



**Universitat Ramon Llull**

## **TESI DOCTORAL**

Títol

Caracterización multimodal de filtros de red y equipos electrónicos

Realitzada per Antonio Pérez Jiménez

en el Centre Escola Tècnica Superior d'Enginyeria i Informàtica La Salle

i en el Departament Comunicacions i Teoria del Senyal

Dirigida per Joan Ramon Regué Moreres



El verdadero barómetro de la inteligencia es una vida feliz y efectiva  
vivida cada día y en cada momento de cada día

*Wayne W. Dyer*



# Resumen

Uno de los problemas más importantes en Compatibilidad Electromagnética es el control de las interferencias emitidas y/o recibidas por un equipo electrónico a través de sus terminales de alimentación monofásica. Estas interferencias se clasifican en modo común y modo diferencial. La manera más usual de mitigarlas es mediante el empleo de filtros de red. Los métodos actuales de diseño de filtros de red abordan la mitigación de este tipo de interferencias por separado: no tienen en cuenta que ambos tipos de señales (modo común y diferencial) interactúan entre sí y se transfieren energía en cualquier tipo de asimetría originada por los equipos electrónicos o por los mismos filtros. Este hecho produce frecuentemente situaciones inesperadas: ineffectividad de los filtros de red, aparición de interferencias en modo común o diferencial inexplicables por la topología de los circuitos, selectividad en frecuencia del filtrado de las interferencias, procesos de radiación, etc. Este tipo de situaciones pueden ser analizadas y corregidas a partir de un análisis multimodal, que tenga en cuenta simultáneamente el modo común y el diferencial, y su interacción. El trabajo aquí expuesto pretende:

1. Desarrollar sistemas de medida multimodal para equipos electrónicos y filtros de red. Dichos sistemas deben tener en cuenta tanto el modo común, como el diferencial, como su interacción, y deben mejorar las prestaciones de los sistemas de medida normativos actuales.
2. Hallar modelos equivalentes desde un punto de vista multimodal (teniendo en cuenta simultáneamente el modo común, el diferencial y su interacción) tanto de equipos electrónicos como de filtros de red.
3. Desarrollar una metodología de predicción de las interferencias conducidas que el equipo electrónico suministra a la red eléctrica a través del filtro de red al cual está conectado a partir de los modelos multimodales equivalentes propuestos para ambos dispositivos.



# Resum

Un dels problemes més importants en la Compatibilitat Electromagnètica és el control de les interferències emeses i/o rebudes per un equip electrònic a través dels seus terminals d'alimentació monofàsica. Aquestes interferències es classifiquen en mode comú i mode diferencial. La manera més usual de mitigar-les és mitjançant la utilització de filtres de xarxa. Els mètodes actuals de disseny de filtres de xarxa tracten la mitigació d'aquest tipus d'interferències per separat: no tenen en compte que ambdós tipus de senyals (mode comú i diferencial) interaccionen entre si i es transfereixen energia en qualsevol tipus d'assimetria originada pels equips electrònics o pels mateixos filtres. Aquest fet produeix freqüentment situacions inesperades: ineffectivitat dels filtres de xarxa, aparició d'interferències en mode comú o diferencial inexplicables per la topologia dels circuits, selectivitat en freqüència del filtratge de les interferències, processos de radiació, etc. Aquest tipus de situacions poden ser analitzades i corregides a partir d'un anàlisi multimodal, que tingui en compte simultàniament el mode comú i el diferencial, i la seva interacció. El treball exposat aquí pretén:

1. Desenvolupar sistemes de mesura multimodal per a equips electrònics i filtres de xarxa. Aquests sistemes han de tenir en compte tant el mode comú, com el diferencial, com la seva interacció, i han de millorar les prestacions dels sistemes de mesura normatius actuals.
2. Trobar models equivalents des d'un punt de vista multimodal (tenint en compte simultàniament el mode comú, el diferencial i la seva interacció) tant d'equips electrònics com de filtres de xarxa.
3. Desenvolupar una metodologia de predicció de les interferències conduïdes que l'equip electrònic subministra a la xarxa elèctrica a través del filtre de xarxa al qual es troba connectat a partir dels models multimodals equivalents proposats per a ambdós dispositius.





# Abstract

One of the most important problems in EMC is the control of the common and differential mode interferences emitted or received by an electronic device through its single phase power-line cable. These interferences are mitigated using power-line filters. The present power-line filter methodologies treat separately the mitigation of this kind of interferences: they do not take into account that both modes interact and exchange energy at any kind of asymmetry originated by the devices connected to the power-line, or by the power-line filters themselves. This fact leads to unexpected situations: power-line filter ineffectivity, appearance of common and differential mode interferences not accountable by the circuit topology, frequency selectivity of the interferences, radiation processes, etc. This kind of situations can be analyzed and corrected using multimodal analysis, which takes into account at the same time the common mode, the differential mode and their interaction. This project aims to:

1. Develop accurate multimodal measurement systems for both electronic devices and power-line network filters. They have to consider the common and differential modes, and their interaction, and have to improve the features of present normative measurement systems.
2. Derive equivalent models from a multimodal point of view (taking into account simultaneously the common mode, the differential mode and their interaction) for both electronic devices and power-line filters.
3. Develop a methodology for predicting the level of conducted emissions that an electronic device supplies to the power-line network through the power-line filter to which it is connected, using the equivalent multimodal models proposed for both devices.



# Agradecimientos

El presente trabajo de investigación ha recibido el soporte del Ministerio de Educación y Ciencia mediante la concesión de dos proyectos de investigación y desarrollo tecnológico del Programa Nacional de Tecnologías de Electrónica y de Comunicaciones:

Nº referencia: *TEC2005-04238*

Título del proyecto: *Análisis de interferencias en modo común y diferencial en equipos electrónicos y su mitigación mediante filtros de red adaptados multimodalmente*

Investigador principal: *Miquel Ribó i Pal*

Organismo: *Universitat Ramon Llull*

Departamento: *Comunicaciones y Teoría de la Señal*

Fecha de inicio del proyecto: *31-12-05*

Fecha de finalización del proyecto: *31-12-08*

Nº referencia: *TEC2004-02196*

Título del proyecto: *Comportamiento modal de redes eléctricas con aplicación al diseño de filtros de red y distribución de señales PLC*

Investigador principal: *Miquel Ribó i Pal*

Organismo: *Universitat Ramon Llull*

Departamento: *Comunicaciones y Teoría de la Señal*

Fecha de inicio del proyecto: *13-12-04*

Fecha de finalización del proyecto: *12-12-05*

Mi más sincero agradecimiento a mis padres, Antonio y Carmen, y a mi hermano, Jordi, que siempre han confiado en mi.

Gracias a ti Antonia, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos.

Gracias a mis compañeros del *Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions* (GRECO): Albert Miquel, Joan Ramon, Miquel, Javier y Pablo, sin los cuales la presentación de esta tesis no hubiera sido posible.

No me olvido del resto de compañeros del departamento de Comunicaciones: David, Simó, Joan Lluís y Carles. Gracias por vuestra amistad.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1. Marco de trabajo . . . . .	4
1.2. Introducción al trabajo realizado . . . . .	6
1.3. Objetivos del trabajo . . . . .	11
<b>2. FILTROS DE RED</b>	<b>15</b>
2.1. Pérdidas de inserción en filtros de EMI . . . . .	15
2.2. Pérdidas de inserción en filtros de red . . . . .	18
2.3. Diseño de filtros de red . . . . .	20
2.4. Medida de la interferencia en modo común y diferencial . . . . .	21
2.5. Caracterización de los filtros de red . . . . .	23
2.6. Conversión modal . . . . .	24
2.7. Caracterización de la impedancia de equipos electrónicos . . . . .	28
2.8. Caracterización de la impedancia de la red eléctrica . . . . .	31
2.9. Situación actual . . . . .	34
<b>3. CARACTERIZACIÓN MULTIMODAL DE FILTROS DE RED</b>	<b>37</b>
3.1. Introducción . . . . .	37
3.2. Caracterización circuital . . . . .	39
3.3. Caracterización modal . . . . .	40
3.4. Sistema de medida . . . . .	44
3.5. Aplicaciones del modelado multimodal . . . . .	44
<b>4. CARACTERIZACIÓN MULTIMODAL DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS</b>	<b>57</b>
4.1. Caracterización de la impedancia de entrada . . . . .	58
4.2. Caracterización de la emisión conducida . . . . .	86
<b>5. PREDICCIÓN EMISIÓN CONDUCTIDA MEDIANTE MODELOS EQUIVALENTES</b>	<b>107</b>
5.1. Introducción . . . . .	108
5.2. Predicción circuital . . . . .	108
5.3. Predicción modal . . . . .	111
5.4. Resultados experimentales . . . . .	112

---

<b>6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO</b>	<b>125</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	125
6.2. Líneas de futuro . . . . .	128
<b>Bibliografía</b>	<b>131</b>
<b>A. INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDA</b>	<b>139</b>
<b>B. GLOSARIO</b>	<b>149</b>
<b>C. PUBLICACIONES</b>	<b>151</b>

# Prefacio

La tesis doctoral que este documento presenta está enmarcada dentro del programa de doctorado en electrónica "Las TIC y su gestión" de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería e Informática La Salle (Universitat Ramon Llull). La investigación se ha realizado dentro del *Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions* (GRECO).

Las líneas maestras del documento, que presenta los resultados obtenidos durante el periodo de investigación, son las siguientes:

- Capítulo 1: Introducción
- Capítulo 2: Filtros de red
- Capítulo 3: Caracterización multimodal de filtros de red
- Capítulo 4: Caracterización multimodal de equipos electrónicos
- Capítulo 5: Predicción de emisiones conducidas empleando modelos equivalentes
- Capítulo 6: Conclusiones y líneas de futuro
- Bibliografía, glosario, instrumentación y publicaciones

El capítulo 1 introduce la temática tratada en la tesis doctoral: marco y grupo de trabajo en el que se desarrollan las ideas y soluciones, estado del arte y análisis de la problemática actual relacionada con los filtros de red, definición de los objetivos del trabajo.

El capítulo 2 pretende dar una visión general de los filtros de red: estándares actuales, parámetros característicos, problemas que plantean en una aplicación real, modelado, etc. Además, se analiza la bibliografía existente relacionada con la temática.

Los capítulos 3, 4 y 5 tratan en profundidad las aportaciones del trabajo de investigación y presentan los resultados obtenidos: modelos útiles para caracterizar el comportamiento de filtros de red y equipos electrónicos, y su posterior utilización para la predicción de emisiones conducidas.

El capítulo 7 extrae las conclusiones más importantes acerca del trabajo de investigación realizado, y plantea algunas de las líneas de futuro que han quedado abiertas.

Por último, se dispone de una completa bibliografía relacionada con la temática, un glosario de términos, algunos datos de interés respecto a la instrumentación utilizada para realizar los ensayos que se plantean, y el conjunto de publicaciones que se han originado a partir del trabajo de investigación realizado.



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### Contenidos de este capítulo

---

<b>1.1. Marco de trabajo</b> . . . . .	<b>4</b>
1.1.1. La Compatibilidad Electromagnética . . . . .	4
1.1.2. Grupo de trabajo . . . . .	4
<b>1.2. Introducción al trabajo realizado</b> . . . . .	<b>6</b>
1.2.1. Señales e interferencias en los cables monofásicos de distribución de energía eléctrica . . . . .	6
1.2.2. Filtros de red . . . . .	6
1.2.3. Asimetrías y conversión modal . . . . .	6
1.2.4. El análisis multimodal como método de análisis del comportamiento modal de redes monofásicas en entornos de EMI . . . . .	9
1.2.5. Justificación del trabajo de investigación . . . . .	10
<b>1.3. Objetivos del trabajo</b> . . . . .	<b>11</b>

---

Este capítulo presenta el marco de trabajo en el que se contextualiza el estudio realizado, así como la naturaleza del grupo de investigación y el área de conocimiento en el cual se ubica. A continuación se introduce la temática objeto del trabajo de investigación, ofreciendo una idea de los conceptos generales más importantes, la problemática asociada y la solución propuesta que justifica la realización de dicho trabajo. Por último, se definen los objetivos del trabajo de investigación.

## 1.1. Marco de trabajo

### 1.1.1. La Compatibilidad Electromagnética

La Compatibilidad Electromagnética (EMC) de un equipo eléctrico o electrónico representa su aptitud para funcionar correctamente en su entorno electromagnético, sin generar perturbaciones que puedan interferir a otros equipos, así como su aptitud para soportar interferencias que puedan producir otros equipos electrónicos. Por tanto, la EMC se subdivide en dos ramas principales: la Interferencia Electromagnética (EMI) y la Susceptibilidad Electromagnética (EMS). La EMI de un equipo mide la cantidad de interferencia que éste es capaz de generar, y que potencialmente puede afectar a otros equipos. Esta interferencia se vierte hacia el exterior del equipo bien a través de su cable de alimentación (EMI Conducida), o bien se radia hacia el aire (EMI Radiada). La EMS mide la cantidad de interferencia (recibida tanto de forma radiada como conducida) que un equipo es capaz de soportar sin alterar su funcionamiento.

Los filtros de red son filtros que se sitúan en la entrada del cable de alimentación de un equipo. Su misión es impedir la emisión conducida hacia el exterior del equipo, y mejorar su EMS frente a interferencias conducidas por los cables de alimentación. El presente trabajo propone un estudio sobre fenómenos asociados a la propagación de señales interferentes por los cables de alimentación de un equipo, así como su efecto sobre los filtros de red que pretenden suprimirlos. Con ello se pretende mejorar la comprensión del comportamiento de dichos filtros y generar conocimiento suficiente para permitir diseños más óptimos de los mismos.

### 1.1.2. Grupo de trabajo

El trabajo de investigación que presenta este documento se ha desarrollado dentro del *Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions* (GRECO) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Electrónica e Informática La Salle (Universitat Ramon Llull), el cual es *Grup de Recerca Emergent de la Generalitat de Catalunya*. El grupo tiene una larga experiencia en el campo de la EMC. Su actividad empezó en 1989 como laboratorio de medidas radioeléctricas, y se acreditó como Laboratorio de Homologaciones Radioeléctricas en 1993. En 1992 empezaron sus actividades como laboratorio de medidas de precertificación y de ingeniería en EMC. Ha prestado servicios de medida, homologación e ingeniería a decenas de empresas del sector electrónico y de las telecomunicaciones. El grupo tiene la infraestructura necesaria para realizar un gran número de medidas de EMC: cámara semianecoica, receptor de EMI, analizadores de espectros y de redes, generadores, antenas y sondas calibradas de diversos tipos, etc. Su actividad de Transferencia de Tecnología ha valido al grupo solicitante el distintivo de miembro de la *Xarxa de Centres de Suport a la Innovació Tecnològica* impulsada por la *Generalitat de Catalunya*.

Por lo que se refiere a investigación, el grupo se ha dedicado de manera primordial a dos líneas:

1. Entornos de medida alternativos a los convencionales especificados en las normativas de EMC (desde 1998). Se está trabajando en entornos de medida alternativos a las grandes cámaras semianecoicas: se utiliza la transformación de campo cercano a campo lejano mediante algoritmos metaheurísticos. En este campo finalizó su tesis doctoral uno de los miembros del grupo, Joan Ramon Regué Morreres.
2. Modelado multimodal (desde 1998). Se modelan sistemas que propagan dos modos, uno común y otro diferencial. Se aplicó originalmente a circuitos coplanares de microondas, a través de la tesis doctoral de uno de los miembros del grupo, Miquel Ribó i Pal. Después se ha aplicado al análisis de fenómenos de interferencia electromagnética en placas de circuito impreso (PCB). En esta línea ha finalizado su tesis doctoral otro de los integrantes del grupo, Francisco Javier Pajares Vega. En 2002 se inició la aplicación del modelado multimodal a la propagación de interferencias y conversión modal en entornos de cables de alimentación monofásicos. En esta línea ya se han comenzado a generar modelos multimodales para diversas asimetrías.

El trabajo de investigación realizado se adscribe en parte a esta línea. Se pretende el diseño e implementación de sistemas de medida mucho más completos que los actuales para:

- Determinar las características de entrada de equipos por su cable de alimentación monofásico (respuestas al modo común, diferencial y conversión de modos).
- Determinar el comportamiento de filtros de red (atenuación de modo común, modo diferencial y conversión modal).
- Predecir el nivel de las interferencias que el equipo filtrado suministra a la red eléctrica en forma de emisión conducida a partir del conocimiento modal de ambos dispositivos.

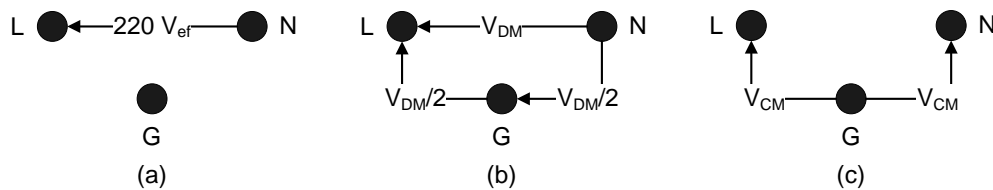
Las líneas de investigación anteriores se han desarrollado en gran parte gracias a tres proyectos financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia, con referencias DPI2001-1529-C02-01, TEC2004-02196 y TEC2005-04238.

## 1.2. Introducción al trabajo realizado

### 1.2.1. Señales e interferencias en los cables monofásicos de distribución de energía eléctrica

Los cables de la red eléctrica monofásica que alimentan equipos electrónicos pueden propagar diversos tipos de señales eléctricas:

1. Alimentación de  $220 V_{ef}$  a 50 Hz entre Línea (L) y Neutro (N) (figura 1.1(a)).
2. Interferencias electromagnéticas procedentes de la red eléctrica o generadas por los equipos electrónicos conectados a la misma. Estas interferencias pueden ser de modo diferencial (tensiones establecidas entre L y N) (figura 1.1(b)), y de modo común (tensiones establecidas entre Tierra (G) y el resto de conductores (L y N) (figura 1.1(c)).



**Figura 1.1:** Tensiones en un cable de alimentación: (a) alimentación 50 Hz; (b) interferencias en modo diferencial (DM); (c) interferencias en modo común (CM).

### 1.2.2. Filtros de red

Para evitar la propagación de interferencias desde y hacia los equipos electrónicos, éstos suelen protegerse con filtros de red. Estos filtros se diseñan para eliminar las interferencias de modo común y de modo diferencial (figura 1.2). La estructura más simple para un filtro de red se muestra en la figura 1.3. El condensador  $C_X$  mitiga el modo diferencial, y el choque de modo común L-M y los condensadores  $C_Y$  el modo común. Frecuentemente los filtros de red se diseñan para trabajar en un entorno de impedancia característica de  $50 \Omega$ , por lo que se adaptan mal a las impedancias de entrada de los equipos y de la red eléctrica, degradando sus prestaciones respecto de las estipuladas por los fabricantes.

### 1.2.3. Asimetrías y conversión modal

Cualquier asimetría en las líneas de alimentación provocada por asimetrías en las impedancias de entrada de equipos electrónicos o en los filtros de red, provoca una

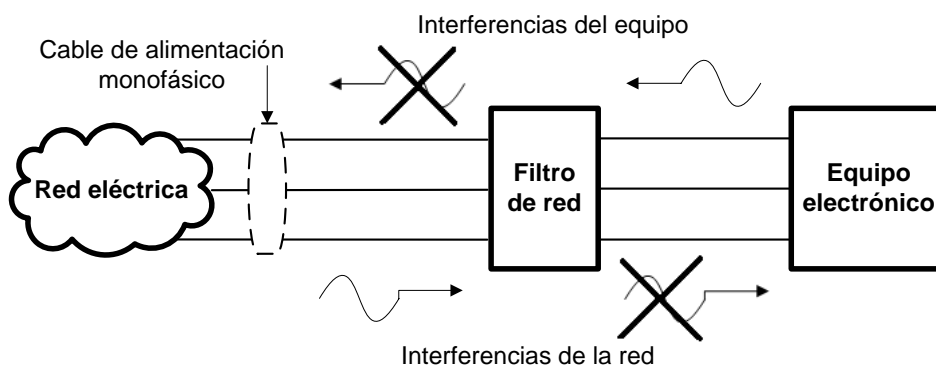


Figura 1.2: Conexión de un filtro de red.

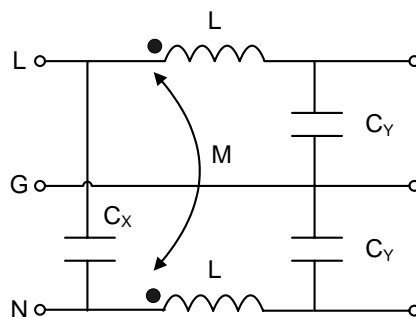


Figura 1.3: Estructura de un filtro de red.

conversión de parte de las interferencias de modo común a modo diferencial y viceversa, complicando en gran manera los procesos de análisis y control de la interferencia, puesto que interferencias conducidas de modo común pueden transformarse en interferencias de modo diferencial y viceversa. Esta conversión modal suele reducir el efecto de los filtros de red, así como provocar la aparición de radiaciones no previstas. La figura 1.4 muestra un ejemplo de asimetría en un filtro de red, en el cual el condensador conectado entre neutro y tierra ha sufrido una incidencia quedando en circuito abierto. Este ejemplo planteado es un caso extremo y poco habitual, pero ilustra de manera clara una posible asimetría en filtros de red.

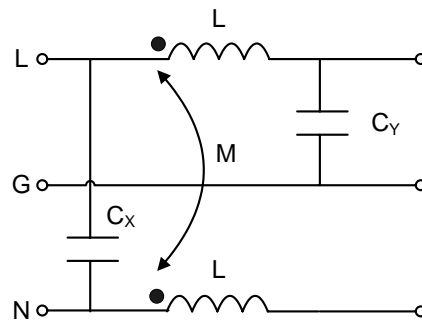


Figura 1.4: Ejemplo de asimetría en un filtro de red.

Los métodos actuales de análisis (incluidos los procedimientos normativos de medida) analizan por separado el modo común y el modo diferencial. Se habla por tanto de impedancia de entrada de un equipo (por su cable de alimentación) en modo común, de impedancia de entrada de un equipo en modo diferencial, de atenuación de un filtro en modo común y de atenuación de un filtro en modo diferencial (figura 1.5). No se tiene en cuenta la interacción entre modos debida a asimetrías. No se tiene en cuenta que, por ejemplo, un filtro de red transforma parte de la energía de una interferencia en modo común en una interferencia de modo diferencial, y viceversa. Como los sistemas actuales de medida analizan por separado el comportamiento frente al modo común y al modo diferencial, no detectan esta conversión. Pero una vez montado el filtro, esta conversión tiene lugar, ocasionando que los niveles de atenuación de las interferencias no sean muchas veces los esperados. Este hecho puede ocasionar grandes desajustes entre el comportamiento esperado de los sistemas y el comportamiento real de los mismos.

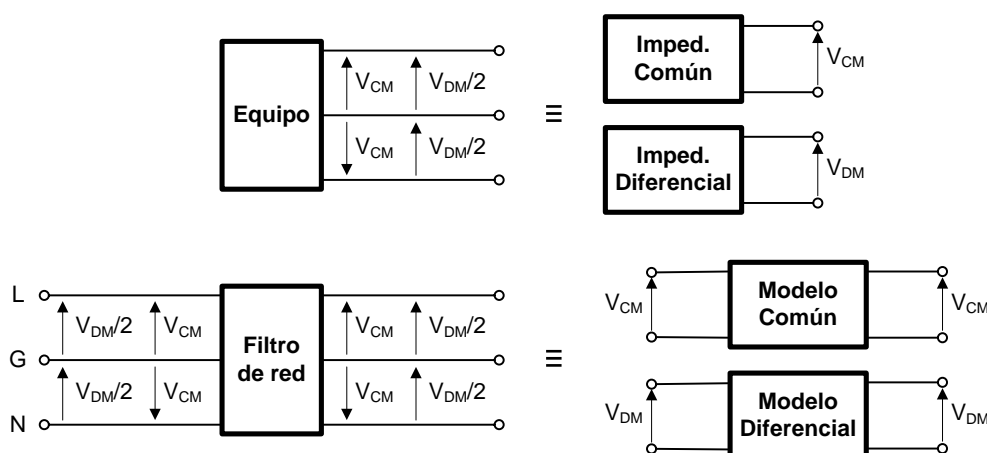


Figura 1.5: Análisis tradicional de equipos electrónicos y filtros de red.

#### 1.2.4. El análisis multimodal como método de análisis del comportamiento modal de redes monofásicas en entornos de EMI

Un análisis detallado y riguroso del comportamiento de redes monofásicas que incluyan equipos electrónicos y filtros de red pasa por un análisis detallado de los procesos de conversión modal (entre modo común y diferencial) que se producen en sus asimetrías. Este tipo de análisis (llamado análisis multimodal) trata conjuntamente los dos modos presentes en un cable de alimentación monofásico (que es multimodal porque propaga simultáneamente el modo común y el diferencial), pero confinando cada modo en una línea de transmisión monomodal equivalente diferente. Así, cualquier asimetría presente en la red puede modelarse como un multipuerto que transfiere energía entre los diversos modos comunes y diferenciales presentes en la asimetría (figura 1.6). De este modo es sencillo modelar de manera rigurosa un tramo de red en que haya diversos elementos que presenten respuestas diferentes para cada uno de los modos presentes en la misma (comunes y diferenciales), conectando de manera apropiada los puertos de sus modelos equivalentes (comunes con comunes y diferenciales con diferenciales). En este tipo de análisis la conversión entre modos comunes y diferenciales aparece de manera explícita en los modelos de los equipos o asimetrías a través de transimpedancias o de parámetros  $S$  de transmisión. El análisis conjunto de modos comunes y diferenciales sobre la línea de alimentación monofásica, que se comporta como una línea de transmisión multimodal, no puede llevarse a cabo mediante la teoría clásica de circuitos, ya que los elementos conectados a ella necesitan de la definición de puertos multimodales.

Mediante este tipo de análisis multimodal se puede caracterizar de manera totalmente rigurosa tanto la impedancia de equipos como los filtros de red, puesto que

ahora no se tiene en cuenta tan solo su respuesta al modo común o al diferencial, sino también la interacción entre ambos (figura 1.6).

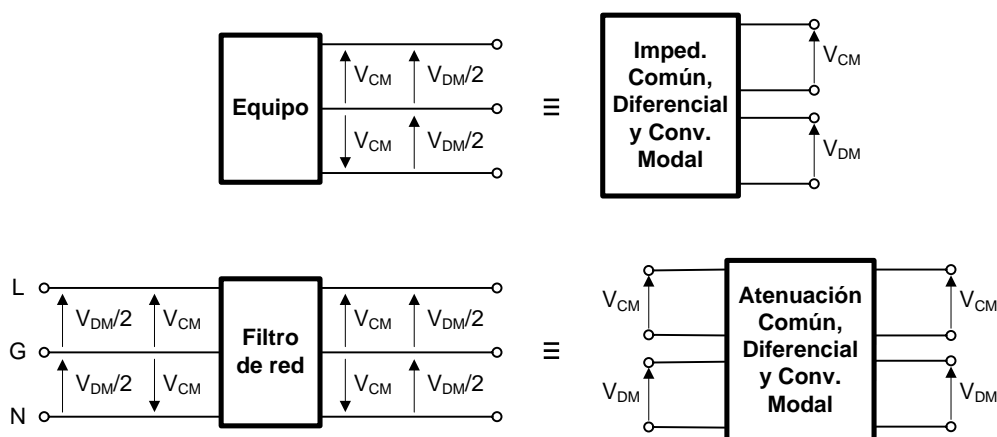


Figura 1.6: Análisis multimodal de equipos electrónicos y filtros de red.

### 1.2.5. Justificación del trabajo de investigación

Una gran cantidad de equipos electrónicos confían la supresión de interferencias conducidas a los filtros de red. La metodología típica para la selección de un filtro de red adecuado para un equipo consiste en la prueba y error: se prueban diversos modelos de filtros comerciales hasta conseguir los resultados deseados. Estos resultados suelen diferir en gran medida respecto de los teóricos debido a que:

1. Los filtros comerciales se diseñan para un entorno de referencia de impedancia característica  $50 \Omega$ , muy distinto del entorno de impedancias (del equipo electrónico y de la red eléctrica) en que el filtro tiene que actuar.
2. La caracterización de filtros de red es incompleta: se evalúa por separado como el equipo atenúa el modo común y el modo diferencial, pero no cómo convierte un modo en el otro. Así, si un hipotético filtro convirtiese toda la energía del modo común a diferencial, y viceversa, los sistemas de caracterización actuales llegarían a la conclusión que el filtro era perfecto, pero una vez montado en un equipo electrónico su rendimiento sería nulo.

Por tanto, un estudio detallado tanto de equipos como de filtros de red, que tenga en cuenta tanto los modos común y diferencial como la conversión entre ellos, sin duda va a significar una aportación muy útil tanto para fabricantes de equipos electrónicos como para fabricantes de filtros de red, que podrán adaptarse mejor a las necesidades de sus clientes y diseñar filtros de red mucho más eficientes que:



1. Se adapten a las características de impedancia de entrada de los equipos que deben proteger.
2. Eliminen de manera efectiva tanto el modo común como el modo diferencial.

En muchas ocasiones se tienden a sobredimensionar los filtros de red para mitigar las interferencias producidas por equipos electrónicos debido a las limitaciones que ofrecen los métodos actuales de caracterización de estos dispositivos. El estudio detallado que propone este trabajo de investigación, tanto de equipos electrónicos como de filtros de red, permitirá un diseño óptimo de los filtros que reducirá los costes de fabricación, ya que se obtendrán filtros perfectamente adaptados a los equipos a los que serán conectados.

### 1.3. Objetivos del trabajo

El *Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions* (GRECO) trabaja, desde hace años, en el modelado multimodal de circuitos en diversas configuraciones: circuitos coplanares de microondas y placas de circuito impreso (PCB). Se han generado una gran cantidad de modelos circuitales para diversos tipos de asimetrías, y se han comprobado para entornos coplanares en circuitos de microondas y para entornos de circuitos en PCB. El presente trabajo de investigación abre una nueva línea: análisis multimodal de redes de alimentación monofásicas. Los objetivos que se pretenden lograr son los siguientes (figura 1.7):

1. Desarrollo de nuevas técnicas de medida multimodal que permitan obtener una caracterización completa de 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; caracterización más general que aquellas basadas sólo en la computación separada de las atenuaciones en modo común y diferencial, ya que tiene en cuenta interferencias espurias que fluyen entre puertos debido a las asimetrías en el diseño de los filtros, de modo común a diferencial y viceversa.

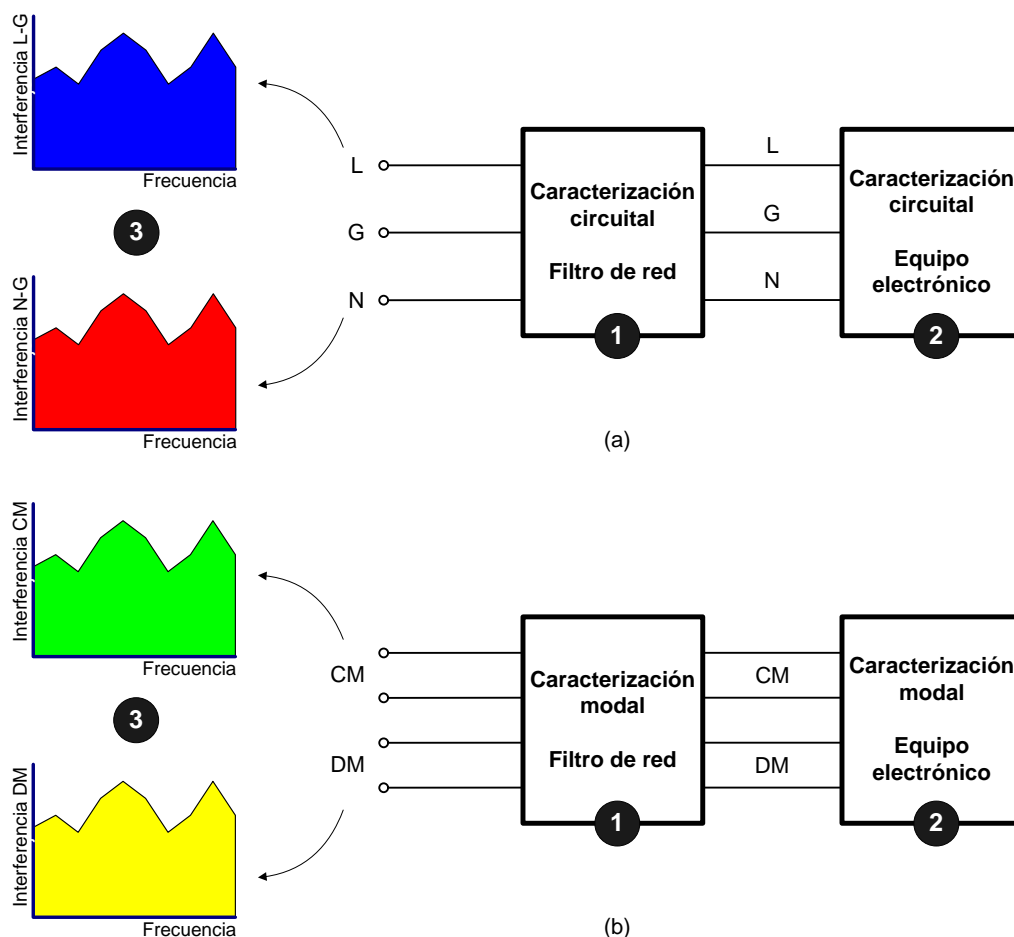
2. Desarrollo de nuevas técnicas de medida multimodal que permitan obtener una caracterización multimodal completa de los equipos eléctricos o electrónicos, teniendo en cuenta tanto sus impedancias, como su conversión modal y fuentes de interferencia.

Para que la caracterización de los filtros de red anteriormente mencionada tenga sentido en un contexto de diseño, es necesario también 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 eléctrica en forma de emisión conducida.

La caracterización que se propone para los equipos electrónicos es tanto circuital (puertos físicos línea-tierra y neutro-tierra) como modal (puertos modales común y diferencial). En ambos casos el modelo está compuesto por una red de tres impedancias en pi y dos fuentes de tensión, que modelan la interferencia generada por el dispositivo.

3. 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.



**Figura 1.7:** Objetivos del trabajo de investigación: caracterización de filtros de red, caracterización de equipos electrónicos y predicción de interferencias conducidas ((a) circuital; (b) modal).

Los estándares y métodos de medida actuales no permiten predecir de manera precisa el nivel de interferencia conducida que provoca un equipo electrónico

conectado a un filtro de red. A partir de la consecución de los dos primeros objetivos, es decir, de la completa caracterización de equipos electrónicos y filtros de red, se plantea una nueva metodología para poder llevar a cabo una correcta predicción del nivel de las interferencias; predicción que 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). Este punto de vista multimodal facilita la comprensión de algunos fenómenos que se producen como la pérdida de eficiencia del filtro de red o el intercambio modal debido a desadaptaciones y asimetrías en ambos dispositivos.

4. Difusión de los resultados obtenidos entre la comunidad científica.

Publicación de los resultados obtenidos en congresos y revistas de reconocido prestigio en el sector de la Compatibilidad Electromagnética.



## Capítulo 2

# FILTROS DE RED

### Contenidos de este capítulo

---

2.1. Pérdidas de inserción en filtros de EMI . . . . .	15
2.2. Pérdidas de inserción en filtros de red . . . . .	18
2.3. Diseño de filtros de red . . . . .	20
2.4. Medida de la interferencia en modo común y diferencial . . . . .	21
2.5. Caracterización de los filtros de red . . . . .	23
2.6. Conversión modal . . . . .	24
2.7. Caracterización de la impedancia de equipos electrónicos . . . . .	28
2.8. Caracterización de la impedancia de la red eléctrica . . . . .	31
2.9. Situación actual . . . . .	34

---

Este capítulo presenta el panorama actual relacionado con los filtros de red, estableciendo una situación de partida que permitirá determinar cuáles son las aportaciones realizadas por el Grupo en este trabajo de investigación. En este capítulo se describen los estándares actuales que definen los filtros de red (basados en el parámetro pérdidas de inserción), se plantean algunas estrategias para su diseño, y se analizan los métodos existentes para la caracterización de filtros de red, equipos electrónicos y red eléctrica.

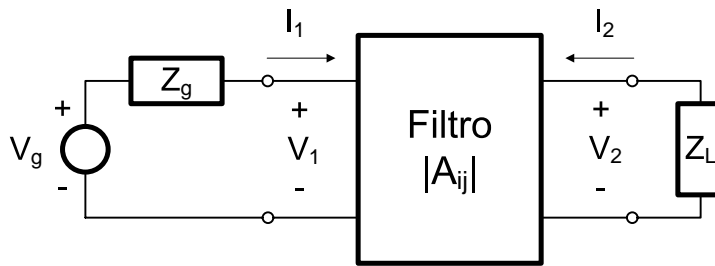
### 2.1. Pérdidas de inserción en filtros de EMI

La descripción del comportamiento de un filtro de EMI, considerando éste como un cuadripolo insertado entre una fuente y una carga (figura 2.1), se hace relacionando las magnitudes de entrada y salida mediante la matriz de transferencia  $A_{ij}$ , definida de la siguiente manera [1]-[4]:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$a_{11}V_1 + a_{12}I_1 = V_2 \quad (2.2)$$

$$a_{21}V_1 + a_{22}I_1 = I_2$$



**Figura 2.1:** Cuadripolo equivalente para el estudio de la función de transferencia de un filtro de EMI.

El significado de cada uno de los elementos de la matriz es el siguiente:

- $A_{vr}$ : ganancia de tensión inversa con entrada a circuito abierto.

$$a_{11} = \left. \frac{V_2}{V_1} \right|_{I_1=0} = \frac{1}{A_{vr}} \quad (2.3)$$

- $G_r$ : transconductancia inversa con entrada en cortocircuito.

$$a_{12} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{V_1=0} = \frac{1}{G_r} \quad (2.4)$$

- $Z_r$ : transimpedancia inversa con entrada a circuito abierto.

$$a_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{I_1=0} = \frac{1}{Z_r} \quad (2.5)$$

- $A_{ir}$ : ganancia de corriente inversa con entrada en cortocircuito.

$$a_{22} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_1=0} = \frac{1}{A_{ir}} \quad (2.6)$$

Las normas internacionales que definen la efectividad de los filtros de EMI (CISPR-17 [5], MIL-STD-220B [6]) utilizan otro parámetro denominado pérdidas de inserción

(IL), el cual es función de la frecuencia y se define como la relación en decibelios entre la potencia transmitida a la carga sin filtro y con filtro intercalado:

$$IL_{(\omega)}[dB] = 10 \log \left| \frac{P_{(\omega)} \text{ sin filtro}}{P_{(\omega)} \text{ con filtro}} \right| \quad (2.7)$$

La medida de las pérdidas de inserción se realiza según el esquema de la figura 2.2. El conmutador permite realizar primero la medida con filtro (canal superior), y posteriormente la medida sin filtro (canal inferior). De esta manera se determina los decibelios que atenúa el filtro a cada frecuencia de operación. La medida se lleva a cabo con impedancias de fuente ( $Z_g$ ) y de carga ( $Z_L$ ) normalizadas [5]-[8]:

- MIL-STD-220B:

$$Z_L = Z_g = 50 \Omega$$

- CISPR-17:

$$Z_L = Z_g = 50 \Omega$$

$$Z_L = Z_g = 75 \Omega$$

$$Z_L = 0.1 \Omega ; Z_g = 100 \Omega$$

$$Z_L = 100 \Omega ; Z_g = 0.1 \Omega$$

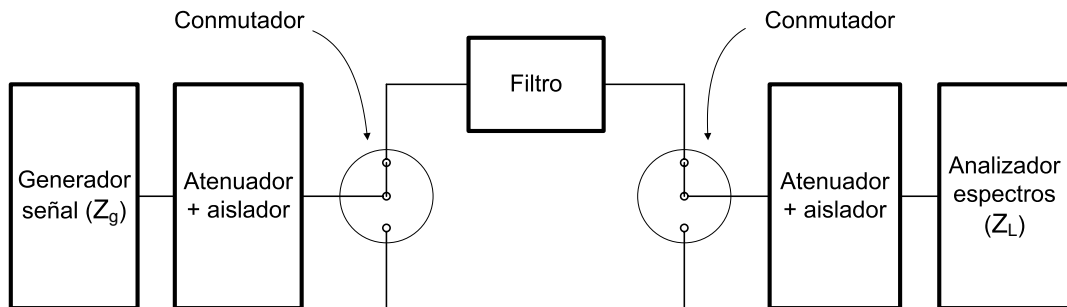


Figura 2.2: Medida de las pérdidas de inserción (MIL-STD-220B).

Las pérdidas de inserción se pueden escribir en función de los parámetros propios del filtro, obtenidos de su matriz de transferencia ( $A_{ij}$ ), resultando la siguiente expresión [1]-[4], [9]:

$$IL_{(\omega)}[dB] = 20 \log \left| \frac{a_{12} + a_{11}Z_L + a_{22}Z_g + a_{21}Z_gZ_L}{Z_g + Z_L} \right| \quad (2.8)$$

Las ecuaciones anteriores indican que las características de funcionamiento de un filtro de EMI pueden mostrarse mediante un gráfico de *Bode* que representa las pérdidas de inserción en función de la frecuencia. Pero según la ecuación 2.8, los valores de

$IL(\omega)$  no dependen exclusivamente del filtro, sino también de la fuente y de la carga. Por ello será imposible definir las características de un filtro en términos de pérdidas de inserción sin referirse a unas condiciones particulares de fuente y carga. En las referencias [10], [11] se miden las pérdidas de inserción de filtros de EMI siguiendo el esquema propuesto por la norma MIL-STD-220B [6].

## 2.2. Pérdidas de inserción en filtros de red

El modelo de filtro de EMI utilizado en la definición de pérdidas de inserción de la figura 2.2 consta de una red de dos puertos. Sin embargo, los filtros de red son redes de cuatro puertos que engloban los terminales de línea (L), neutro (N) y tierra (G) de línea y de carga (figura 1.3). Un filtro de red no se puede tratar como dos redes independientes de dos puertos debido a que los condensadores  $C_X$ ,  $C_Y$  y el choque proporcionan un alto grado de acoplamiento entre línea y neutro. Por tanto, para determinar las pérdidas de inserción de los filtros de red se ha de establecer una configuración de medida que tenga en cuenta este acoplamiento entre fases, ya que la norma MIL-STD-220B sólo describe el comportamiento de filtros de dos puertos [12].

La norma ANSI C63.13 [13] ofrece un método para medir las pérdidas de inserción de los filtros de red. Propone dos nuevas configuraciones de medida que permiten determinar las pérdidas de inserción en modo común (figura 2.3) y las pérdidas de inserción en modo diferencial (figura 2.4).

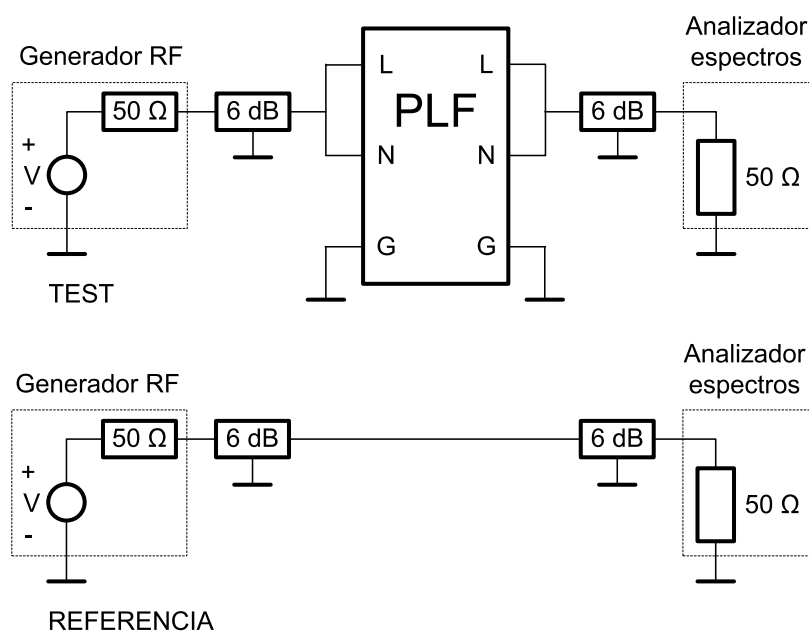


Figura 2.3: Medida de las pérdidas de inserción en modo común (ANSI C63.13).



Para el modo común, los terminales de línea (L) y neutro (N) están al mismo potencial respecto a tierra (G), por lo que la configuración de medida los conecta en paralelo (figura 2.3). Las pérdidas de inserción en modo común se miden respecto a una referencia (2.7), que se establece substituyendo el filtro de red por una conexión directa entre generador y carga. La medida se lleva a cabo con impedancias de generador y carga de  $50 \Omega$ . Los atenuadores de 6 dB sirven para paliar el efecto de malas adaptaciones en el sistema, siendo las ondas reflejadas atenuadas 12 dB.

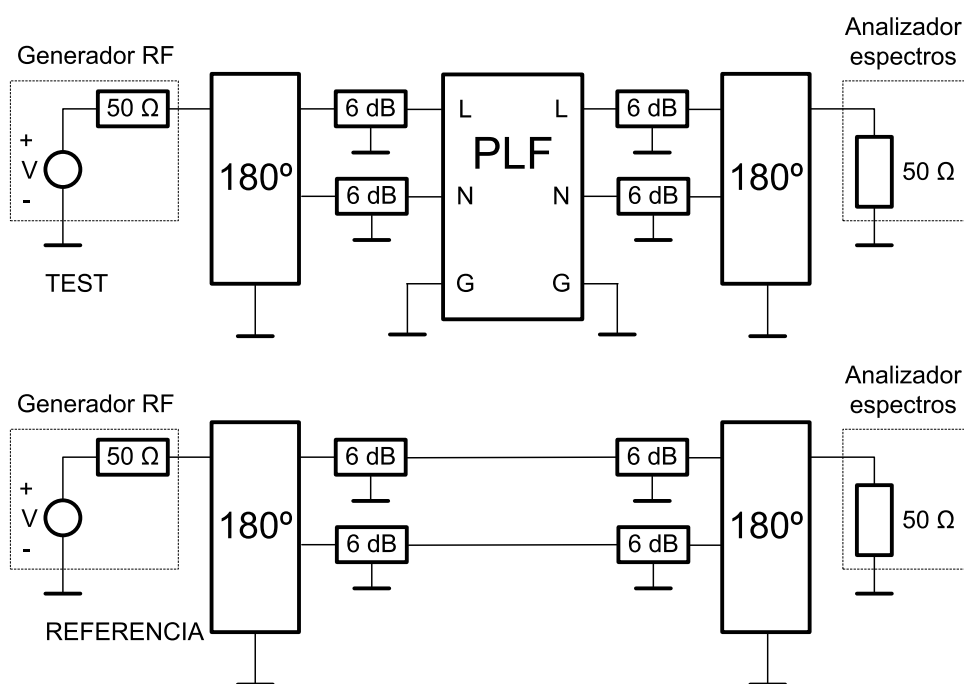


Figura 2.4: Medida de las pérdidas de inserción en modo diferencial (ANSI C63.13).

Para el modo diferencial, las señales en los terminales de línea (L) y neutro (N) son de igual magnitud pero de fase opuesta, por lo que la configuración de medida utiliza divisores de potencia o combinadores de  $50\Omega/180^\circ$  (figura 2.4). De nuevo, la referencia para determinar la pérdidas de inserción en modo diferencial (2.7) se establece substituyendo el filtro de red por una conexión directa entre generador y carga. La medida se lleva a cabo con impedancias de generador y carga de  $50 \Omega$ . En [12], [14] se miden las pérdidas de inserción de filtros de red siguiendo el esquema propuesto por la norma ANSI C63.13 [13].

El fabricante de filtros de red ofrece las gráficas de pérdidas de inserción en modo común y en modo diferencial para impedancias de línea y carga de  $50 \Omega$ ; gráficas que extrae de aplicar los métodos de medida propuestos por la norma ANSI C63.13. Sin embargo, hay que entender que dichas curvas corresponden a unas condiciones particulares de prueba que difícilmente coincidirán con las de una aplicación con-

creta. Esto explica que incluso filtros de red medidos según norma y con una respuesta estándar a primera vista adecuada, puedan presentar en una aplicación real problemas de bajo rechazo a ciertas frecuencias, en contra de lo previsto. En la bibliografía se pueden consultar múltiples ejemplos de cómo el funcionamiento del filtro de red es fuertemente dependiente del entorno que lo rodea: impedancias de línea y carga [2]-[4], [8], [10], [15]-[18].

Un aspecto claramente discutible respecto al método de medida propuesto por la norma ANSI C63.13 es que se considera puramente resistivo el comportamiento de la red eléctrica, circunstancia harto improbable en la práctica. En [8] se propone como solución más significativa la utilización de una impedancia de  $50 \Omega$  en paralelo con  $50 \mu\text{H}$  [19] para simular la red eléctrica en la medida de pérdidas de inserción (en modo común y en modo diferencial) de filtros de red.

De lo anterior se concluye que no pueden seleccionarse los filtros comparando simplemente sus curvas de respuesta estándar y que, por tanto, no hay filtros buenos o malos en sí mismos, sino filtros adaptados o no a una aplicación particular.

### 2.3. Diseño de filtros de red

Son tres las causas que hacen que a menudo el diseño de filtros de red se base en la simple experiencia del ingeniero o en la prueba y error [20]:

- No existe un método de diseño estándar.
- Las impedancias de línea y carga no son constantes en la banda de interés.
- El método de medida de las pérdidas de inserción a menudo condiciona el método de diseño.

Gran parte de la bibliografía referente al diseño de filtros de red propone técnicas de diagnóstico para la modificación de los elementos que componen el filtro con el propósito de reducir la emisión conducida. La clave para conseguir una modificación eficiente del filtro, en contra del cambio basado en la prueba y error, es identificar qué componente de la emisión conducida (modo común o modo diferencial) es la que predomina a la frecuencia de la interferencia. Una vez identificada la componente principal, entonces se modifican adecuadamente sólo aquellos elementos del filtro que tienen un efecto directo sobre ésta. Una situación frecuente al tratar con filtros de red es que al modificar uno de sus elementos no se observa cambio apreciable en la emisión conducida total. Esto es debido a que dicho elemento no interviene en absoluto en la mitigación de la principal componente de la interferencia. En [21]-[23] se define el papel que desempeña cada uno de los elementos que conforman un filtro de red típico (figura 1.3) en la mitigación de interferencias en modo común y modo diferencial. En [24] se destaca la repercusión que tienen los efectos parásitos de

los elementos que conforman el filtro de red sobre el comportamiento de éste a alta frecuencia. En [22], [24] se proponen circuitos equivalentes que ilustran el efecto de los elementos del filtro de red sobre cada componente (modo común y modo diferencial) de la interferencia conducida.

Distintos autores han puesto a disposición de todos sus propias experiencias y recetas para el diseño de filtros de red. En [21] se prueba un mismo equipo electrónico con diferentes filtros, lo que demuestra que seleccionando los condensadores e inductancias adecuadas se reduce la emisión conducida. En [25] se propone un método de diseño sistemático para determinar los elementos, la topología y el orden del filtro que satisfacen un criterio de optimización: coste, peso, volumen. En [23] se establece primero las características de atenuación del filtro de red en la parte baja del espectro, y posteriormente se lleva a cabo los ajustes necesarios para establecer la parte alta; todo ello partiendo de una topología de filtro concreta. En [26] se propone un método de cinco pasos para el diseño de filtros de red: medir impedancia de línea, medir impedancia de carga, medir componentes en modo común y modo diferencial, establecer las pérdidas de inserción necesarias para ambos modos, y seleccionar los elementos del filtro necesario y sus valores mediante la matriz de transferencia  $A_{ij}$  (diferente para cada tipología de filtro). En [27] se presenta una manera de hallar el filtro de red óptimo mediante métodos de optimización global y métodos combinatorios (p.e. *simulated annealing*, *multi level single linkage*). Los elementos del filtro de red seleccionados forman parte de una librería de componentes específicos, comparando en todo momento las características de atenuación obtenidas con las requeridas por el diseñador. Como se puede observar en la bibliografía propuesta, no existe un método estándar para el diseño de filtros de red, sino un conjunto de recomendaciones y maneras de hacer ofrecidas por los distintos autores.

## 2.4. Medida de la interferencia en modo común y diferencial

Existen tres razones básicas por las que resulta interesante conocer la interferencia en modo común y en modo diferencial que emite un equipo electrónico:

- Los métodos de diseño de filtros de red planteados en el apartado anterior tienen un punto en común: miden la contribución de cada componente (modo común y modo diferencial) sobre la interferencia conducida total, y posteriormente seleccionan los elementos del filtro para mitigar ambas por separado.
- Separando modo común y modo diferencial se puede determinar cuando el choque de modo común de un filtro de red entra en saturación [28].
- La interferencia en modo común y en modo diferencial se genera mediante mecanismos diferentes. El conocer a priori ambas componentes es la primera

pista para determinar dónde está la fuente de ruido del equipo electrónico.

La norma UNE-EN 55022 [29] establece la configuración de medida para determinar la emisión conducida de un equipo electrónico (interferencia en los terminales de línea y neutro). Para medir la interferencia en modo común y modo diferencial producida por el equipo basta con insertar un combinador de señal entre la LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) y el analizador de espectros. Si el combinador suma las señales procedentes de los terminales de monitorización de la LISN (combinador  $0^\circ$ ), el analizador registra la interferencia en modo común (figura 2.5). Si el combinador resta las señales procedentes de los terminales de monitorización de la LISN (combinador  $180^\circ$ ), el analizador registra la interferencia en modo diferencial (figura 2.6).

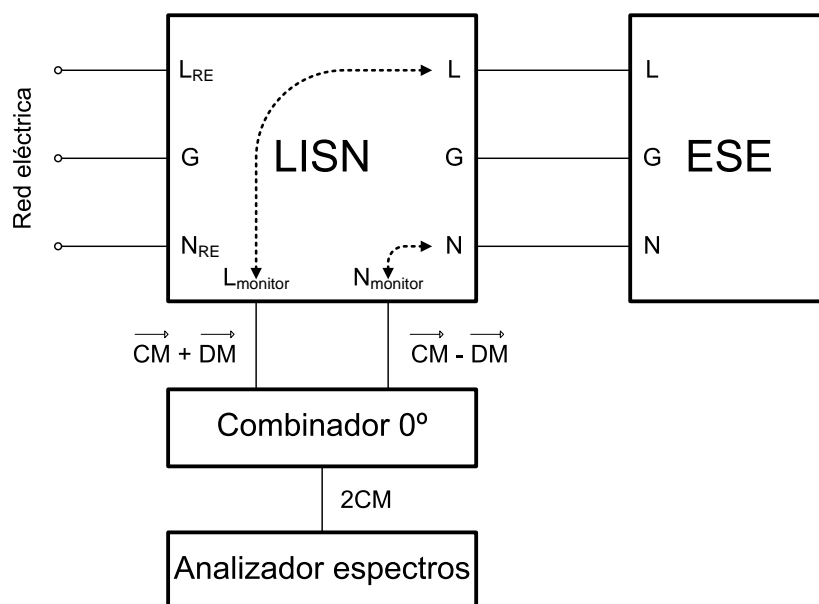


Figura 2.5: Medida de la interferencia en modo común de un equipo electrónico.

Los combinadores de señal necesarios para extraer las componentes de la interferencia pueden ser implementados de diversas maneras. En [30], [31] se propone la utilización de combinadores de RF comerciales. En [32] se plantea la implementación artesanal de los dos combinadores a base de componentes pasivos, los cuales tienen un coste reducido, son fáciles de construir y ofrecen una lectura exacta de las interferencias en modo común y modo diferencial. En [33] se propone la utilización de un circuito formado por transformadores de relación 1:1 y conmutadores para conseguir la suma y la resta de las señales interferentes procedentes del equipo electrónico. En [34], [35] se plantea un nuevo circuito compuesto también a base de transformadores que permite medir simultáneamente las componentes en modo común y modo diferencial sobre dos cargas distintas.

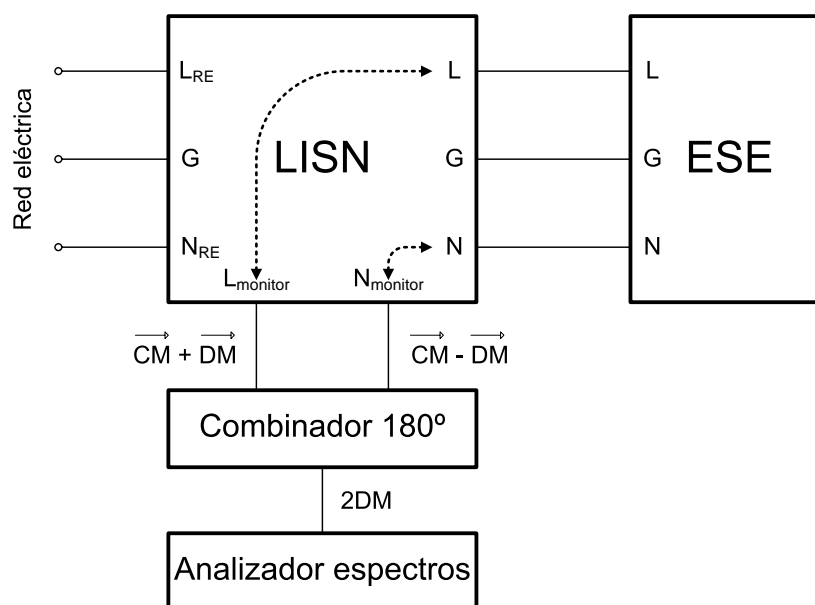


Figura 2.6: Medida de la interferencia en modo diferencial de un equipo electrónico.

Un sistema de medida alternativo al propuesto (figuras 2.5 y 2.6) es llevar a cabo la medida en el dominio del tiempo mediante un osciloscopio de dos canales (figura 2.7). La suma y la resta de las señales procedentes de los terminales de monitorización de la LISN se puede efectuar desde el propio osciloscopio u ordenador conectado a éste. En [32], [36] se propone esta nueva configuración de medida y la posterior conversión de las componentes en modo común y modo diferencial al dominio de la frecuencia mediante las transformadas de *Fourier*, *Bartlett* o *Welch*.

## 2.5. Caracterización de los filtros de red

Saber caracterizar un filtro de red resulta muy interesante de cara a predecir su comportamiento cuando se encuentra inmerso en una aplicación real. En vez de caracterizar el filtro de red mediante las curvas de atenuación convencionales (pérdidas de inserción en modo común y modo diferencial presentadas en el apartado 2.2), [37] propone que el filtro se caracterice mediante su matriz de parámetros  $Z$ . La figura 2.8 muestra como un filtro de red típico se descompone en dos redes de dos puertos, una que caracteriza el modo común y otra el modo diferencial. Así, para describir cada nuevo filtro (modo común y modo diferencial) se emplea una matriz de parámetros  $Z$ . Esta caracterización permite calcular las pérdidas de inserción en modo común y modo diferencial del filtro de red para unas condiciones de línea y carga determinadas:

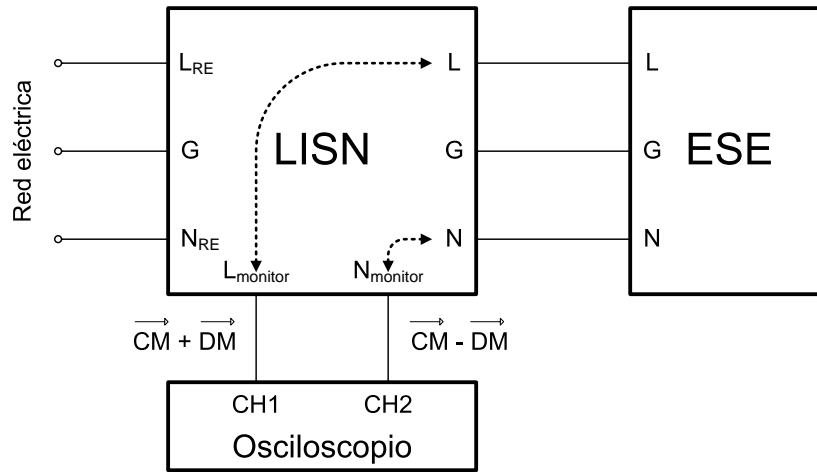


Figura 2.7: Medida de la interferencia en modo común y modo diferencial en el dominio del tiempo.

$$|IL| = \left| \frac{Z_S Z_L + Z_L Z_{11} + Z_S Z_{22} + Z_{11} Z_{22} - Z_T^2}{(Z_S + Z_L) Z_T} \right| \quad (2.9)$$

En [38] se propone un nuevo método para caracterizar los filtros de red, que es mediante el empleo de su matriz de parámetros  $S$ , tal y como indica la figura 2.9 y la ecuación 2.10. Una vez medidos los parámetros  $S$  del filtro (con un analizador de redes), el artículo utiliza una herramienta de simulación circuital para predecir el comportamiento de éste en condiciones de línea y carga distintas de  $50 \Omega$ .

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

## 2.6. Conversión modal

En los filtros de red se produce un fenómeno de gran relevancia denominado conversión modal (de modo común a modo diferencial y viceversa), el cual provoca una degradación indeseada de las pérdidas de inserción en modo común y diferencial. La conversión modal ocurre debido a la asimetría de los filtros, y puede causar los siguientes efectos [39]:

- Conversión parcial de los armónicos de conmutación de modo diferencial en emisión conducida de modo común sobre los terminales de entrada del filtro, y su consiguiente emisión radiada.
- Susceptibilidad a las corrientes de modo común inducidas sobre los terminales

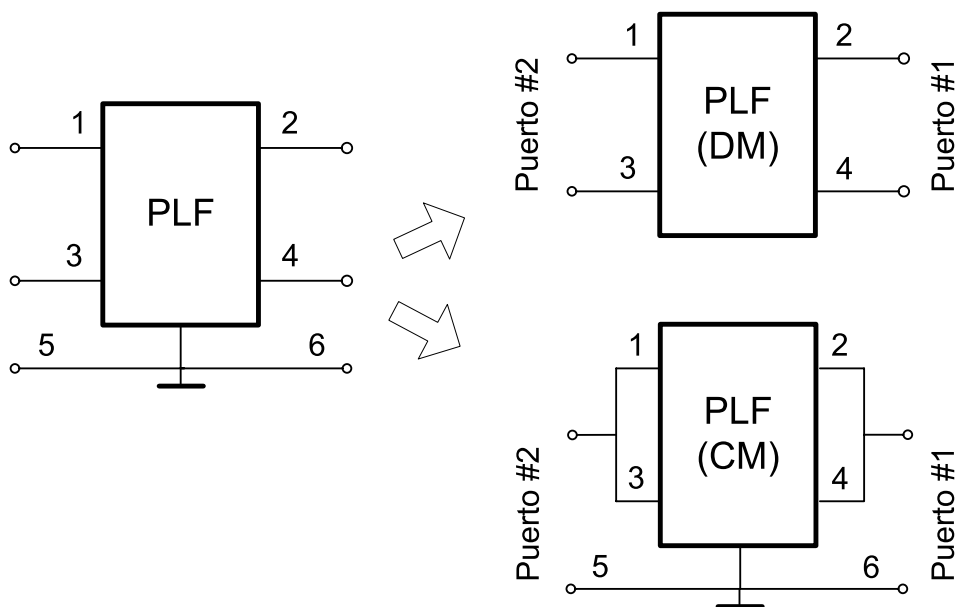


Figura 2.8: Caracterización de filtros de red mediante matriz de impedancias  $Z$ .

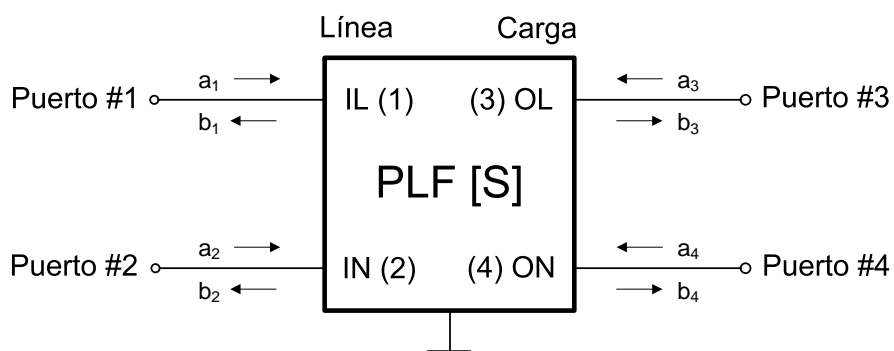


Figura 2.9: Caracterización de filtros de red mediante matriz de parámetros  $S$ .

de entrada del filtro durante los ensayos de inmunidad conducida y radiada [40]-[42].

- Excesiva emisión radiada debido a señales de banda ancha en modo diferencial que se convierten a modo común, tales como *Ethernet* o PLC (*Power Line Communications*).

Existen al menos tres razones que justifican las asimetrías de los filtros:

- Topología asimétrica del filtro.
- Amplia tolerancia en los valores de los elementos que lo conforman.
- *Layout* y parásitos asimétricos, como la inductancia de fuga (*leakage inductance*) de los choques de modo común.

La conversión modal provoca que los elementos del filtro actúen a la vez como supresores de interferencias y fuentes de ruido en función del modo. No sería correcto pretender suprimir de manera eficiente la interferencia de modo diferencial teniendo en cuenta sólo los denominados “elementos de modo diferencial” localizados en alguna sección asimétrica del filtro, y excluyendo por completo todos los “elementos de modo común”. Los condensadores de modo común, por ejemplo, pueden convertir la interferencia de modo diferencial en interferencia conducida de modo común, la cual puede llegar a ser una fuente de emisión radiada.

Con esto se concluye que aquellas formas de caracterizar los filtros de red que tratan el modo común y el modo diferencial como variables independientes (pérdidas de inserción (apartado 2.2) y matriz de parámetros  $Z$  (apartado 2.5)) no aportan una información completa acerca de su comportamiento, ya que están obviando la posible conversión modal que pueda producirse en su estructura.

En [43] se introduce el concepto de matriz modal de parámetros  $S$  (*mixed-mode S-parameters*) aplicada a una línea *microstrip*, la cual se modela según la figura 2.10 y la ecuación 2.11. El puerto físico 1 se descompone en dos puertos conceptuales, uno de modo común y otro de modo diferencial. Lo mismo sucede con el puerto físico 2.

$$\begin{bmatrix} b_{dm1} \\ b_{dm2} \\ b_{cm1} \\ b_{cm2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{dd} & S_{dc} \\ S_{cd} & S_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{dm1} \\ a_{dm2} \\ a_{cm1} \\ a_{cm2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La matriz modal de parámetros  $S$  está compuesta por cuatro submatrices:

$S_{dd}$  : parámetros  $S$  modo diferencial

$S_{cc}$  : parámetros  $S$  modo común



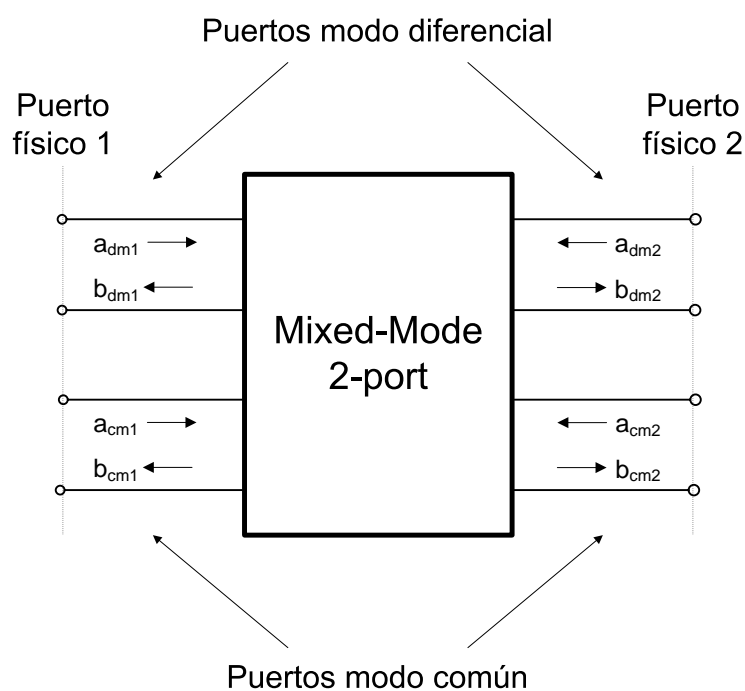


Figura 2.10: Caracterización de una línea *microstrip* mediante matriz modal de parámetros  $S$ .

$S_{dc}$  : conversión de modo común a modo diferencial

$S_{cd}$  : conversión de modo diferencial a modo común,

las cuales ofrecen una información completa acerca del comportamiento en modo común, modo diferencial y conversión modal entre los puertos de entrada y salida de la línea *microstrip*. Los parámetros  $S$  modales se extraen matemáticamente a partir de los parámetros  $S$  estándar medidos con un analizador de redes [44]. En [45] se generaliza el análisis matemático realizado en [43] para hallar la matriz modal de parámetros  $S$  de una red de  $N$  puertos. El trabajo de investigación presentado aquí pretende aplicar esta teoría a los filtros de red con el objeto de obtener una caracterización completa de su funcionamiento.

El método de medida FPVNA (*four-port vector-network analyzer*) mide los parámetros  $S$  estándar y los convierte después a modales matemáticamente [46]. En [47] se propone un nuevo sistema de medida: PMVNA (*pure-mode vector-network analyzer*), en el que se excitan directamente los modos común y diferencial a la entrada y salida de la línea *microstrip* con el objeto de hallar directamente la matriz modal de parámetros  $S$ .

## 2.7. Caracterización de la impedancia de equipos electrónicos

En apartados anteriores ha quedado demostrada la dependencia que tiene el filtro de red respecto a las impedancias de línea y carga que lo rodean. Al igual que algunos autores han buscado la manera de caracterizar los filtros de red, otros han investigado también la manera de caracterizar el comportamiento de los equipos electrónicos para, entre otras cosas, mejorar el análisis del conjunto filtro más equipo.

En [48] se propone dos circuitos equivalentes, uno para modo común y otro para modo diferencial, que caracterizan el comportamiento de las fuentes de alimentación conmutadas. Ambos circuitos tienen una misma estructura equivalente *Norton*, es decir, un condensador, una inductancia, una resistencia y una fuente de corriente conectados en paralelo. El artículo utiliza los modelos propuestos para hallar una configuración de filtro de red apropiada a dichos equipos.

En [49] se plantea un modelo teórico de impedancia en modo común, compuesto por elementos pasivos, para un equipo electrónico de potencia formado por un *inverter*, cables y un motor de inducción. El artículo también presenta un sistema de medida para determinar la impedancia de entrada del equipo al modo común que le permite validar el modelo propuesto.

En [50] se plantea un método para medir la impedancia de entrada que presentan las fuentes conmutadas al modo común y al modo diferencial más simple que el propuesto en [48]. El artículo define la impedancia en modo común ( $Z_{scm}$ ) cortocircuitando los terminales de línea y neutro del equipo electrónico (figura 2.11(a)). La impedancia en modo diferencial ( $Z_{sdm}$ ) se define entre los terminales de línea y neutro (figura 2.11(b)). Siguiendo las definiciones anteriores, y cargando el equipo electrónico con una LISN de impedancia normalizada, éste se puede reducir a un circuito equivalente *Thevenin* como el mostrado en la figura 2.11(c) para cada uno de los modos.

Para determinar el valor de  $Z_s$  (figura 2.11(c)), en modo común ( $Z_{scm}$ ) y en modo diferencial ( $Z_{sdm}$ ), se inserta una impedancia en serie ( $Z_{series}$ ) o en paralelo ( $Z_{shunt}$ ) entre el equipo electrónico y la LISN (figura 2.12), y se mide la atenuación que ésta produce sobre la carga:

$$A = \frac{V_{load \ sin \ Z_{series}}}{V_{load \ con \ Z_{series}}} \quad (2.12)$$

$$A = \frac{V_{load \ sin \ Z_{shunt}}}{V_{load \ con \ Z_{shunt}}}$$

El hecho de colocar la impedancia en serie o en paralelo viene determinado por los valores de  $Z_s$  y  $R_{load}$ . A partir de la atenuación medida ( $A$ ), se calcula el valor de  $Z_s$  mediante las ecuaciones que se deducen a continuación:

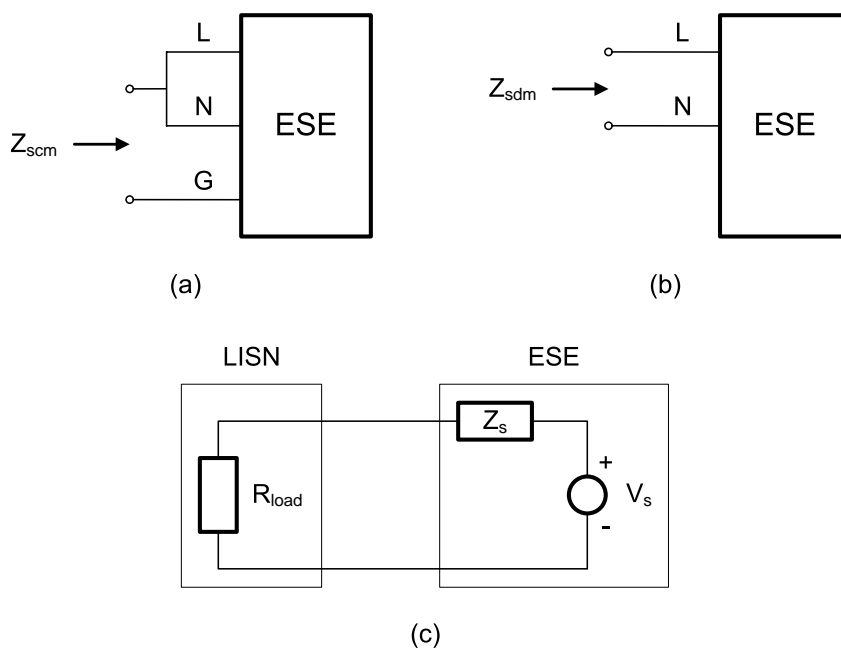


Figura 2.11: Definición de impedancias modales de un ESE: (a) modo común; (b) modo diferencial; (c) equivalente *Thevenin* para cada uno de los modos.

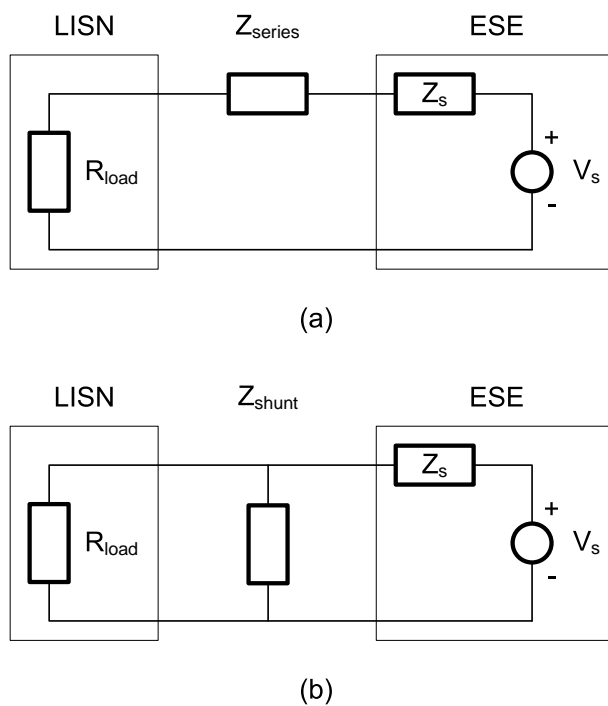


Figura 2.12: Medida de  $Z_s$  mediante el método de pérdidas de inserción: (a) método de inserción serie; (b) método de inserción paralelo.

1. Si  $|Z_s| \gg R_{load}$ , se conecta una  $|Z_{series}| \gg |Z_s|$

$$A = \frac{\frac{R_{load}}{R_{load}+Z_s} \cdot V_s}{\frac{R_{load}}{R_{load}+Z_s+Z_{series}} \cdot V_s} = 1 + \frac{Z_{series}}{R_{load} + Z_s} \approx 1 + \frac{Z_{series}}{Z_s} \quad (2.13)$$

$$|Z_s| \approx \frac{|Z_{series}|}{|A|} \quad (2.14)$$

2. Si  $|Z_s| \ll R_{load}$ , se conecta una  $|Z_{shunt}| \ll |Z_s|$

$$A = \frac{\frac{R_{load}}{R_{load}+Z_s} \cdot V_s}{\frac{R_{load} \parallel Z_{shunt}}{R_{load} \parallel Z_{shunt} + Z_s} \cdot V_s} = 1 + \frac{R_{load} \parallel Z_s}{Z_{shunt}} \approx 1 + \frac{Z_s}{Z_{shunt}} \quad (2.15)$$

$$|Z_s| \approx |Z_{shunt}| \cdot |A| \quad (2.16)$$

3. Si  $|Z_s| \approx R_{load}$ , entonces los dos casos anteriores son satisfactorios para determinar  $Z_s$ .

Combinando la información obtenida aquí de las impedancias en modo común y en modo diferencial de un equipo electrónico [50] con los resultados aportados por el método de caracterización de filtros de red presentado en [37] (apartado 2.5), es posible predecir la atenuación real de un filtro concreto cuando se utiliza junto a una fuente de alimentación conmutada. El inconveniente es que todavía se analiza modo común y modo diferencial como variables independientes.

En [51], [52] se propone el método de las dos sondas de corriente para medir la impedancia de modo común y de modo diferencial de una SMPS (*low-power switched mode power supply*) bajo diferentes condiciones de carga. El método de las dos sondas de corriente se utiliza en numerosos artículos, tanto para hallar impedancias de equipos (p.e. módem PLC [53]) como impedancias de la red eléctrica. La figura 2.13 muestra la configuración de medida para determinar el valor de la impedancia desconocida  $Z_X$ , la cual se obtiene aplicando la ecuación 2.17:

$$Z_X = \frac{R_{std} \cdot V_{p2} \Big|_{Z_x=R_{std}}}{V_{p2} \Big|_{Z_x=desconocida}} - Z_{IN} \quad (2.17)$$

donde:

$$Z_{IN} = \frac{R_{std} \cdot V_{p2} \Big|_{Z_x=R_{std}}}{V_{p2} \Big|_{Z_x=0}} - Z_{IN} \quad (2.18)$$

$R_{std}$  : impedancia patrón que se utiliza para calibrar el sistema de medida

$V_{p2} \Big|_{Z_x=R_{std}}$  : tensión medida en la sonda receptora cuando en los terminales b-b' se conecta la impedancia patrón

$V_{p2} |_{Z_X=desconocida}$  : tensión medida en la sonda receptora cuando en los terminales b-b' se conecta la impedancia desconocida que se desea hallar

$V_{p2} |_{Z_X=0}$  : tensión medida en la sonda receptora cuando se cortocircuitan los terminales b-b'

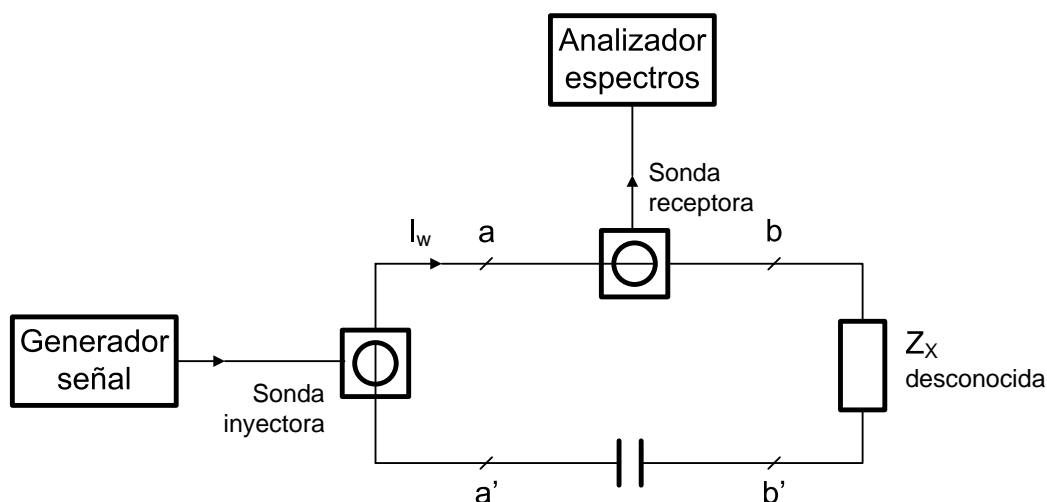
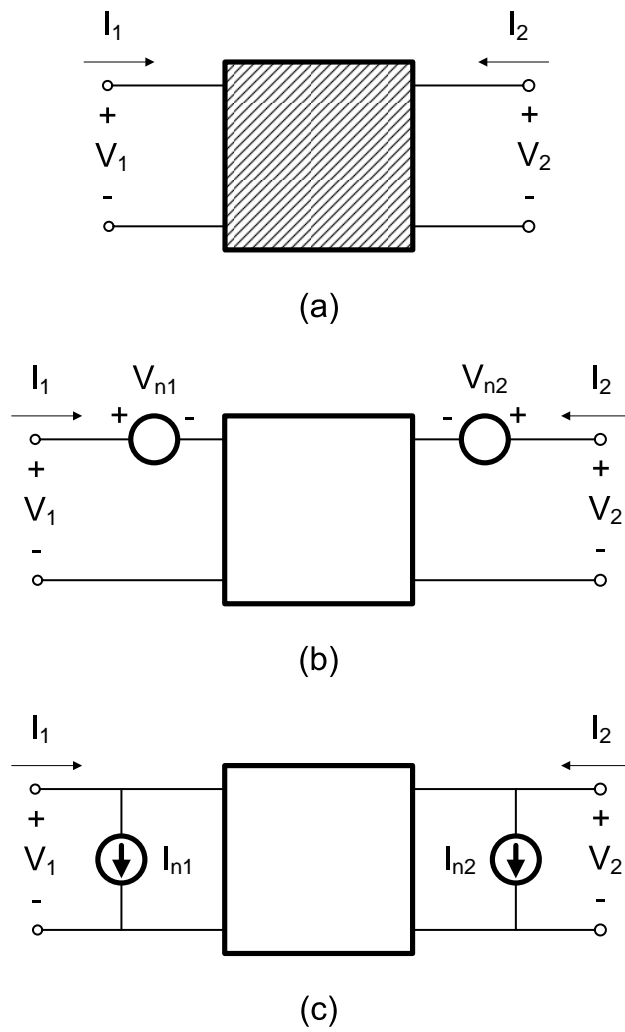


Figura 2.13: Configuración de medida básica del método de las dos sondas de corriente.

Para finalizar este apartado, se plantea otra posible manera de caracterizar los equipos electrónicos. La teoría clásica de cuadripolos comprende únicamente el análisis de cuadripolos pasivos y cuadripolos activos con fuentes internas de tensión o corriente sinusoidal de frecuencias concretas (figura 2.14(a)). En [54], [55] se amplía esta teoría manteniendo el cuadripolo original, esta vez libre de ruido, y añadiendo dos fuentes de tensión (figura 2.14(b)) o corriente (figura 2.14(c)) en los terminales del cuadripolo que aglutinan todo el ruido generado por éste. Estos modelos equivalentes describen de manera completa el comportamiento de cualquier cuadripolo en cuanto a ruido se refiere. Una configuración similar a la de la figura 2.14(b) se empleará en este trabajo de investigación para modelar los equipos electrónicos: en el interior del cuadripolo se modelará la impedancia del equipo mediante una red de tres impedancia en pi, y las fuentes de tensión modelarán la interferencia generada por éste en la banda de interés.

## 2.8. Caracterización de la impedancia de la red eléctrica

Este apartado presenta algunas de las aportaciones que la bibliografía hallada ofrece para la medición del valor de la impedancia de la red eléctrica; parámetro clave



**Figura 2.14:** Teoría de cuadripolos: (a) cuadripolo con fuentes de ruido internas; (b) cuadripolo con fuentes de tensión; (c) cuadripolo con fuentes de corriente.

en el comportamiento de los filtros de red. En [56] se presenta el denominado método de las tres tensiones, en el que una impedancia de valor conocido (referencia) se conecta en serie con la impedancia que se desea medir (desconocida) y con una fuente de tensión sintonizada a la frecuencia de interés. La magnitud de la impedancia se halla comparando las tensiones que caen en las dos impedancias (referencia y desconocida). La fase de la impedancia se obtiene mediante la construcción de un diagrama vectorial a partir de las tensiones medidas en las dos impedancias y la fuente de tensión. En [57] se utiliza este mismo método de medida para investigar la posibilidad de utilizar la red eléctrica como red de área local (LAN) a pequeña escala.

Nicholson y Malack [58] publicaron resultados de la impedancia de la red eléctrica medida en diferentes puntos de los Estados Unidos. Las medidas se realizaron utilizando el método de las dos sondas de corriente (introducido por Southwick y Dolle [59]) en la banda de frecuencias que va de los 20 KHz a los 30 MHz. Estas medidas fueron comparadas posteriormente con medidas similares realizadas en Europa [60]. Más tarde, Kwasniok extendió el margen de medida hasta los 500 MHz ([61], [62]), y extrapólo el método de medida de las dos sondas de corriente a la medición de impedancias de entrada de equipos electrónicos [63].

En [64] se mide la impedancia de la red eléctrica insertando entre ésta y un generador de señal un circuito caracterizado mediante su matriz de parámetros  $ABCD$  (figura 2.15). Si se mide la impedancia a la entrada del circuito ( $Z_1 = V_1 / I_1$ ), se calcula de impedancia de la red como:

$$Z_{pl} = \frac{V_2}{I_2} = \frac{DZ_1 - B}{A - CZ_1} \quad (2.19)$$

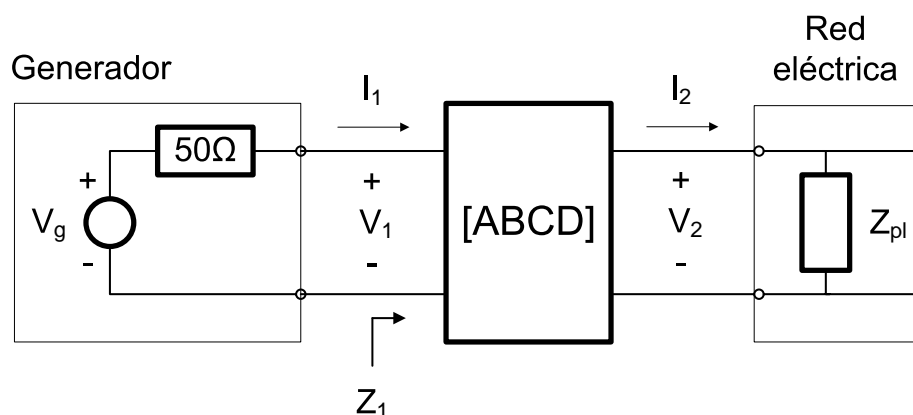


Figura 2.15: Medida de la impedancia de la red eléctrica mediante circuito ABCD.

## 2.9. Situación actual

Como ya se ha comentado anteriormente, el estándar empleado para caracterizar los filtros de red [13] está basado en medidas de atenuación en modo común y modo diferencial con impedancias de línea y de carga de  $50 \Omega$ . Este estándar no resulta útil para predecir el comportamiento del filtro en un entorno real, donde las impedancias pueden ser muy diferentes de  $50 \Omega$ , con lo que la eficiencia del filtro disminuirá y el resultado no será el esperado. Además, las medidas realizadas según el estándar no se pueden convertir a otras con impedancias de referencia de línea y de carga distintas de  $50 \Omega$ , ya que éstas carecen de información de fase. Por otro lado, señales que entran en el filtro en un cierto modo pueden ser convertidas al otro modo en su salida, no siendo detectada esta conversión modal por el estándar desde el momento en que las pérdidas de inserción en modo común (figura 2.3) y en modo diferencial (figura 2.4) se determinan empleando configuraciones de medida distintas. En la bibliografía se pueden encontrar técnicas que constatan algunas de las deficiencias de los estándares actuales, proponiendo en algunos casos técnicas para su mejora. En [38] se presenta una caracterización circuital completa para los filtros de red basada en la medida de parámetros  $S$ . En [39] se investiga de manera experimental la conversión entre modos (de común a diferencial, y viceversa). En [8], [15], [16] se analiza el efecto que tienen las impedancias de línea y de carga en las pérdidas de inserción en modo común y modo diferencial del filtro. Finalmente, en [36] se presenta una técnica basada en medidas tomadas en el dominio del tiempo para hallar el filtro de red óptimo para un equipo electrónico concreto.

En lo concerniente a la caracterización de equipos electrónicos, existen técnicas de medida en la literatura [50], [51] que determinan la impedancia que el equipo presenta al modo común y al modo diferencial. Pero, esta caracterización (vista desde los terminales de alimentación monofásicos del equipo) no aporta información acerca de:

- La interacción modal que puede tener lugar en el equipo.
- Los niveles de interferencia que el equipo suministra a una carga arbitraria conectada a éste, ya que los modelos propuestos carecen de fuentes de interferencia.

Por lo tanto, los estándares y métodos de medidas actuales para caracterizar el comportamiento de filtros de red y equipos electrónicos son insuficientes para predecir de manera precisa su funcionamiento conjunto. Este hecho provoca a menudo la elección o diseño de un filtro de red subóptimo para un equipo electrónico concreto. El presente trabajo de investigación se marca como objetivos mejorar la manera de caracterizar ambos dispositivos y, a partir los modelos propuestos, establecer una



metodología de predicción que permita analizar la interferencia conducida generada por el conjunto filtro de red más equipo electrónico.



## Capítulo 3

# CARACTERIZACIÓN MULTIMODAL DE FILTROS DE RED

### Contenidos de este capítulo

---

3.1. Introducción . . . . .	37
3.2. Caracterización circuital . . . . .	39
3.3. Caracterización modal . . . . .	40
3.3.1. Transformación impedancias de referencia modales . . . . .	43
3.4. Sistema de medida . . . . .	44
3.5. Aplicaciones del modelado multimodal . . . . .	44
3.5.1. Pérdidas de inserción en modo común y en modo diferencial	46
3.5.2. Pérdidas de inserción para impedancias de línea y carga ar- bitrarias . . . . .	51
3.5.3. Conversión de energía entre modos común y diferencial . . .	51

---

Una vez se ha presentado la temática objeto del trabajo de investigación, y mostrado el panorama actual relacionado con los filtros de red, se inicia un análisis más en profundidad de las soluciones aportadas para lograr los objetivos marcados y se exponen los resultados alcanzados. Este capítulo presenta un nuevo método de medida multimodal que permite caracterizar el comportamiento de los filtros de red.

### 3.1. Introducción

Las señales eléctricas en los terminales de alimentación monofásicos de cualquier dispositivo (línea (L), neutro (N) y tierra (G)) se pueden caracterizar de dos maneras (figura 3.1):

1. Caracterización circuital: las señales eléctricas se caracterizan mediante tensiones entre línea y tierra ( $V_L$ ) y entre neutro y tierra ( $V_N$ ), y corrientes que fluyen por los terminales de línea ( $I_L$ ) y neutro ( $I_N$ ).
2. Caracterización modal: las señales eléctricas se caracterizan mediante su descomposición modal común y diferencial.  $V_{CM}$ ,  $I_{CM}$  son la tensión y la corriente en modo común;  $V_{DM}$ ,  $I_{DM}$  son la tensión y la corriente en modo diferencial.

Las corrientes circuitales ( $I_L$ ,  $I_N$ ) se pueden descomponer en (figura 3.1):

- Una componente en modo diferencial ( $I_{DM}$ ) que fluye por la línea y regresa por el neutro.
- Una componente en modo común ( $I_{CM}$ ) que fluye la mitad por la línea y la otra mitad por el neutro, regresando ambas por tierra.

Las tensiones circuitales ( $V_L$ ,  $V_N$ ) se pueden descomponer en (figura 3.1):

- Una tensión en modo común ( $V_{CM}$ ) que es igual en la línea y en el neutro respecto a tierra.
- Una tensión en modo diferencial ( $V_{DM}$ ), la mitad de la cual cae sobre la línea y la otra mitad, de signo contrario, sobre el neutro.

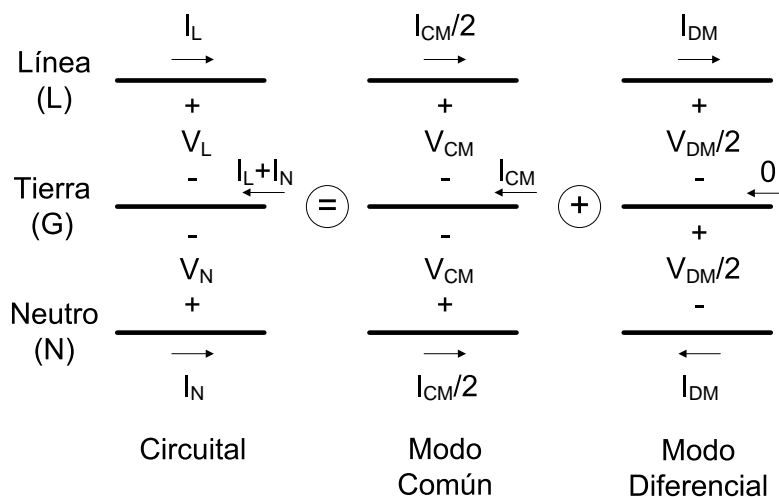


Figura 3.1: Relación entre tensiones y corrientes circuitales y modales.

La relación entre las tensiones y corrientes en modo común y diferencial ( $V_{CM}$ ,  $I_{CM}$ ,  $V_{DM}$ ,  $I_{DM}$ ) y las tensiones y corrientes en la línea y el neutro ( $V_L$ ,  $I_L$ ,  $V_N$ ,  $I_N$ ) es

la siguiente [21], [32], [34]:

$$\begin{aligned}
 V_L &= V_{CM} + \frac{V_{DM}}{2} \\
 I_L &= \frac{I_{CM}}{2} + I_{DM} \\
 V_N &= V_{CM} - \frac{V_{DM}}{2} \\
 I_N &= \frac{I_{CM}}{2} - I_{DM}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Dado que los parámetros  $S$  [65] caracterizan de manera completa el comportamiento de un circuito de RF, éstos pueden utilizarse para caracterizar un filtro de red [38]. Este capítulo propone un método para caracterizar circuital y modalmente los filtros de red, basado en la medida de parámetros  $S$ , capaz de predecir la transferencia de energía entre cualquier combinación de señales de entrada y salida del filtro, así como determinar el comportamiento de éste ante cualquier valor de impedancias de línea y de carga conectadas al mismo [66].

### 3.2. Caracterización circuital

Un filtro de red (PLF) se puede caracterizar como una red de cuatro puertos (figura 3.2), todos ellos referidos a la tierra física, definidos de la siguiente manera:

- Puertos línea-tierra (L-G), con tensiones y corrientes:  $V_{IL}$ ,  $I_{IL}$  en los terminales de línea (entrada) y  $V_{OL}$ ,  $I_{OL}$  en los terminales de carga (salida).
- Puertos neutro-tierra (N-G), con tensiones y corrientes:  $V_{IN}$ ,  $I_{IN}$  en los terminales de línea (entrada) y  $V_{ON}$ ,  $I_{ON}$  en los terminales de carga (salida).

La matriz de parámetros  $S$  del filtro de red ( $S$ ) relaciona las ondas salientes  $b$  ( $b_\alpha$ ,  $\alpha = IL, IN, OL, ON$ ) con las ondas entrantes  $a$  ( $a_\alpha$ ,  $\alpha = IL, IN, OL, ON$ ) de cada puerto [65]:

$$[b] = [S] \cdot [a] \tag{3.2}$$

$$[b] = \begin{bmatrix} b_{IL} \\ b_{IN} \\ b_{OL} \\ b_{ON} \end{bmatrix} \quad [a] = \begin{bmatrix} a_{IL} \\ a_{IN} \\ a_{OL} \\ a_{ON} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

La impedancia de referencia para todas estas ondas  $a$  y  $b$  es la misma, normalmente  $50 \Omega$ , que es la impedancia de referencia del sistema de medida empleado para hallar la matriz de parámetros  $S$ .

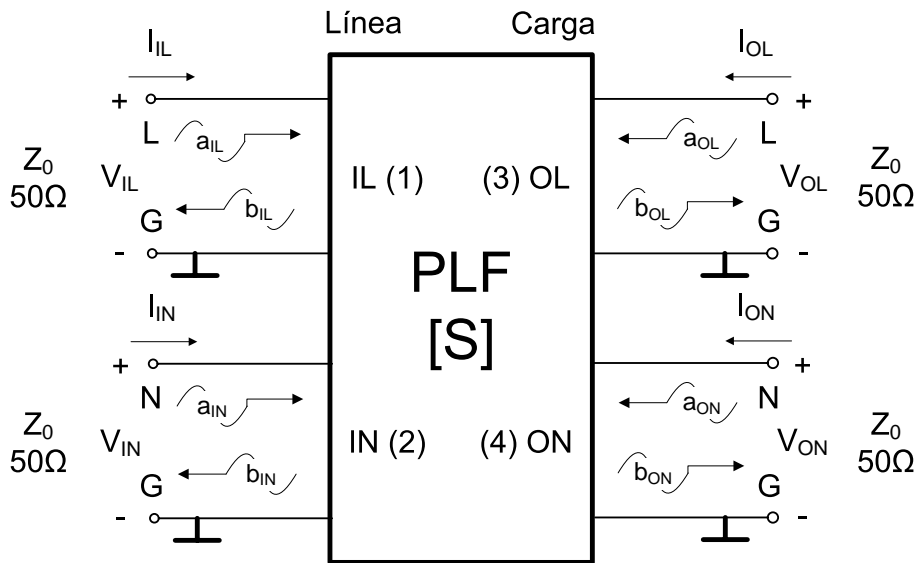


Figura 3.2: Definición de puertos circuitales en un filtro de red.

### 3.3. Caracterización modal

Los filtros de red (PLF) se entienden y analizan mejor considerando su comportamiento ante el modo común y el modo diferencial. Para lograr esto, se ha de obtener un modelo equivalente que relacione las entradas y salidas en modo común y diferencial [43] (figura 3.3). En este modelo los puertos están referidos a un punto de referencia conceptual cuya relación con el tierra físico es irrelevante para el propósito de este estudio. Se tiene:

- $V_{ICM}, I_{ICM}, V_{IDM}, I_{IDM}$  son las tensiones y corrientes para el modo común y modo diferencial en los terminales de línea del filtro (entrada).
- $V_{OCM}, I_{OCM}, V_{ODM}, I_{ODM}$  son las tensiones y corrientes para el modo común y modo diferencial en los terminales de carga del filtro (salida).

Este modelo equivalente se puede caracterizar mediante una nueva matriz de parámetros  $S$  ( $S_M$ ), la cual relaciona las ondas salientes  $b_M$  ( $b_{M\alpha}$ ,  $\alpha = \text{ICM}, \text{IDM}, \text{OCM}, \text{ODM}$ ) con las ondas entrantes  $a_M$  ( $a_{M\alpha}$ ,  $\alpha = \text{ICM}, \text{IDM}, \text{OCM}, \text{ODM}$ ):

$$[b_M] = [S_M] \cdot [a_M] \quad (3.4)$$

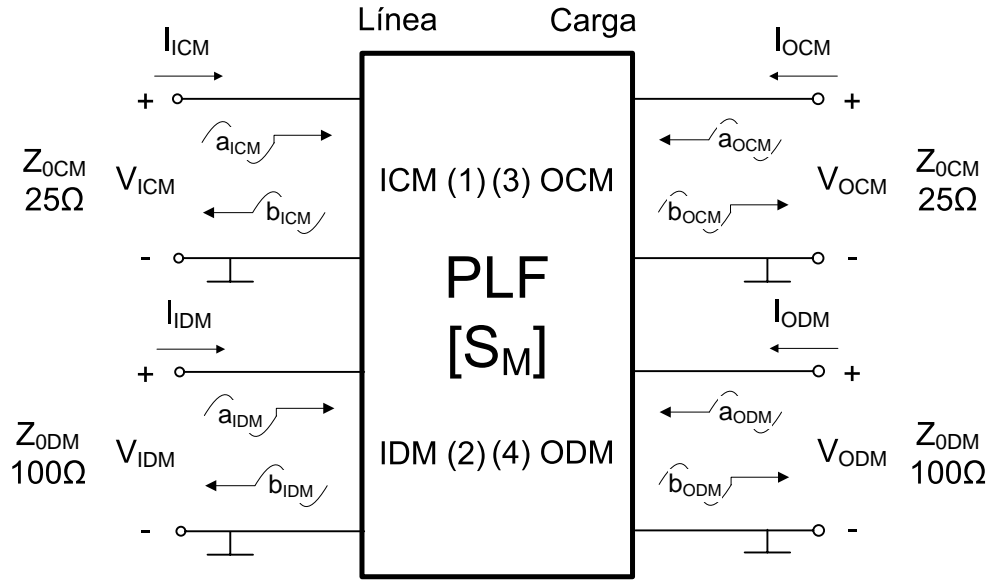


Figura 3.3: Definición de puertos modales en un filtro de red.

$$[b_M] = \begin{bmatrix} b_{ICM} \\ b_{IDM} \\ b_{OCM} \\ b_{ODM} \end{bmatrix} \quad [a_M] = \begin{bmatrix} a_{ICM} \\ a_{IDM} \\ a_{OCM} \\ a_{ODM} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

El objetivo ahora es obtener la matriz modal  $S_M$  a partir de la matriz medida  $S$ . La relación de las ondas  $a$  y  $b$  con las tensiones y corrientes de cada puerto es la siguiente [65]:

$$\begin{aligned} a_L &= \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_L + Z_0 I_L) \\ a_N &= \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_N + Z_0 I_N) \\ b_L &= \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_L - Z_0 I_L) \\ b_N &= \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_N - Z_0 I_N) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned}
a_{CM} &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{0CM}}}(V_{CM} + Z_{0CM}I_{CM}) \\
a_{DM} &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{0DM}}}(V_{DM} + Z_{0DM}I_{DM}) \\
b_{CM} &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{0CM}}}(V_{CM} - Z_{0CM}I_{CM}) \\
b_{DM} &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{0DM}}}(V_{DM} - Z_{0DM}I_{DM})
\end{aligned} \tag{3.7}$$

donde  $Z_0$  es la impedancia de referencia del sistema de medida de parámetros  $S$  ( $50 \Omega$ ), y  $Z_{0CM}$ ,  $Z_{0DM}$  son las impedancias de referencia de los modos común y diferencial respectivamente.

Si se sustituye la ecuación 3.1 en la 3.6 y se compara con la 3.7, se halla la relación entre las ondas medidas ( $a_L$ ,  $a_N$ ,  $b_L$ ,  $b_N$ ) y las ondas modales ( $a_{CM}$ ,  $a_{DM}$ ,  $b_{CM}$ ,  $b_{DM}$ ):

$$\begin{aligned}
a_{CM} &= \frac{a_L + a_N}{\sqrt{2}} \\
b_{CM} &= \frac{b_L + b_N}{\sqrt{2}} \\
a_{DM} &= \frac{a_L - a_N}{\sqrt{2}} \\
b_{DM} &= \frac{b_L - b_N}{\sqrt{2}}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

si previamente se ha fijado el valor de las impedancias de referencia modales:

$$\begin{aligned}
Z_{0CM} &= \frac{Z_0}{2} \\
Z_{0DM} &= 2Z_0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

De la ecuación 3.8 se pueden deducir dos relaciones matriciales entre ondas medidas y ondas modales:

$$[a_M] = [A] \cdot [a] \tag{3.10}$$

$$[b_M] = [B] \cdot [b] \tag{3.11}$$



$$[A] = [B] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Substituyendo las ecuaciones 3.10 y 3.11 en 3.2, y comparando con 3.4, se obtiene la relación entre los parámetros  $S$  modales y los parámetros  $S$  medidos:

$$[S_M] = [B] \cdot [S] \cdot [A]^{-1} \quad (3.13)$$

Utilizando la ecuación 3.13 se obtiene la matriz modal de parámetros  $S$  (con impedancias de referencia  $Z_{0CM}$  y  $Z_{0DM}$  (3.9)), que describe completamente el comportamiento modal de un filtro de red a partir de una matriz de parámetros  $S$  que puede medirse de manera sencilla mediante un analizador de redes.

### 3.3.1. Transformación impedancias de referencia modales

Si se necesita una matriz modal de parámetros  $S$  con impedancia de referencia  $Z'_0$  ( $S'_M$ ), es posible obtenerla realizando una serie de transformaciones. En primer lugar se halla la matriz modal de parámetros  $Z$  ( $\bar{Z}_M$ ), la cual está normalizada según las impedancias de referencia para el modo común ( $Z_{0CM}$ ) y el modo diferencial ( $Z_{0DM}$ ) [65], [67]:

$$[\bar{Z}_M] = ([I] + [S_M]) \cdot ([I] - [S_M])^{-1} \quad (3.14)$$

Se desnormaliza la matriz modal de parámetros  $Z$ :

$$[Z_M] = [\sqrt{Z_{0M}}] \cdot [\bar{Z}_M] \cdot [\sqrt{Z_{0M}}] \quad (3.15)$$

donde:

$$[\sqrt{Z_{0M}}] = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{0CM}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{0DM}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{Z_{0CM}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{Z_{0DM}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Posteriormente, se normaliza la matriz modal de parámetros  $Z$  según la impedancia de referencia  $Z'_0$ :

$$[\bar{Z}'_M] = \left[ \sqrt{Y'_0} \right] \cdot [Z_M] \cdot \left[ \sqrt{Y'_0} \right] \quad (3.17)$$

donde:

$$\left[ \sqrt{Y'_0} \right] = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{Z'_{01}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{Z'_{02}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{Z'_{03}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{Z'_{04}} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Por último, se halla la matriz modal de parámetros  $S$  con impedancia de referencia  $Z'_0$  ( $S'_M$ ):

$$[S'_M] = ([\bar{Z}'_M] - [I]) \cdot ([\bar{Z}'_M] + [I])^{-1} \quad (3.19)$$

Aplicando estas operaciones a la matriz  $S_M$ , se puede obtener una matriz modal de parámetros  $S$  con las impedancias de referencia deseadas en cada uno de sus cuatro puertos ( $Z'_0 = [Z'_{01} \ Z'_{02} \ Z'_{03} \ Z'_{04}]$ ).

### 3.4. Sistema de medida

El sistema para medir los parámetros  $S$  de un filtro de red es muy simple, ya que sólo requiere de un analizador de redes como instrumento de medida (figura 3.4). Para poder conectar el analizador al filtro es necesario soldar a los terminales de este último cuatro conectores tipo N (figura 3.5) que faciliten la conexión del cableado.

Si el analizador de redes dispone de cuatro puertos de medida, donde cada uno de estos cuatro puertos corresponde a uno de los terminales del filtro de red referenciado a tierra, la matriz de parámetros  $S$  se obtiene en un solo barrido. En caso que el analizador de redes disponga sólo de dos puertos de medida (figura 3.4), se han de ir realizando diferentes barridos de dos en dos puertos (cargando los puertos restantes del filtro con  $50 \ \Omega$ ) hasta completar los 16 coeficientes que componen la matriz.

Para evitar que interferencias ajenas al sistema afecten la medida, ésta se ha realizado emplazando los elementos dentro de una jaula de *Faraday* (recinto apantallado que evita que señales interferentes procedentes del exterior se acoplen a los elementos, cables y conectores que conforman el sistema de medida).

### 3.5. Aplicaciones del modelado multimodal

La matriz modal de parámetros  $S$ , obtenida mediante la ecuación 3.13, es un modelo completo de pequeña señal para filtros de red, por tanto, cualquier información acerca del filtro puede ser deducida a partir de ésta. La matriz  $S_M$ :

- Proporciona información acerca de las pérdidas de inserción; información equivalente a la que suministra el estándar de medida ANSI C63.13 [13].

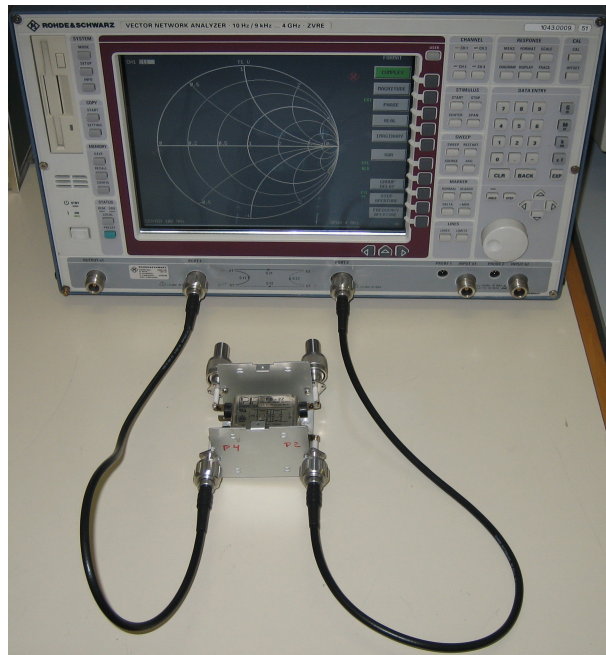


Figura 3.4: Medida de parámetros  $S$  con analizador de redes.

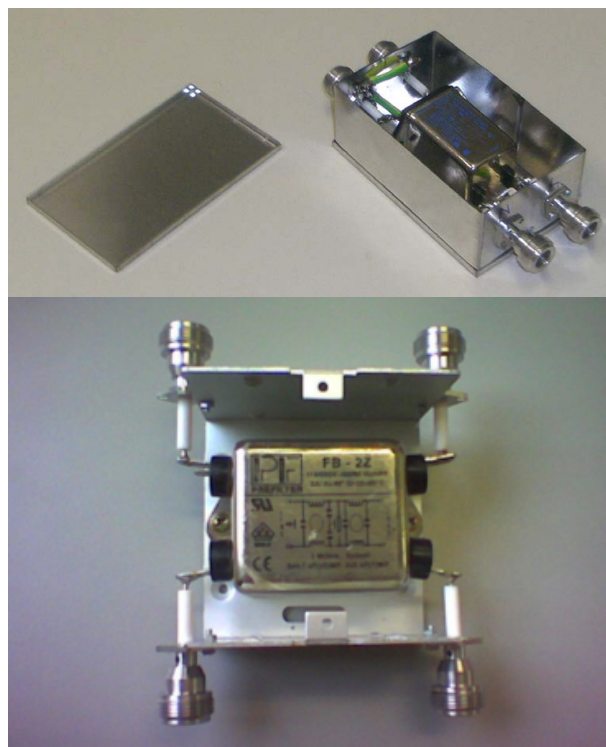


Figura 3.5: Filtros de red con adaptadores N.

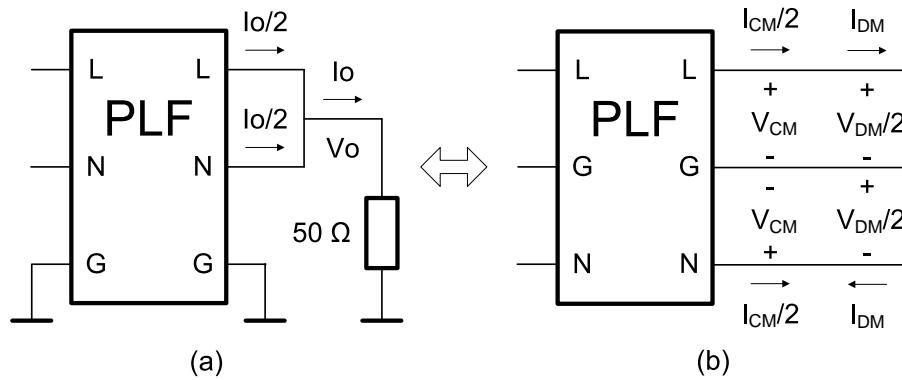
- Permite calcular las pérdidas de inserción para diferentes impedancias de línea y/o carga.
- Determina cualquier tipo de transferencia de energía entre modos común y diferencial.

### 3.5.1. Pérdidas de inserción en modo común y en modo diferencial

La primera aplicación del método es la determinación de las pérdidas de inserción en modo común y en modo diferencial de un filtro de red. De forma más concreta, lo que se pretende es verificar si la matriz modal de parámetros  $S$  es capaz de suministrar las pérdidas de inserción del filtro de una manera similar a la que ofrece el estándar de medida ANSI C63.13 [13], esto es utilizando configuraciones con impedancias de línea y carga de  $50 \Omega$ .

Si se analizan los métodos de medida propuestos por la norma ANSI C63.13 (figuras 2.3 y 2.4), se observarán ligeras diferencias en las definiciones de tensiones y corrientes en modo común y en modo diferencial respecto las aquí planteadas:

- Modo común (figura 3.6) [12]:



**Figura 3.6:** Definición de tensiones y corrientes en modo común: (a) ANSI C63.13; (b) método propuesto.

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_{CM} \\
 \frac{I_o}{2} &= \frac{I_{CM}}{2} \\
 \frac{V_{CM}}{I_{CM}} &= \frac{V_o}{I_o} = 50\Omega
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

- Modo diferencial (figura 3.7) [12]:

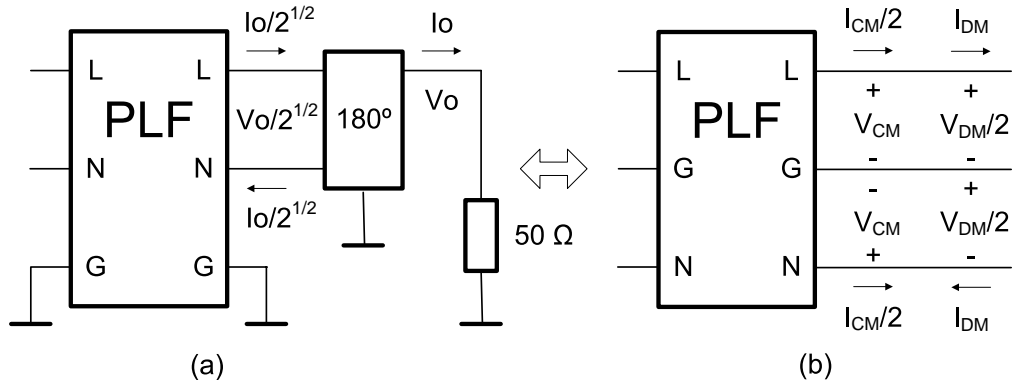


Figura 3.7: Definición de tensiones y corrientes en modo diferencial: (a) ANSI C63.13; (b) método propuesto.

$$\begin{aligned}
 \frac{V_o}{\sqrt{2}} &= \frac{V_{DM}}{2} \\
 \frac{I_o}{\sqrt{2}} &= I_{DM} \\
 \frac{V_{DM}}{I_{DM}} &= 2 \frac{V_o}{I_o} = 100\Omega
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Por tanto, para poder comparar ambos sistemas de medida es necesario llevar a cabo la conversión de impedancias características de la matriz modal de parámetros  $S$ , lo cual es relativamente sencillo mediante la utilización de un simulador de circuitos de microondas o empleando el método matemático expuesto en el apartado 3.3.1.

$$\begin{aligned}
 Z'_{OCM} &= \frac{V_{CM}}{I_{CM}} = 50\Omega \\
 Z'_{ODM} &= \frac{V_{DM}}{I_{DM}} = 100\Omega
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Una vez la nueva matriz modal de parámetros  $S$  ha sido calculada ( $S'_M$ ), las pérdidas de inserción de modo común y de modo diferencial se pueden extraer directamente de los parámetros  $S'_{M13}$  y  $S'_{M24}$  respectivamente.

Las figuras 3.8 a 3.11 comparan el módulo de las pérdidas de inserción de dos filtros de red (Schaffner FN610-3/06 y Prefilter FB-2Z) en modo común y en modo diferencial, obtenidas a partir del método de caracterización presentado en este capítulo ( $S'_{M13}$ ,  $S'_{M24}$ ) y las obtenidas a partir de las medidas realizadas según el estándar ANSI C63.13 (sólo proporciona módulo). En ambos casos los resultados son similares.

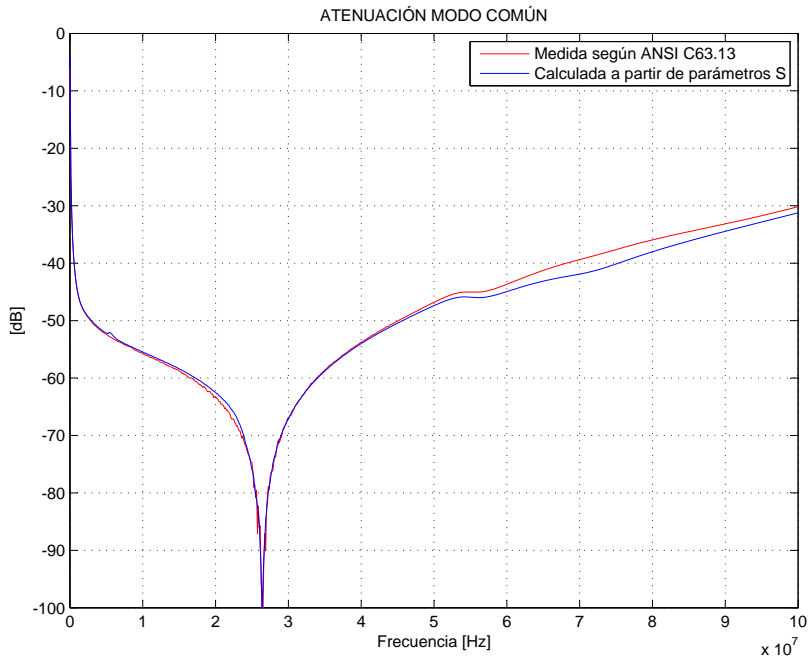


Figura 3.8: Atenuación en modo común medida (ANSI C63.13) y calculada usando el método propuesto (Schaffner).

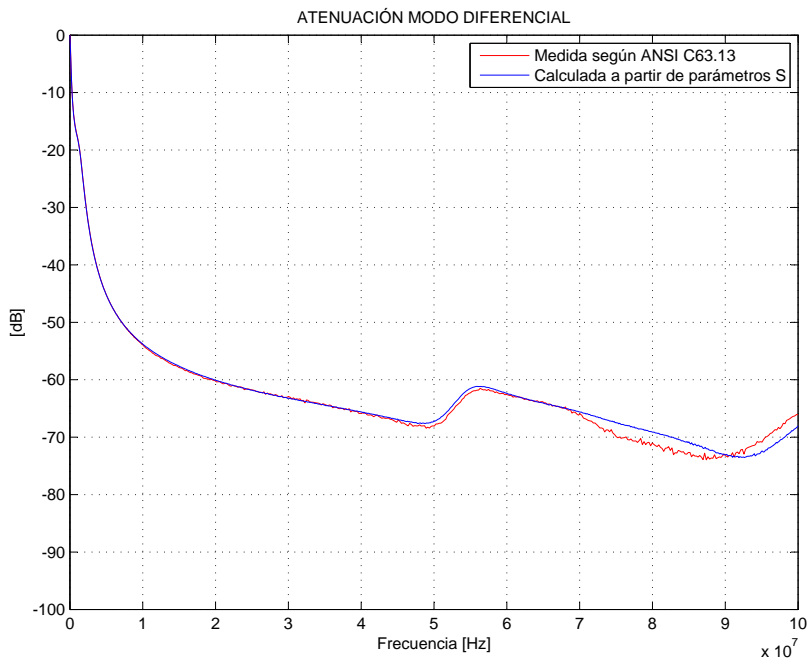


Figura 3.9: Atenuación en modo diferencial medida (ANSI C63.13) y calculada usando el método propuesto (Schaffner).

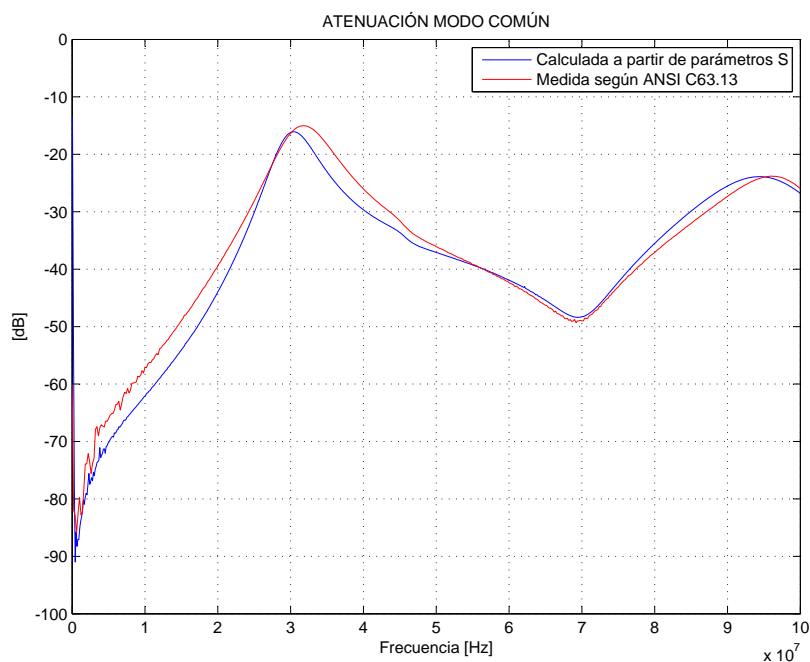


Figura 3.10: Atenuación en modo común medida (ANSI C63.13) y calculada usando el método propuesto (Prefilter).

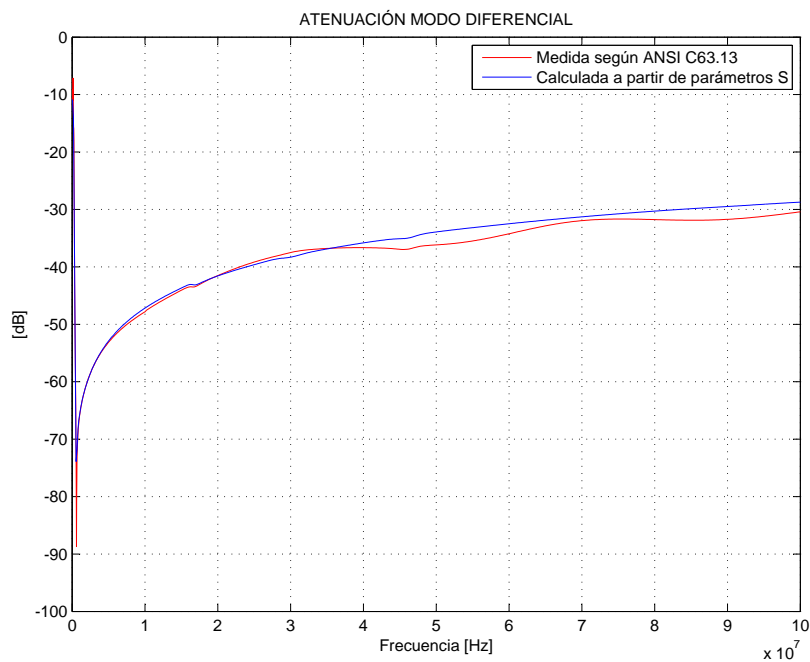
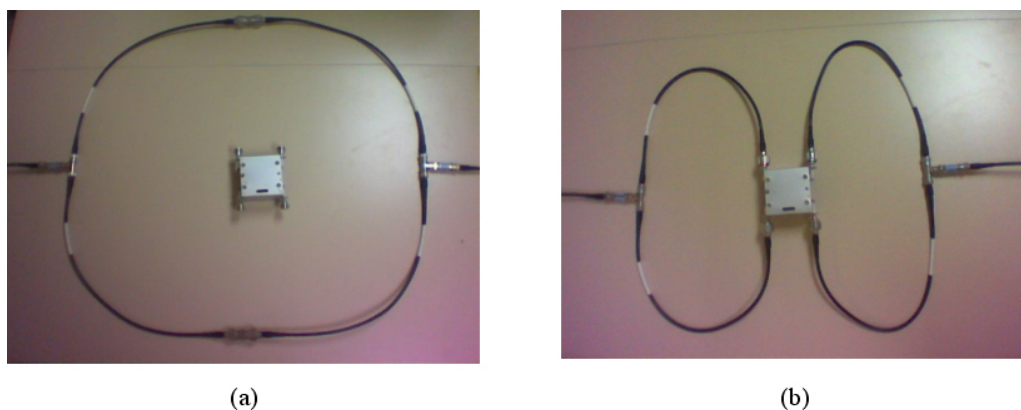
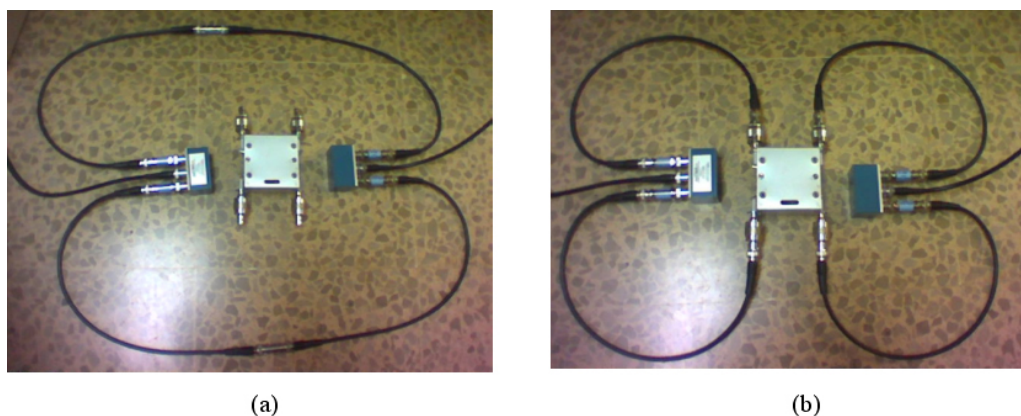


Figura 3.11: Atenuación en modo diferencial medida (ANSI C63.13) y calculada usando el método propuesto (Prefilter).

Las figuras 3.12 y 3.13 muestran la configuración implementada (siguiendo los esquemas eléctricos de las figuras 2.3 y 2.4 respectivamente) para medir las pérdidas de inserción en modo común y en modo diferencial según el estándar ANSI C63.13. Pevio a la medida existe una fase de calibración para compensar el efecto de elementos como divisores de potencia, cables, etc. Una vez calibrado el entorno se procede a medir las pérdidas de inserción mediante un analizador de redes o un generador de *tracking*.



**Figura 3.12:** Medida de la atenuación en modo común según el estándar ANSI C63.13: (a) calibración; (b) medida del parámetro  $S_{21}$ .



**Figura 3.13:** Medida de la atenuación en modo diferencial según el estándar ANSI C63.13: (a) calibración. (b) medida del parámetro  $S_{21}$ .

La configuración de medida del estándar ANSI C63.13 requiere el uso de atenuadores de 6 dB, un cortocircuito en ambos puertos de los terminales de línea y carga del filtro en caso de medir pérdidas de inserción en modo común (figura 2.3), y dos *splitter* en caso de medir modo diferencial (figura 2.4), mientras que el método presentado en este trabajo conecta directamente los puertos del filtro a los puertos de un analizador de redes. Por tanto, el método de medida aquí propuesto es más simple y más exacto



(tiene menos incertidumbre de medida) que el método estándar especificado en [13].

### 3.5.2. Pérdidas de inserción para impedancias de línea y carga arbitrarias

Las pérdidas de inserción de los filtros de red son fuertemente dependientes de sus impedancias de línea y carga [8], [15], [16]. Utilizando el método de caracterización presentado en este capítulo se puede calcular el comportamiento del filtro para cualquier impedancia de línea y carga sin necesidad de realizar ninguna medida adicional. Para ello se evalúan, utilizando un simulador de circuitos de microondas, las pérdidas de inserción de la matriz  $S_M$  cargada con las impedancias modales<sup>1</sup> común y diferencial de línea y carga deseadas.

La figura 3.14 muestra las pérdidas de inserción en modo común de un filtro de red (Belling Lee SF4110-1/01) para cuatro impedancias de carga de modo común diferentes. La figura 3.15 muestra las pérdidas de inserción en modo diferencial para cuatro impedancias de carga de modo diferencial diferentes. En ambos casos la impedancia de línea es la impedancia equivalente de una LISN de  $50 \Omega \parallel 50 \mu\text{H}$  [19]. Las gráficas vuelven a poner de manifiesto que las atenuaciones que introduce el filtro pueden variar de manera significativa en función de las impedancias de línea y carga.

### 3.5.3. Conversión de energía entre modos común y diferencial

Una prestación adicional de este método de caracterización es su capacidad para determinar la transferencia de energía entre modos común y diferencial [39]. El método puede predecir la conversión de modos entre los terminales de línea y carga, como también la posible conversión de modos producida por la potencia reflejada en ambos extremos del filtro.

La figura 3.16 ilustra la transferencia de energía entre el modo diferencial de carga y los modos diferencial y común de línea ( $S_{M24}$  y  $S_{M14}$ ) del filtro de red medido (Belling Lee). Se puede observar como en frecuencias comprendidas entre 3.4 MHz y 15.4 MHz, y por encima de 20.5 MHz, la mayor parte de la potencia que incide en modo diferencial por el extremo de la carga se transfiere a modo común en el extremo de línea del filtro. Este hecho demuestra que una simple medida de las pérdidas de inserción en modo común y diferencial del filtro, tal y como propone [13], no es suficiente para caracterizar un filtro de red. En este caso sale más energía por el modo opuesto.

La figura 3.17 muestra la transferencia de energía entre el modo común de carga y los modos común y diferencial de línea ( $S_{M13}$  y  $S_{M23}$ ). En este caso la mayoría de la

---

<sup>1</sup>El capítulo 5 de esta memoria presenta un nuevo método de medida multimodal para determinar la impedancia que presenta un equipo electrónico cuando se encuentra en funcionamiento. El método ofrece dicha impedancia tanto desde un punto de vista circuital (impedancia que presentan los puertos línea-tierra y neutro-tierra), como desde un punto de vista modal (impedancia que presentan los puertos modales común y diferencial).

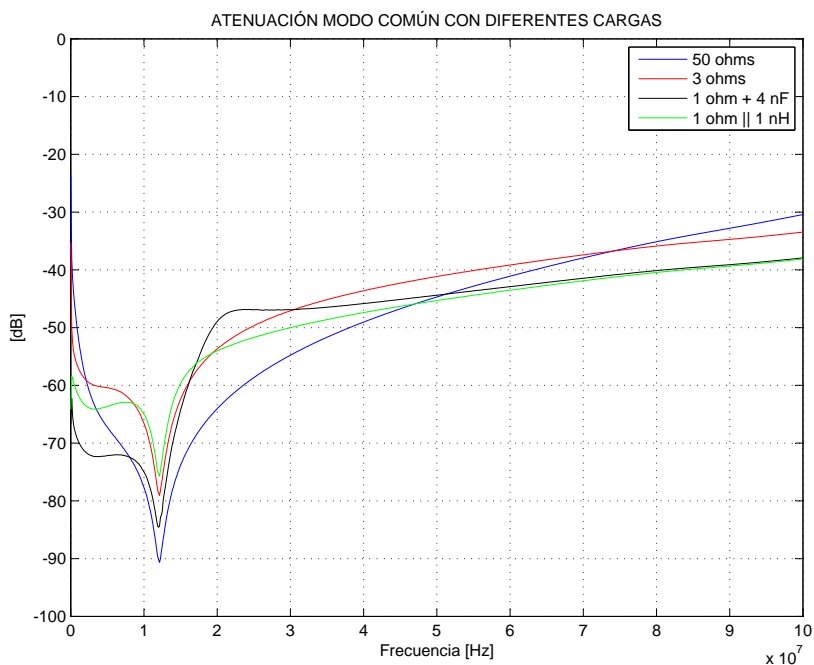


Figura 3.14: Atenuación en modo común para diferentes impedancias de carga (Belling Lee).

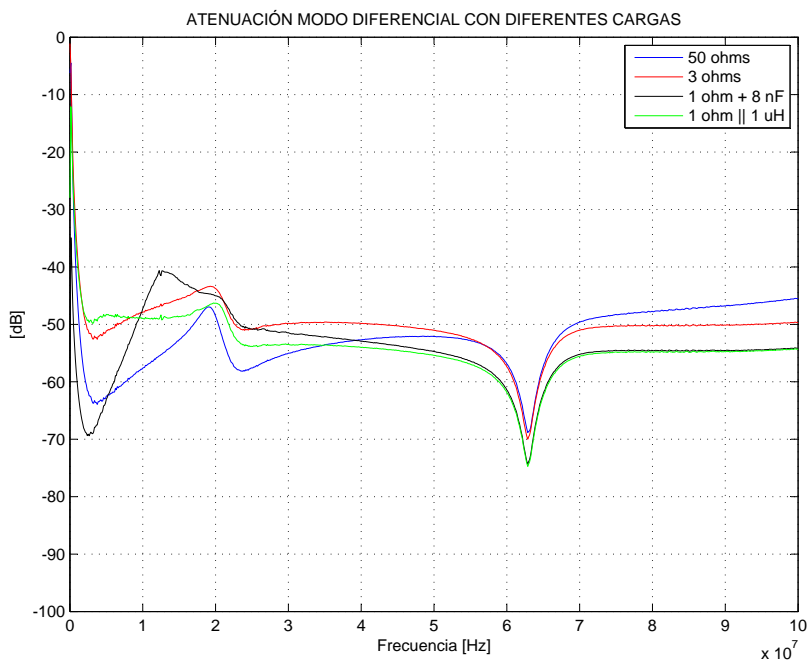


Figura 3.15: Atenuación en modo diferencial para diferentes impedancias de carga (Belling Lee).

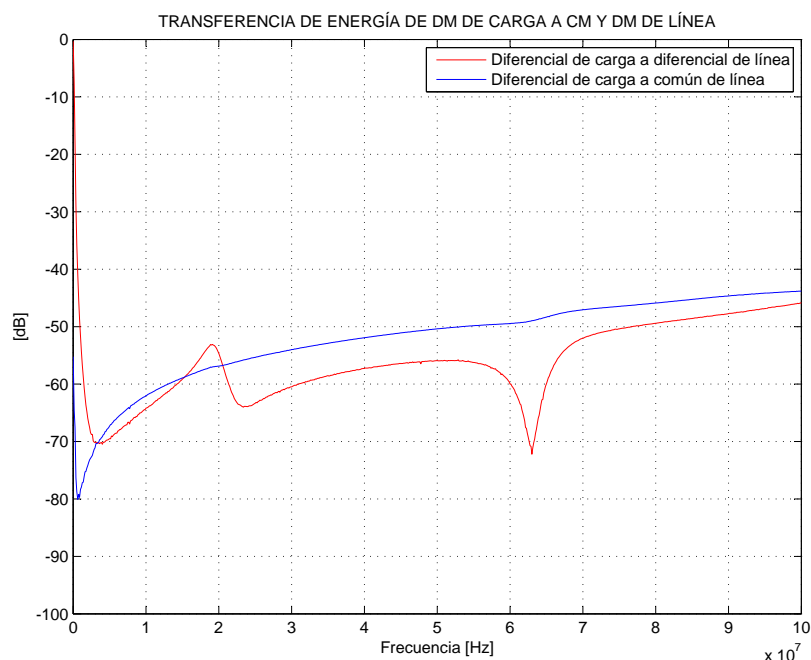


Figura 3.16: Transferencia de energía entre modo diferencial de carga y modo común de línea (Belling Lee).

potencia de salida se produce en el mismo modo que la potencia de entrada.

Las figuras 3.18 y 3.19 son equivalentes a las dos anteriores, pero de otro filtro de red (Schaffner). En ambas gráficas, la potencia de salida se produce en el mismo modo que la potencia de entrada, excepto en la figura 3.19, donde entre 24 y 30 MHz la energía que incide en modo común por el extremo de carga se convierte a modo diferencial en el extremo de línea.

Como ya se comentó en el capítulo 2, los filtros de red se acostumbran a diseñar para que reflejen toda la energía en modo común y diferencial que incide por los puertos de línea y carga. Idealmente, toda la energía es reflejada en el mismo modo, pero desequilibrios en el filtro pueden causar una transferencia de energía al otro modo. Por ejemplo, supongamos que un equipo electrónico genera una interferencia en modo diferencial. Cuando esta interferencia llega al filtro de red se refleja parte en modo diferencial ( $S_{M44}$ ) y parte en modo común ( $S_{M34}$ ). Esta interferencia no deseada en modo común reflejada hacia el equipo puede causar su radiación en modo común. La figura 3.20 muestra la reflexión de una interferencia en modo común generada en la carga; reflexión que se produce principalmente en modo común, pero donde una pequeña parte de dicha interferencia se refleja en modo diferencial. La figura 3.21 muestra la reflexión de una interferencia en modo diferencial en la carga.

La conclusión final después de analizar este capítulo es que el método de caracterización de filtros de red propuesto es capaz de predecir la conversión de modos

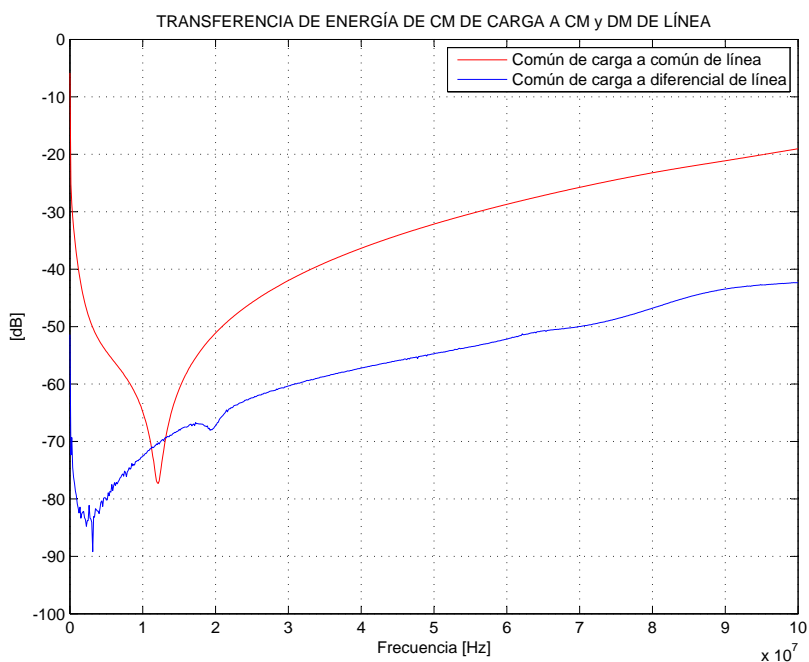


Figura 3.17: Transferencia de energía entre modo común de carga y modo diferencial de línea (Belling Lee).

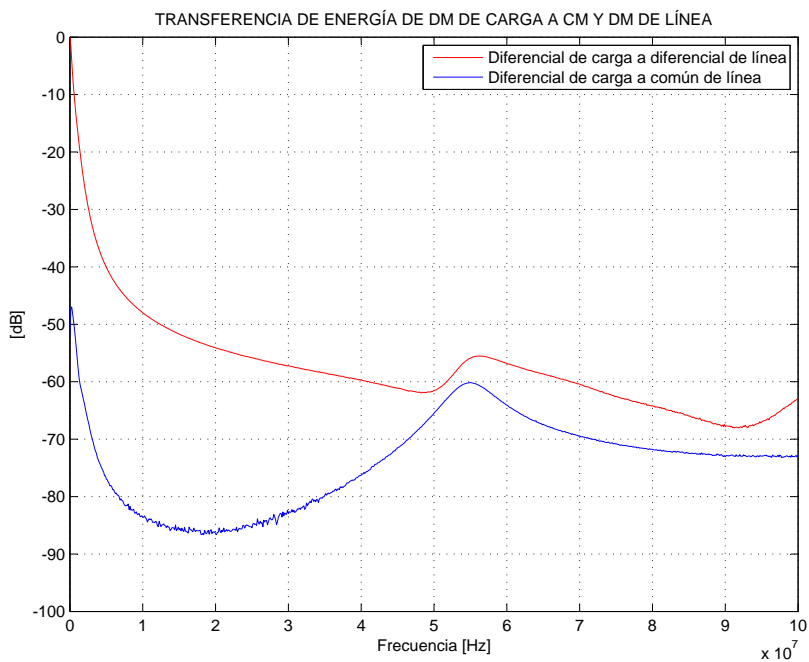


Figura 3.18: Transferencia de energía entre modo diferencial de carga y modo común de línea (Schaffner).

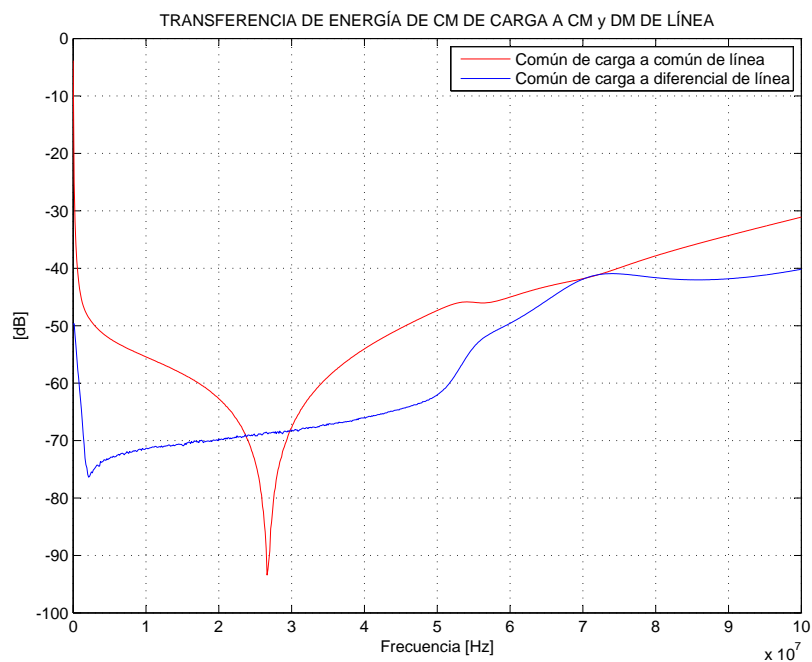


Figura 3.19: Transferencia de energía entre modo común de carga y modo diferencial de línea (Schaffner).

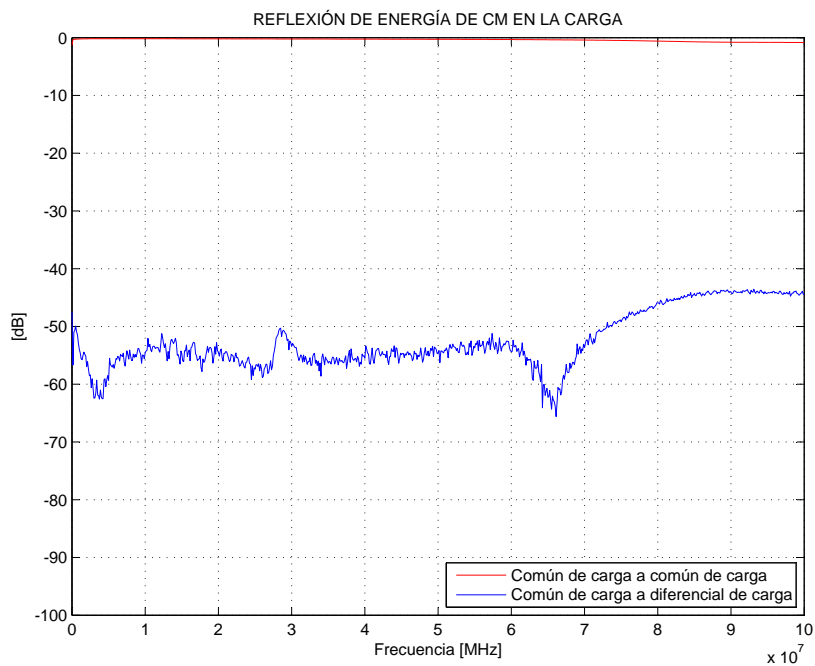


Figura 3.20: Reflexión de energía de modo común de carga a modo diferencial de carga (Belling Lee).

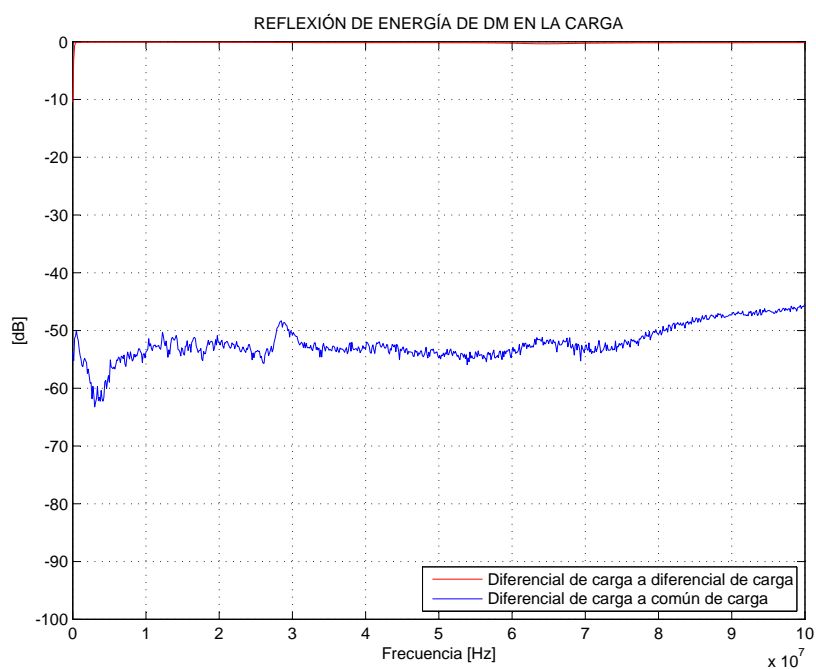


Figura 3.21: Reflexión de energía de modo diferencial de carga a modo común de carga (Belling Lee).

que se produce entre cualquier combinación de señales de entrada y salida del filtro, así como determinar el comportamiento de éste ante cualquier valor de impedancias de línea y de carga. Por tanto, este nuevo método aporta una solución completa a las deficiencias que actualmente presentan otros métodos de caracterización, en los que la atenuación al modo común y al modo diferencial se establecen por separado [13], y todo ello empenado un sistema de medida más simple y con menos incertidumbre.