2. Caracterización modal del equipo electrónico mediante una red de tres impedancias en pi más dos fuentes de tensión interferentes (apartado 4.2.3).
3. Caracterización modal de la red eléctrica, que se obtiene a partir de la caracterización circuital descrita en el apartado 5.2 usando los procedimientos de transformación matemáticos presentados en el apartado 4.1.3 para los modelos de las figuras 5.2(a) y 5.2(c), y apartado 3.3 para el modelo de la figura 5.2(b).
4. Simulación combinada de los tres modelos previos mediante un simulador de circuitos comercial o la programación directa de sus ecuaciones. La figura 5.3 muestra los elementos utilizados en la simulación: modelos modales del equipo electrónico, el filtro de red y la red eléctrica. El resultado que se obtendrá de la simulación son los valores de las tensiones V_{CM} y V_{DM} en función de la frecuencia.

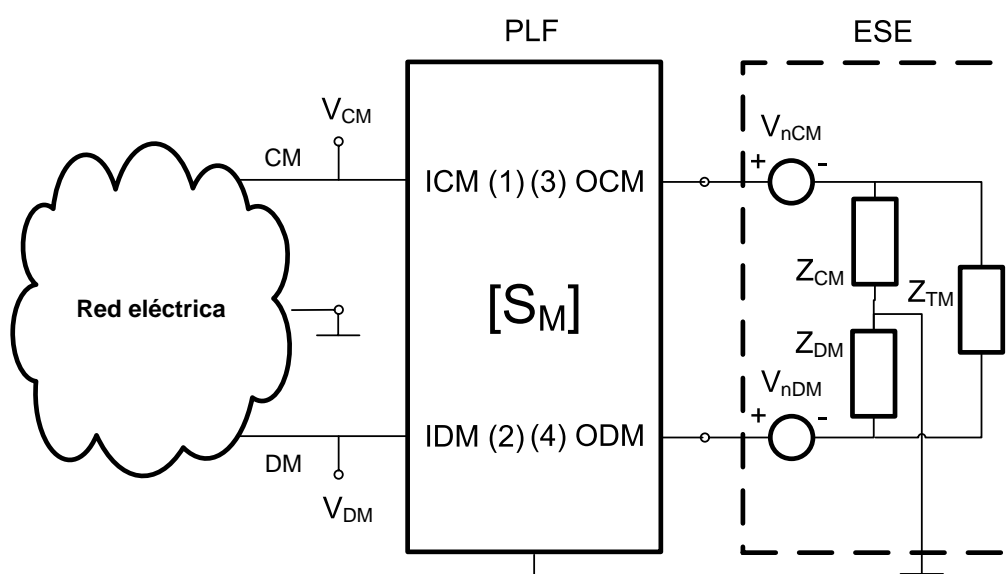


Figura 5.3: Simulación modal de un equipo electrónico (ESE) con un filtro de red (PLF).

El hecho de haber modelado de manera modal el conjunto de dispositivos al completo va a permitir identificar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de las interferencias. Por ejemplo, si hay una desadaptación entre la salida en modo común del equipo electrónico y el puerto OCM(3) del filtro de red, este modo será reflejado hacia el equipo. Si el equipo tiene una transimpedancia modal (Z_{TM}) baja, éste convertirá parte de este modo común reflejado en modo diferencial, variando la cantidad de emisión conducida en modo diferencial. Por tanto, este modelado modal puede explicar, por ejemplo, por qué una desadaptación en el filtro al modo común puede producir un incremento de la emisión conducida en modo diferencial.

5.4. Resultados experimentales

Para validar la metodología de predicción de interferencias conducidas propuesta en este capítulo se han empleado tres equipos electrónicos: un circuito de prueba (figuras 4.36 y 4.39), un transceptor HF comercial de 100 W transmitiendo una portadora modulada de 4 MHz en AM (figura 4.41) y una fuente de alimentación conmutada de ordenador personal de 200 W (figura 4.28). Estos dispositivos son los mismos que se han utilizado en el capítulo 4 para hallar sus modelos equivalentes circuitales y modales. A continuación se muestran los resultados de la predicción obtenidos para cada uno de estos equipos electrónicos.

5.4.1. Circuito de test

Predicción emisión conducida

Una vez hallados los modelos equivalentes circuitales (figura 4.32) y modal (figura 4.33) del circuito de prueba de la figura 4.36, se emplean éstos, junto con los modelos circuitales y modales del filtro de red Belling Lee (figuras 3.2 y 3.3) y la LISN empleada en estos ensayos (emulando la red eléctrica), para predecir el nivel de interferencia conducida en los terminales de línea del filtro de red, tanto desde un punto de vista circuitales (figura 5.1) como modal (figura 5.3).

Para comprobar la viabilidad de la predicción llevada a cabo, se ha usado un sistema de medida como el de la figura 5.4, compuesto por una LISN y un analizador de espectros vectorial. Esta configuración permite medir las tensiones V_L y V_N (sus amplitudes y fase relativa) para ser comparadas con los valores ofrecidos por la predicción circuitales. La figura 5.5 muestra el conexionado de los elementos que conforman el sistema de medida siguiendo el esquema descrito en la figura 5.4.

La figura 5.6 compara los valores medidos V_L y V_N con los valores extraídos de la predicción circuitales, mostrando buena similitud entre ambas gráficas.

Una vez las tensiones circuitales (V_L , V_N) han sido medidas, mediante la ecuación 4.44 se obtienen las tensiones en modo común y en modo diferencial (V_{CM} , V_{DM}) en

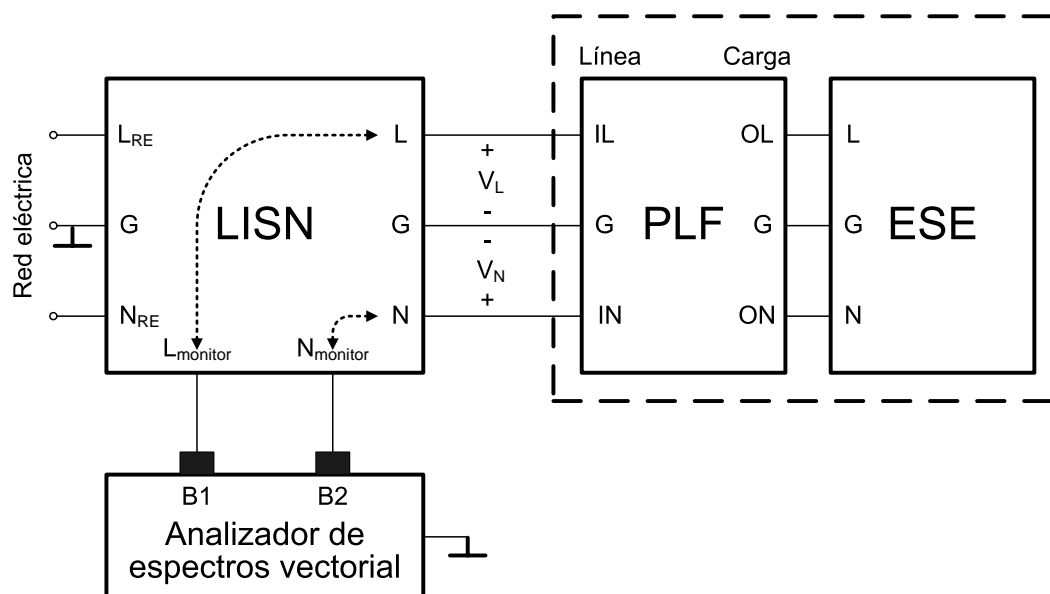


Figura 5.4: Diagrama de bloques del sistema de medida de tensiones en los terminales de línea del filtro de red.

los terminales de línea del filtro de red, que se comparan con los valores ofrecidos por la predicción modal (figura 5.7). Se obtiene de nuevo buena similitud entre medida y predicción, hecho que valida la metodología de predicción propuesta en este capítulo.

Para corroborar la importancia que tiene la caracterización modal completa de equipos electrónicos, se ha realizado una predicción modal de la emisión conducida del circuito de prueba de la figura 4.36, pero esta vez suponiendo una $Z_{TM} = \infty$ para emular una caracterización del ESE que sólo tenga en cuenta sus impedancias en modo común y en modo diferencial. Debido a que no existe conexión entre modo común y modo diferencial en el ESE, las reflexiones que se producen en los terminales de carga del filtro de red (debido a desadaptaciones en las impedancias de modo común y de modo diferencial entre el filtro y el equipo) y que regresan al ESE no son convertidas al otro modo por Z_{TM} . Por tanto, dichas reflexiones no contribuyen a la generación del otro modo, tal y como sucede en dispositivos reales. El cuadro 5.1 compara (en dos frecuencias seleccionadas) los niveles medidos de interferencia en modo común y modo diferencial en los terminales de línea del filtro de red con los niveles extraídos de la simulación modal suponiendo $Z_{TM} = \infty$. También se apuntan en dicho cuadro los valores extraídos de la simulación modal correspondientes a la figura 5.7 (con Z_{TM}). Como se puede observar, los niveles ofrecidos por la predicción sin Z_{TM} no coinciden con los medidos. Este hecho demuestra que en el diseño de un filtro de red óptimo para un equipo electrónico concreto se ha de considerar el modelo modal completo de este último para tener presentes todas las posibles conversiones modales que pueden afectar al comportamiento del filtro, por contra de lo

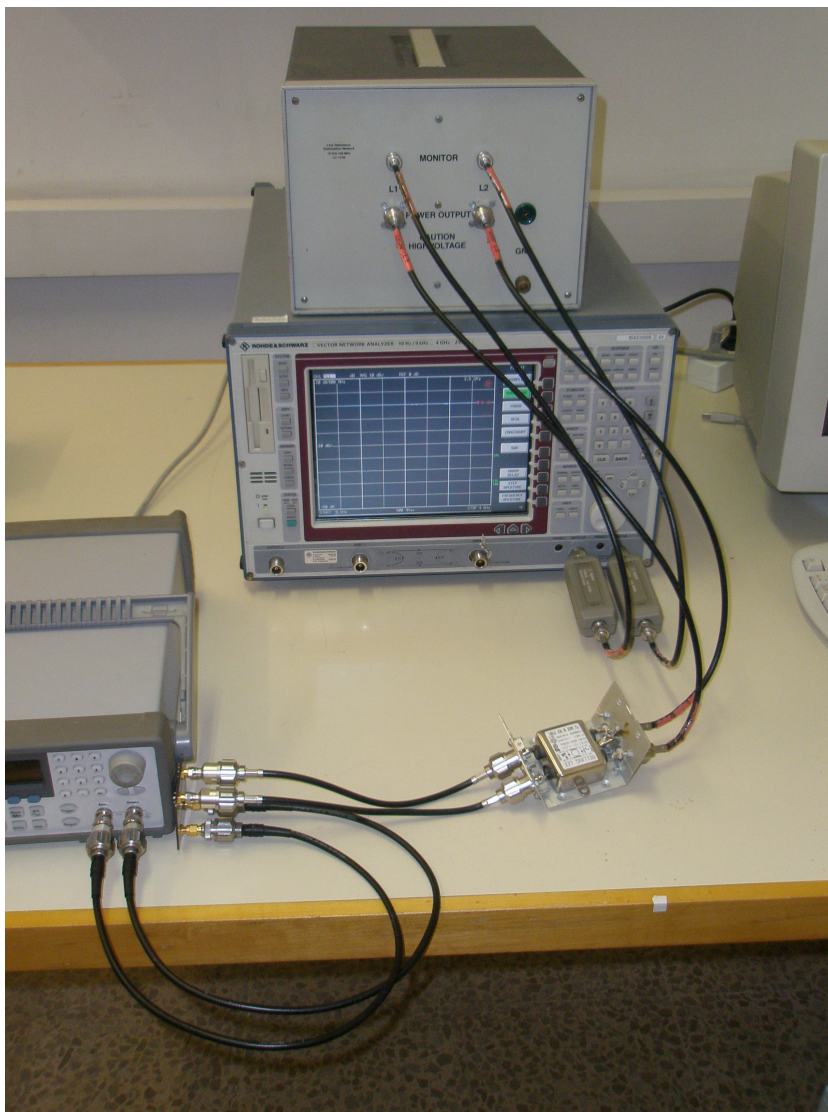


Figura 5.5: Medida de tensiones en los terminales de línea del filtro de red.

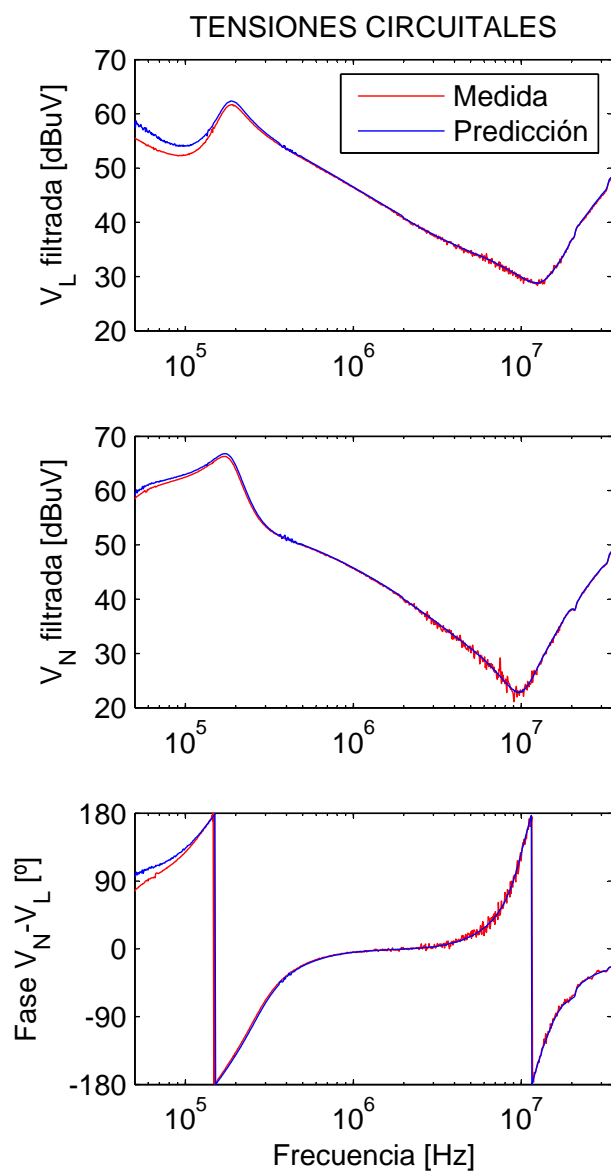


Figura 5.6: Comparación de tensiones circuitales (V_L , V_N) medidas y predichas para el circuito de prueba de la figura 4.36 + filtro de red Belling Lee.

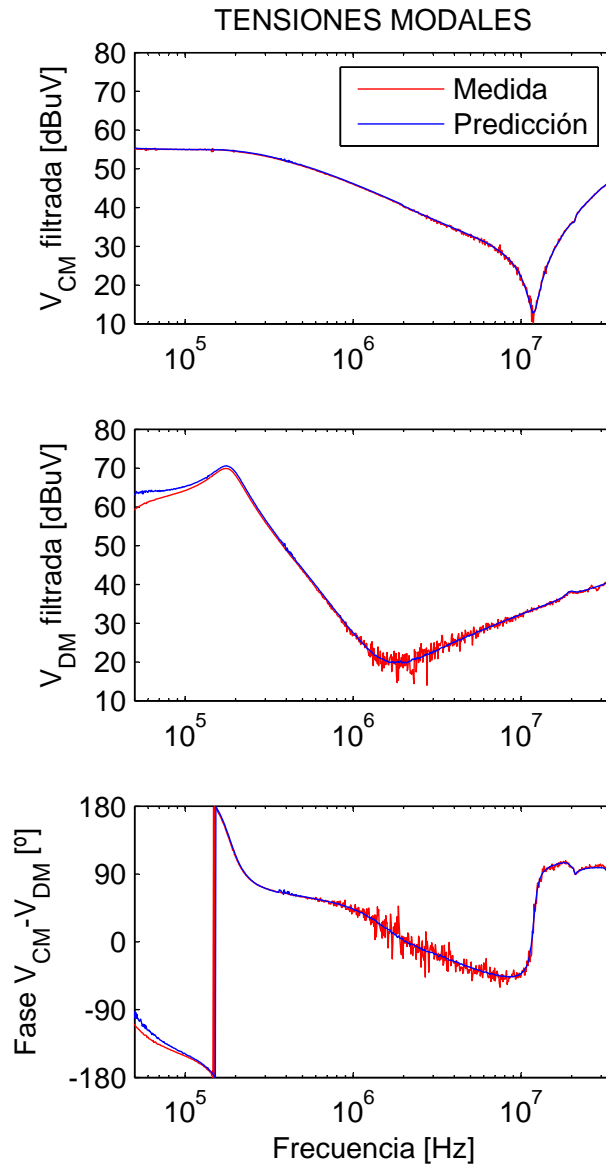


Figura 5.7: Comparación de tensiones modales (V_{CM} , V_{DM}) medidas y predichas para el circuito de prueba de la figura 4.36 + filtro de red Belling Lee.

actual. Como se puede observar en este ejemplo, no sólo la conversión modal propia del filtro de red puede degradar su comportamiento, sino también las interacciones (originadas por desadaptaciones) del filtro con los mecanismos de conversión modal del equipo.

Tensiones [dBuV]	176740 Hz	301155 Hz
V_{CM} medida	54.76	53.25
V_{CM} predicha sin Z_{TM}	52.36	50.11
V_{CM} predicha con Z_{TM}	54.83	53.43
V_{DM} medida	69.89	55.94
V_{DM} predicha sin Z_{TM}	63.02	49.38
V_{DM} predicha con Z_{TM}	70.58	56.61

Cuadro 5.1: Comparación de tensiones modales (V_{CM} , V_{DM}) medidas y predichas con $Z_{TM} = \infty$ para el circuito de prueba de la figura 4.36 + filtro de red Belling Lee.

Comparación con predicción ofrecida por estándares actuales

El estándar actual empleado para caracterizar filtros de red [13], basado en medidas de atenuación en modo común y modo diferencial con impedancias de línea y carga de 50Ω , presenta dos inconvenientes:

- Si las cargas reales del filtro de red tienen una impedancia que difiere la de medida (50Ω), la eficiencia del filtro disminuye y el resultado no es el esperado.
- Si se produce una conversión de modos (de común a diferencial y viceversa) en los terminales de línea y carga del filtro (debida a asimetrías en la constitución del mismo), ésta no es detectada, con lo que el resultado tampoco es el esperado.

Sin embargo, es una práctica común entre los ingenieros de EMC calcular los valores esperados de emisión conducida simplemente restando a la interferencia generada por el equipo (sin el filtro) los valores de atenuación en modo común y modo diferencial del filtro de red determinados mediante [13]. Esta aproximación al problema puede suponer errores significativos; errores que se pueden evitar empleando los conocimientos presentados en este trabajo de investigación. La figura 5.8 compara las tensiones en modo común y modo diferencial acuerdo a esta práctica común con los valores reales medidos de la interferencia modal en los terminales de línea del filtro de red. Como se puede observar, el error cometido es significativo si lo comparamos con los resultados obtenidos utilizando la metodología de predicción descrita en este capítulo (figura 5.7).

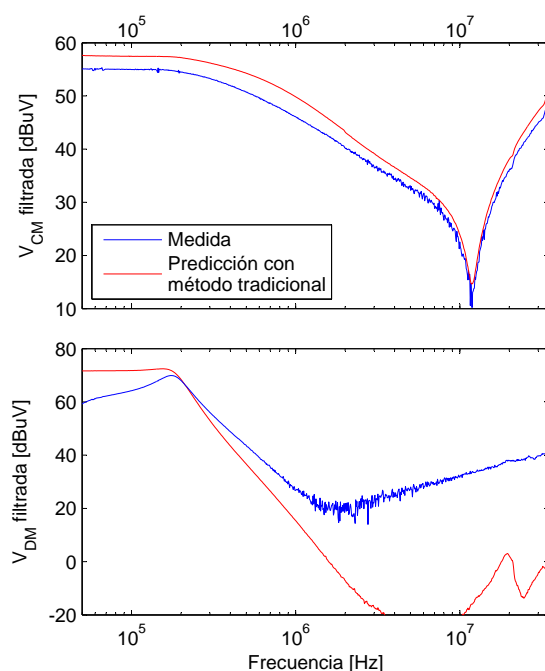


Figura 5.8: Comparación entre la emisión conducida real (medida) y la aproximada por el método tradicional basado en el estándar ANSI C63.13 [13]. Circuito de prueba figura 4.36 + filtro de red Belling Lee.

5.4.2. Transceptor HF

Predicción emisión conducida

Se ha aplicado el procedimiento expuesto en el apartado 5.2 al transceptor HF de la figura 4.41:

1. Medida del modelo circuital del ESE y cálculo del modelo modal.
2. Medida de los parámetros S del filtro de red Konfektronic GMBH 2A y cálculo de los parámetros S modales a partir de los circuitales.
3. Medida de las tensiones circuitales en los terminales de línea del filtro de red (V_L, V_N), empleando la configuración de la figura 5.4, y cálculo de las tensiones modales (V_{CM}, V_{DM}) a partir de las anteriores.
4. Predicción de las tensiones V_L, V_N (figura 5.1) y V_{CM}, V_{DM} (figura 5.3) empleando la metodología presentada en este capítulo.

Las figuras 5.9 y 5.10 comparan los valores medidos y predichos de las magnitudes V_L, V_N y V_{CM}, V_{DM} respectivamente. Teniendo en cuenta que interferencias medidas por debajo de $10 \text{ dB}\mu\text{V}$ son enmascaradas por el ruido de fondo del sistema,

el error entre medida y predicción en las frecuencias interferentes que sobrepasan dicho umbral no excede de 6 dB. En la banda alta del espectro se observan picos de interferencia medidos que no aparecen en la predicción. Estos espúreos los genera el propio analizador de espectros vectorial con el que se realiza la medida, y no el equipo electrónico, motivo por el cual no aparecen en los resultados de la predicción.

La buena similitud entre medida y predicción que reflejan las figuras 5.9 y 5.10 valida la metodología propuesta como herramienta de predicción de niveles de emisión conducida. Si se comparan estas dos figuras con 4.48 y 4.49 (tensiones circuitales y modales de las fuentes de interferencia de los modelos circuital y modal respectivamente), se observa como el filtro de red empleado atenúa los niveles de interferencia producidos por el equipo electrónico.

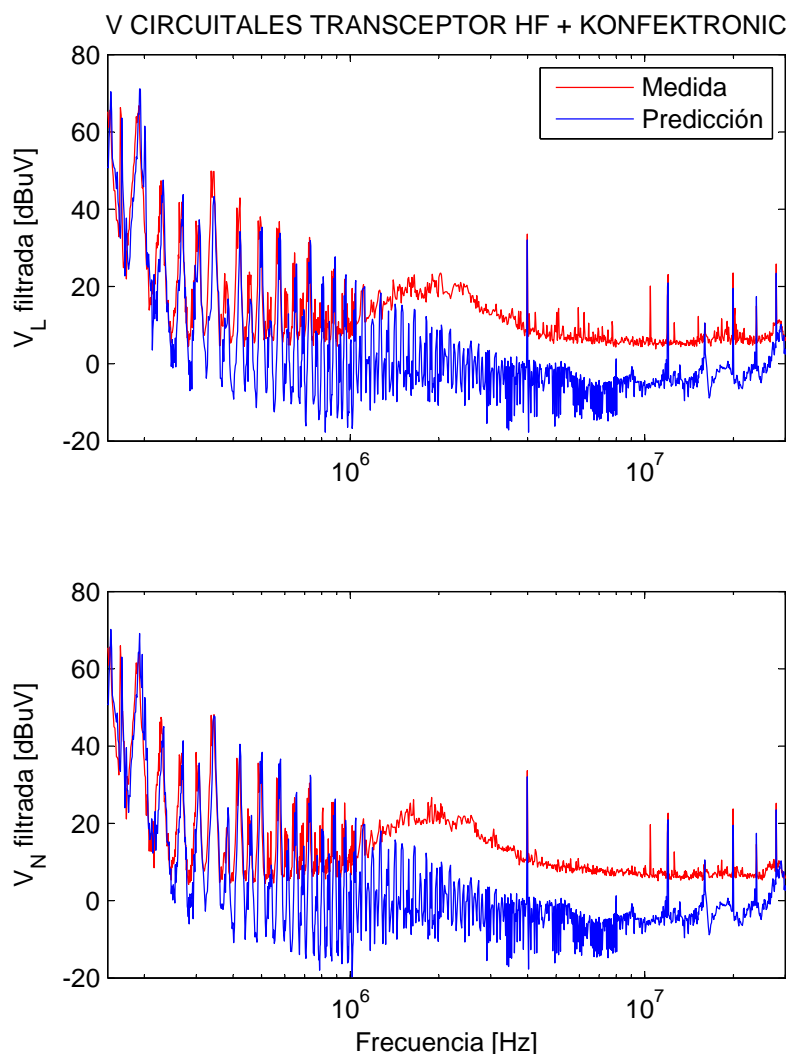


Figura 5.9: Comparación de tensiones circuitales (V_L , V_N) medidas y predichas para el transceptor HF + filtro de red Konfektronic.

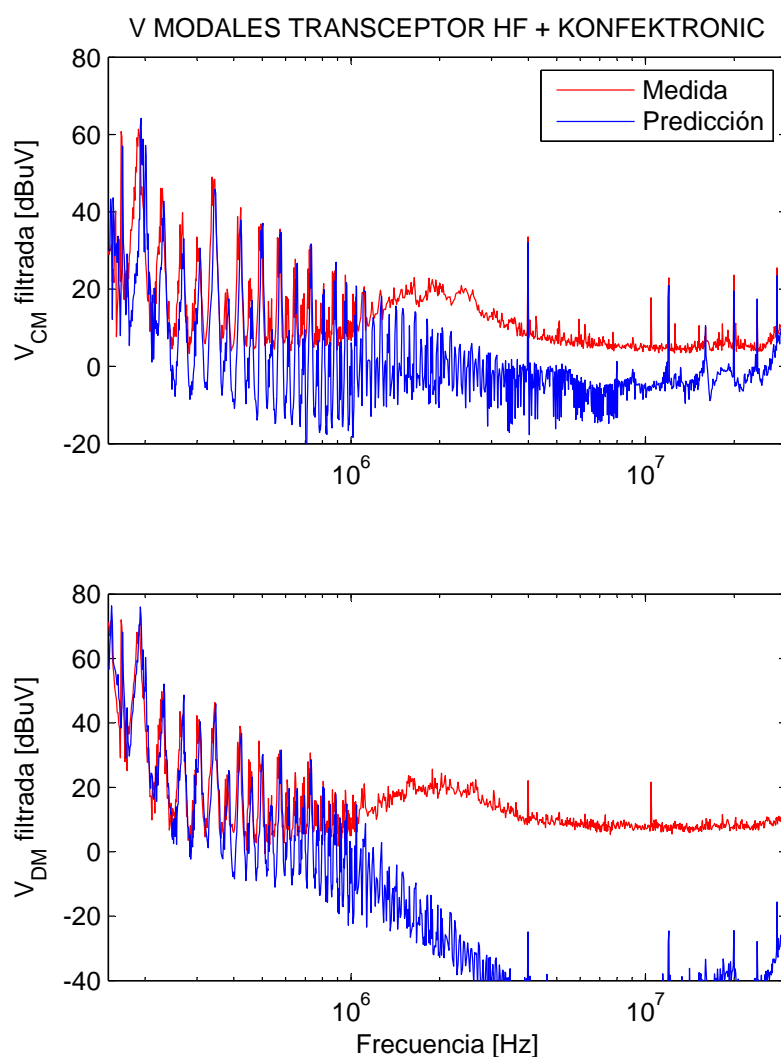


Figura 5.10: Comparación de tensiones modales (V_{CM} , V_{DM}) medidas y predichas para el transceptor HF + filtro de red Konkektronic.

Por tanto, queda demostrado que es posible, utilizando los modelos y metodología presentados en este trabajo, predecir los niveles de emisión conducida (circuitales y modales) que un equipo electrónico cargado con un filtro de red suministra a la red eléctrica (en este ejemplo con su comportamiento controlado con una LISN, como en estándares de medida de Compatibilidad Electromagnética [29]). Esta aproximación puede resultar muy útil en el diseño de un equipo electrónico, ya que sus niveles de emisión conducida se pueden predecir fácilmente cuando éste se carga con un filtro de red previamente medido y caracterizado. De esta manera, se pueden ahorrar largas y costosas sesiones de montaje y medida de filtros: el ESE se mide una vez (para obtener sus modelos circuital y modal), y su comportamiento se puede predecir fácil y rápidamente empleando la metodología propuesta cuando se carga con un conjunto

de filtros previamente medidos y caracterizados.

Comparación con predicción ofrecida por estándares actuales

Al igual que antes, se compara la metodología de predicción propuesta aquí con la posible predicción que se puede llevar a cabo empleando las atenuaciones del filtro dadas por el estándar ANSI C63.13 [13]. La figura 5.11 compara las tensiones modales común y diferencial predichas de acuerdo a la práctica común, descrita en el ejemplo anterior (apartado 5.4.1), con los valores medidos reales. Como se puede observar, el error cometido puede ser alto (hasta 20 dB en algunas frecuencias), y esto es peor que la predicción llevada a cabo por la metodología aquí propuesta. De nuevo se corrobora lo adecuada que resulta la metodología planteada.

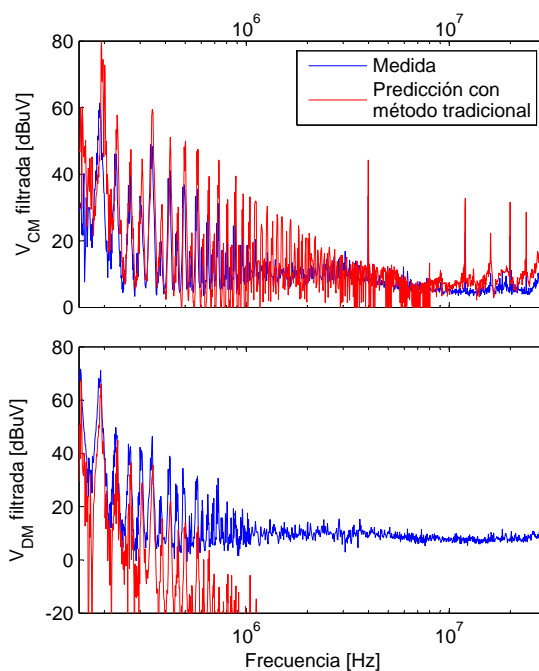


Figura 5.11: Comparación entre la emisión conducida real (medida) y la aproximada por el método tradicional basado en el estándar ANSI C63.13 [13]. Transceptor HF + filtro de red Konkektronic.

5.4.3. Fuente de alimentación conmutada

Este apartado aplica de nuevo el procedimiento de predicción de emisiones conducidas a la fuente de alimentación conmutada (figura 4.28) junto al filtro de red Belling Lee. Las figuras 5.12 y 5.13 comparan los valores medidos y predichos de las magnitudes V_L , V_N y V_{CM} , V_{DM} respectivamente. De nuevo, el sistema de predicción detecta correctamente las frecuencias interferentes a la salida del filtro de red.

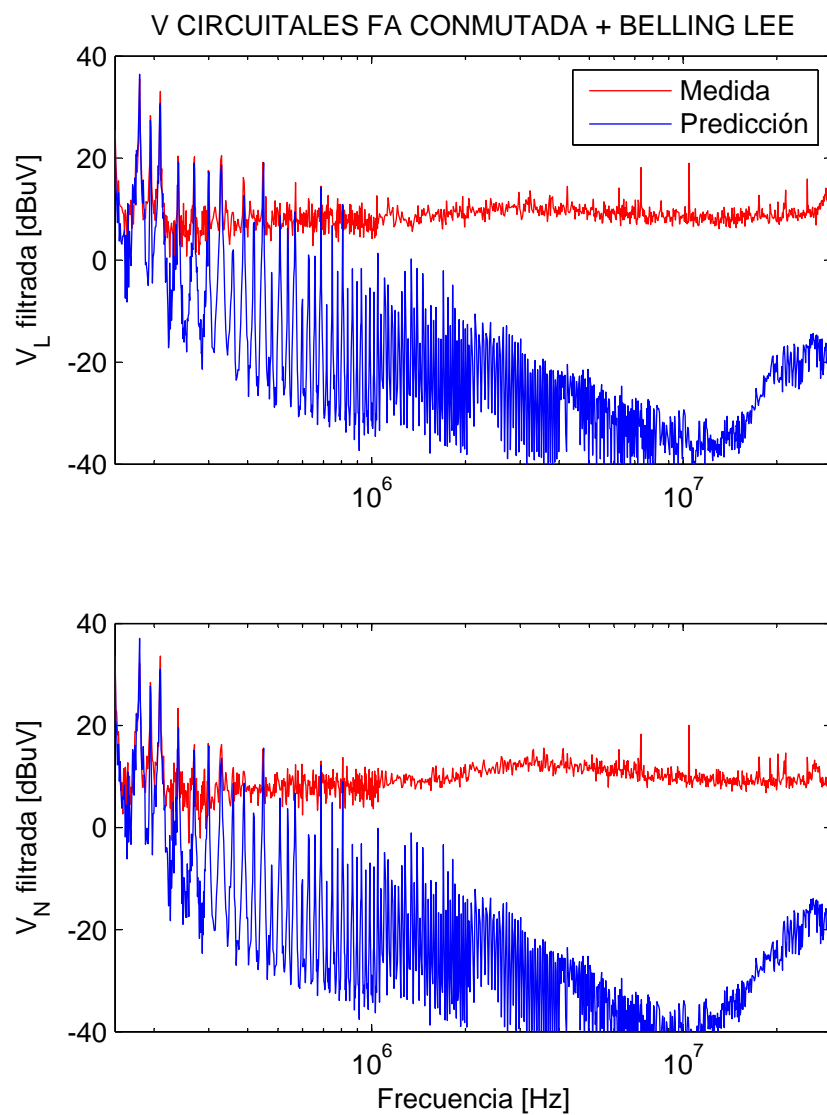


Figura 5.12: Comparación de tensiones circuitales (V_L , V_N) medidas y predichas para la fuente de alimentación conmutada + filtro de red Belling Lee.

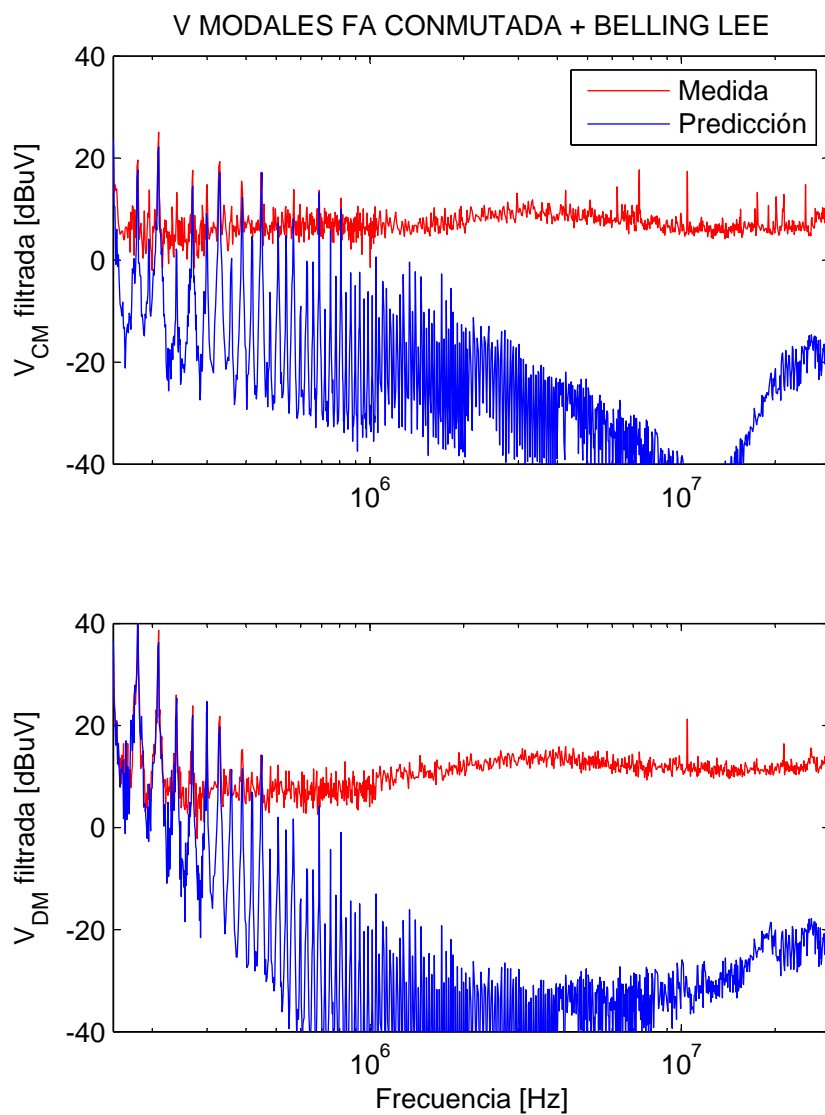


Figura 5.13: Comparación de tensiones modales (V_{CM} , V_{DM}) medidas y predichas para la fuente de alimentación conmutada + filtro de red Belling Lee.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

Contenidos de este capítulo

6.1. Conclusiones	125
6.2. Líneas de futuro	128

6.1. Conclusiones

En este apartado de conclusiones revisaremos los objetivos marcados para este trabajo de investigación (capítulo 1) y la manera en cómo se han alcanzado.

El primer objetivo establecido es el desarrollo de una nueva técnica de medida multimodal que permita caracterizar de manera completa los filtros de red.

La caracterización del filtro de red se lleva a cabo mediante la medida de sus parámetros S , tanto físicos como modales, los cuales van a predecir el comportamiento del mismo:

- Pérdidas de inserción en modo común y diferencial para impedancias de línea y carga de 50Ω (información equivalente a la que suministran los métodos de medida estándar).
- Pérdidas de inserción en modo común y diferencial para diferentes impedancias de línea y carga.
- Transferencia de energía entre modos común y diferencial.

Estudios realizados hasta el momento proponen métodos de medida específicos que sólo dan solución a alguno de los tres puntos anteriores. Por tanto, el trabajo de

investigación realizado aporta una solución completa para la caracterización de los filtros de red, de la cual se extrae toda la información necesaria para evaluar el comportamiento del filtro en cualquier situación, y donde la nueva técnica de medida multimodal es incluso más simple y tiene menos incertidumbre que técnicas anteriores. Es importante destacar que el modelo propuesto contempla la conversión entre modos que se produce en los filtros de red.

El segundo objetivo del trabajo de investigación es el desarrollo de nuevas técnicas de medida multimodal que permitan obtener un modelo multimodal completo de un equipo eléctrico o electrónico, teniendo en cuenta tanto sus impedancias, como su conversión modal y fuentes de interferencia.

Para que la caracterización de filtros de red anterior tenga sentido en un contexto de diseño, es necesario caracterizar el comportamiento del equipo electrónico al cual será conectado, en cuanto a impedancia y generación de interferencia se refiere. De este modo se podrá predecir la atenuación real del filtro y los niveles de interferencia que el dispositivo filtrado suministra a la red en forma de emisión conducida.

La caracterización propuesta para los equipos electrónicos es tanto circuital (puertos físicos línea-tierra y neutro-tierra) como modal (puertos modales común y diferencial).

En una primera aproximación al problema se ha desarrollado una nueva técnica de medida multimodal, basada en analizador de redes y LISN, para determinar la impedancia de entrada del equipo mientras se encuentra en funcionamiento, cuyo modelo se presenta mediante una red de tres impedancias en π . El modelo circuital se convierte matemáticamente en un modelo modal que comprende la impedancia en modo común y diferencial, y la transimpedancia entre modos. La transimpedancia modela el intercambio de energía entre los modos común y diferencial, imposible de modelar por los métodos tradicionales compuestos sólo por las impedancias en modo común y diferencial. La validez de esta técnica ha sido demostrada mediante medidas reales.

A continuación se han presentado y validado dos nuevos métodos que mejoran la medida de parámetros S de equipos electrónicos, lo que permite una caracterización más exacta de la impedancia de entrada del ESE mediante sus modelos equivalentes circuital y modal. Ambos métodos, interpolación y *deembedding*, pueden utilizarse juntos, o de manera independiente, para conseguir dicho propósito.

En una segunda aproximación al problema, el trabajo de investigación presenta y valida un nuevo método de medida multimodal, también basado en analizador de redes y LISN, para hallar un nuevo modelo circuital y modal equivalente (ampliación del primero), lo más general posible, que caracterice el comportamiento de un equipo electrónico en cuanto a emisión conducida se refiere. Los modelos equivalentes (circuital y modal) están compuestos por una red de tres impedancias en π y dos fuentes

de tensión AC, que modelan la interferencia generada por el equipo. Se le exige al modelo modal que contenga información acerca de:

- Impedancias modales (común, diferencial y transimpedancia modal).
- Niveles de emisión en modo común y diferencial.
- Predicción de los niveles de interferencia conducida del equipo electrónico conectado a cualquier impedancia de red.

En la bibliografía no hay disponible ningún método capaz de aportar un modelo que incluya la fuente de interferencia además de la impedancia del equipo. El modelo modal propuesto divide la contribución de cada modo interferente (común y diferencial) en un puerto diferente. Esto resulta útil para analizar situaciones habituales en las que los modos se comportan de manera distinta, por ejemplo, cuando un filtro de red se encuentra conectado al equipo electrónico; situación en la que se presentan distintas atenuaciones y adaptaciones para cada modo. El modelo planteado es más preciso que aquellas caracterizaciones que tienen en cuenta el modo común y el modo diferencial como fenómenos independientes, ya que ésta contempla la transferencia de energía entre modos común y diferencial, modelada mediante la transimpedancia Z_{TM} .

El tercer objetivo del trabajo de investigación es el desarrollo de una nueva metodología para la predicción del nivel de interferencia conducida que un equipo electrónico suministra a la red eléctrica a través del filtro de red al cual está conectado.

Los modelos descritos anteriormente se han utilizado para desarrollar una nueva metodología capaz de predecir los niveles de emisión conducida (tanto desde un punto de vista circuital como modal) en los terminales de línea del filtro de red. Sus características más relevantes son:

- Permite el cálculo de la atenuación real del filtro al modo común y al modo diferencial en situaciones reales (por ejemplo, un filtro de red que tiene conectado un equipo electrónico concreto en sus terminales de carga y un equipo de medida estandarizado, como es una LISN, en los terminales de línea).
- Permite predecir efectos tales como la conversión modal (de común a diferencial y viceversa) generada por asimetrías en el filtro, o por transimpedancias modales en el equipo electrónico o la red eléctrica.
- Permite una selección (o diseño) óptima de los filtros de red, ya que el operario no es necesario que esté capacitado para compensar todas las incertidumbres derivadas de los sistemas de caracterización y medida clásicos (desadaptación

de impedancias, conversión modal, etc.). El análisis propuesto permite seleccionar (o diseñar) el filtro de red mejor adaptado a un equipo electrónico concreto de manera óptima, evitando un costoso procedimiento de selección basado en la prueba y error, el cual requiere continuos montajes y medidas de varias configuraciones de filtros y equipo. Este costoso procedimiento se puede substituir por un rápido proceso *software*, el cual calcula la emisión conducida del equipo electrónico empleando un conjunto de filtros de red previamente medidos y caracterizados mediante sus parámetros S .

La metodología presentada en este trabajo brinda una solución completa al análisis de interferencias conducidas en equipos electrónicos conectados a filtros de red. Mejora los resultados que se puedan predecir utilizando estándares de caracterización y medida actuales, incluso empleando configuraciones de medida más simples. Por tanto, los resultados obtenidos en este trabajo de investigación pueden resultar de gran interés para fabricantes de filtros de red, diseñadores de equipos electrónicos y laboratorios de EMC. En particular, todo ello se puede aplicar a la predicción de los resultados de las medidas realizadas de acuerdo al estándar de medida de emisión conducida CISPR 22.

El cuarto objetivo del trabajo de investigación es la difusión de los resultados obtenidos entre la comunidad científica. Se ha publicado en congresos nacionales e internacionales de reconocido prestigio, así como en una revista referente mundial en el sector de la Compatibilidad Electromagnética (ver apéndice C).

6.2. Líneas de futuro

El trabajo presentado todavía deja algunas líneas de desarrollo abiertas para seguir investigando en los próximos tiempos. Algunas de estas posibles líneas futuras se mencionan a continuación:

1. Los modelos presentados para caracterizar equipos electrónicos se podrían utilizar, con las apropiadas modificaciones en los sistemas de medida, para caracterizar la red eléctrica en cuanto a impedancia y generación de interferencia.
2. Perfeccionamiento de los sistemas de medida multimodales propuestos para disminuir el error en la caracterización de los filtros de red y equipos electrónicos.
3. Desarrollo de metodologías de diseño de filtros, ya sean basadas en procedimientos plenamente analíticos o en técnicas de optimización numérica, que permitan el diseño de filtros de red que interactúen de manera eficiente con los

equipos electrónicos que deben proteger y eviten degradaciones de eficiencia debidas a conversiones o desadaptaciones modales.

4. Deducción y validación experimental de modelos multimodales para elementos que forman parte de un filtro de red (condensadores tipo X e Y, choques, bobinas...) y extracción de los parámetros de su modelo equivalente mediante medidas reales. Estos modelos servirán como herramienta para hallar los componentes del filtro óptimo para un equipo electrónico concreto.
5. Análisis de la posibilidad de aprovechar los modelos y sistemas de medida estudiados para aplicarlos a sistemas de comunicación que utilizan la red eléctrica (p.e. PLC). La diferencia entre estos sistemas de comunicación y los equipos electrónicos estudiados en el trabajo es la naturaleza de las señales (en los equipos son espúreas, mientras que en PLC son intencionadas), pero en ambos casos son parecidos, ya que se conectan a la red eléctrica.

Bibliografía

- [1] J. Balcells, *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, Marcombo S.A., España, 1992
- [2] L.T. Assembe, *Computation of the minimal insertion loss of EMC filters*, Proc. of International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1991, pp. 579-582
- [3] F. Broydé and E. Clavelier, *Minimum attenuation and input impedance domain of a linear filter*, Proc. of International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, March, 1989, pp. 261-266
- [4] S.M. Vakil, *A technique for determination of filter insertion loss as a function of arbitrary generator and load impedances*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, May, 1978, Vol. 20, pp. 273-278
- [5] CISPR-17, *Methods of measurement of the suppression characteristics of passive radio interference filters and suppression components*, International Electrotechnical Commission, 1981
- [6] MIL-STD-220B, *Test method standard. Method of insertion loss measurement*, Department of Defense United States of America, January 24, 2000
- [7] M. Mardiguan and J. Raimbourg, *An alternate, complementary method for characterizing EMI filters*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, Washington, August 2-6, 1999, pp. 882-886
- [8] M. Zamazal and T. Urbanec, *Variable impedance in measuring EMI filter's insertion loss*, Asia-Pacific Conference on Communications, Perth, Western Australia, October 3-5, 2005, pp. 24-27
- [9] Schlike H.M., *Electromagnetic Compossibility*, Marcel Decker Inc., 1982
- [10] S.H. Eisbruck and F.A. Giordano, *A survey of power-line filter measurement techniques*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, June, 1968, Vol. 10, pp. 238-242

- [11] J.A. Allen, *Insertion loss measurements of RF suppression filters with rated current applied*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1957, pp. 77-88
- [12] L.M. Schneider, *Power line EMI filter insertion loss*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Santa Clara, CA, Session 5C, September, 1982
- [13] ANSI C63.13, *American national standard guide on the application and evaluation of EMI power-line filters for commercial use*, American National Standards Institute, June 28, 1991
- [14] B. Cooperatein, *Swept frequency method for EMI filter insertion loss measurements*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Boulder, Colorado, 1981, pp. 11-15
- [15] B. Garry and R. Nelson, *Effect of impedance and frequency variation on insertion loss for a typical power line filter*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, CO, August 24-28, 1998, pp. 691-695
- [16] J.E. Bridges and W. Emberson, *Determination of filter performance for any arbitrary source or load impedance based on experimental measurements*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1975, pp. 5AIIc1-5AIIc5
- [17] F. Broydé and E. Clavelier, *Designing power-line filter for their worst-case behaviour*, Proc. of International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1991, pp. 583-588
- [18] H. Weidmann and W.J. McMartin, *Two worst-case insertion loss test methods for passive power-line interference filters*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, June, 1968, Vol. 10, pp. 257-263
- [19] CISPR-16, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods*, International Electrotechnical Commission, 1987
- [20] H.A. Munir, M.Z.M. Jenu and M.F.L. Abdullah, *Analysis and design of EMI filters to mitigate conducted emissions*, Student Conference on Research and Development, Shah Alam, Malaysia, July 16-17, 2002, pp. 204-207
- [21] M.S. Zainal and M.Z.M. Jenu, *Reduction of conducted emission noise using various power supply filters*, Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, Shah Alam, Malaysia, August 12-14, 2003, pp. 100-104
- [22] C.R. Paul and K.B. Hardin, *Diagnosis and reduction of conducted noise emissions*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, November, 1988, Vol. 30, pp. 553-560

- [23] F. Shih, D.Y. Chen, Y. Wu and Y. Chen, *A procedure for designing EMI filters for AC line applications*, IEEE Transactions on Power Electronics, January, 1996, Vol. 11, pp. 170-181
- [24] D.H. Liu and J.G. Jiang, *High frequency characteristics analysis of EMI filter in switch power supply (SMPS)*, IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Queensland, Australia, June 23-27, 2002, Vol. 4, pp. 2039-2043
- [25] A. Nagel and R.W. De Doncker, *Systematic design of EMI-filters for power converters*, Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, October 8-12, 2000, Vol. 4, pp. 2523-2525
- [26] M.C. Caponet, F. Profumo and A. Tenconi, *EMI filters design for power electronics*, IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Queensland, Australia, June 23-27, 2002, Vol. 4, pp. 2027-2032
- [27] L.T. Assembe, *Power line EMI-filter design using the combinatorial optimization method simulated annealing*, Proc. of International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, March, 1995, pp. 51-56
- [28] M.J. Nave, *A novel differential mode rejection network for conducted emissions diagnostics*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, CO, May 23-25, 1989, pp. 223-227
- [29] UNE-EN 55022, *Equipos de Tecnología de la Información. Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medida*, Comité Técnico AEN/CTN 208 Compatibilidad Electromagnética, Marzo, 2000
- [30] T. Guo, D.Y. Chen and F.C. Lee, *Separation of the common-mode and differential-mode-conducted EMI noise*, IEEE Transactions on Power Electronics, May, 1996, Vol. 11, pp. 480-488
- [31] T. Guo, D.Y. Chen and F.C. Lee, *Diagnosis of power supply conducted EMI using a noise separator*, Proc. of Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 5-9, 1995, Vol. 1, pp. 259-266
- [32] H. Su and K. Lin, *Computer-aided design of power line filters with a low cost common and differential-mode noise diagnostic circuit*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Montreal, Canada, August 13-17, 2001, Vol. 1, pp. 511-516
- [33] C.R. Paul and K.B. Hardin, *Diagnosis and reduction of conducted noise emissions*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, Washington, August 2-4, 1988, pp. 19-23

- [34] M.C. Caponet, F. Profumo, L. Ferraris, A. Bertoz and D. Marzella, *Common and differential mode noise separation: comparison of two different approaches*, IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, Canada, June 17-21, 2001, Vol. 3, pp. 1383-1388
- [35] M.C. Caponet and F. Profumo, *Devices for the separation of the common and differential mode noise: design and realization*, Proc. of Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, Texas, March 10-14, 2002, Vol. 1, pp. 100-105
- [36] M. Kumar and V. Agarwal, *Power line filter design for conducted electromagnetic interference using time-domain measurements*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, February, 2006, Vol. 48, No. 1, pp. 178-186
- [37] D. Zhang and D.Y. Chen, *A new method to characterize EMI filters*, Proc. of Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, California, February 15-19, 1998, Vol. 2, pp. 929-933
- [38] J.G. Kraemer, *S-parameter characterization for EMI filters*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Boston, August 18-22, 2003, pp. 361-366
- [39] A. Axelrod, *Experimental study of DM-to-CM and vice-versa conversion effects in balanced signal and power line filters*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 11-16, 2003, pp. 599-602
- [40] UNE-EN 61000-4-4, *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida. Sección 4: Ensayos de inmunidad a los transitorios eléctricos rápidos en ráfagas*, Comité Técnico AEN/CTN 208 Compatibilidad Electromagnética, Diciembre, 2001
- [41] UNE-EN 61000-4-6, *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida. Sección 6: Inmunidad a las perturbaciones conducidas, inducidas por los campos de radiofrecuencia*, Comité Técnico AEN/CTN 208 Compatibilidad Electromagnética, 1998
- [42] UNE-EN 61000-4-3, *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y de medida. Sección 3: Ensayos de inmunidad a los campos electromagnéticos, radiados y de radiofrecuencia*, Comité Técnico AEN/CTN 208 Compatibilidad Electromagnética, Julio, 2003
- [43] D.E. Bockelman and W.R. Eisenstadt, *Combined differential and common-mode scattering parameters: theory and simulation*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, July, 1995, Vol. 43, No. 7, pp. 1530-1539

- [44] W. Fan, A. Lu, L.L. Wai and B.K. Lok, *Mixed-mode S-parameter characterization of differential structures*, Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, December 10-12, 2003, pp. 533-537
- [45] A. Ferrero and M. Pirola, *Generalized mixed-mode S-parameters*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, January, 2006, Vol. 54, No. 1, pp. 458-463
- [46] D.E. Bockelman, W.R. Eisenstadt and R. Estengel, *Accuracy estimation of mixed-mode scattering parameter measurements*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, January, 1999, Vol. 47, No. 1, pp. 25-27
- [47] D.E. Bockelman and W.R. Eisenstadt, *Pure-mode network analyzer for on-wafer measurements of mixed-mode S-parameters of differential circuits*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, July, 1997, Vol. 45, No. 7, pp. 1071-1077
- [48] L.M. Schneider, *Noise source equivalent circuit model for off-line converters and its use in input filter design*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1983, pp. 167-175
- [49] M. Kanda, N. Oka and S. Nitta, *Common mode impedance model of power electronic equipment to evaluate noise reduction effect of a line noise filter*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington, DC, August 21-25, 2000, Vol. 1, pp. 65-70
- [50] D. Zhang, D.Y. Chen, M.J. Nave and D. Sable, *Measurement of noise source impedance of off-line converters*, IEEE Transactions on Power Electronics, September, 2000, Vol. 15, No. 5, pp. 820-825
- [51] K.Y. See and L. Yang, *Measurement of noise source impedance of SMPS using two current probes*, IEEE Electronic Letters, October 12, 2000, Vol. 36, No. 21, pp. 1774-1776
- [52] J. Deng and K.Y. See, *Characterization of RF noise source impedance for switched mode power supply*, Proc. of International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, February 27 - March 3, 2006, pp. 537-540
- [53] K.Y. See, P.L. So, A. Kamural and E. Gunawan, *Radio-frequency common-mode noise propagation model for power-line cable*, IEEE Transactions on Power Delivery, October, 2005, Vol. 20, pp. 2443-2449
- [54] H. Rothe and W. Dahlke, *Theory of noisy fourpoles*, Proc. of the IRE, June, 1956, Vol. 44, pp. 811-818
- [55] Guillermo González, *Microwave Transistor Amplifiers (2nd edition)*, Prentice-Hall Inc., USA, 1997

- [56] H.A. Lasitter, *Power line impedance determination using the 3 voltmeter measurement method*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, June, 1969, Vol. 11G, pp. 128-136
- [57] M. Tanaka, *High frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in Japan on intrabuilding power line communications*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, May, 1988, Vol. 34, pp. 321-326
- [58] J.R. Nicholson and J.A. Malack, *RF impedance of power lines and line impedance stabilization networks in conducted interference measurements*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, May, 1973, vol. 15, No. 2, pp. 84-86
- [59] R.A. Southwick and W.C. Dolle, *Line impedance measuring instrumentation utilizing current probe coupling*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, November, 1971, Vol. 13, pp. 31-36
- [60] J.A. Malack and J.R. Engstrom, *RF impedance of United States and European power lines*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, February, 1976, Vol. 18, pp. 36-38
- [61] P.J. Kwasniok, M.D. Bui, A.J. Kozlowski and S.S. Stuchly, *Technique for measurement of powerline impedances in the frequency range from 500 kHz to 500 MHz*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, February, 1993, vol. 35, No. 1, pp. 87-90
- [62] P.J. Kwasniok, A.J. Kozlowski and S.S. Stuchly, *An improved method of measuring power-line impedances using two current probes*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, November, 1993, vol. 35, No. 4, pp. 473-475
- [63] P.J. Kwasniok, M.D. Bui, A.J. Kozlowski and S.S. Stuchly, *Techniques for measurement of input impedances of electronic equipment in the frequency range from 1 MHz to 1 GHz*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, November, 1992, Vol. 34, No. 4, pp. 486-490
- [64] J.P.L. Neto, S. Tsuzuki, Y. Kawakami and Y. Yamada, *In-door power-line impedance measurement up to high frequency (10KHz - 70MHz)*, International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications, Kyoto, Japan, March 26-28, 2003, pp. 243-247
- [65] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley and Sons Inc., USA, 1998
- [66] R. Regué, M. Ribó, D. Duran, D. Badia and A. Pérez, *Common and differential mode characterization of EMI power-line filters from S-parameters measurements*, Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Santa Clara, USA, August, 2004, pp. 610-615

- [67] J. Bará, *Circuitos de Microondas con Líneas de Transmisión*, Ediciones UPC, Spain, 1994
- [68] R. Regué, M. Ribó, D. Duran, D. Badia and A. Pérez, *Measurement and modeling of noise source impedance of electronic equipment*, Proc. of International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe, Eindhoven, Holand, September, 2004, pp. 150-154
- [69] A. Pérez, J.R. Regué, M. Ribó, A.M. Sánchez, F.J. Pajares and D. Badia, *Circuitual characterization of an electronic equipment for narrow-band conducted emissions*, Proc. of International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe, Barcelona, Spain, September, 2006, pp. 1035-1040
- [70] A.M. Sánchez, A. Pérez, J.R. Regué, M. Ribó, P. Rodríguez-Cepeda and F.J. Pajares, *Optimization of the scattering parameter measurement of electronic equipment with conducted emissions*, Proc. of EMC Europe Workshop, Paris, France, June, 2007, CD de artículos
- [71] A. Pérez, A.M. Sánchez, J.R. Regué, M. Ribó, J.P. Rodríguez-Cepeda and F.J. Pajares, *Characterization of power-line filters and electronic equipment for conducted-emission prediction*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Artículo aceptado pendiente de publicación
- [72] *Automatic calibration of vector network analyzer ZVR*, Application Note 1EZ30-2E, August, 1996, <http://www.rohde-schwarz.com>
- [73] R. Bauer and P. Penfield, *De-embedding and unterminating*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, March, 1974, Vol. 22, No. 3, pp. 282-288
- [74] *Scorpion embedding/de-embedding*, Application Note 11410-00278, May, 2002, <http://www.us.anritsu.com>

