

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS DOCTORAL

Estudio y caracterización de cargas no lineales

Doctorando: Juan José MESAS GARCÍA
Director: Luis SAINZ SAPERA
Codirector: Albert FERRER BIOSCA

Barcelona, Noviembre de 2009

ACTA DE CALIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Reunido el tribunal integrado por los abajo firmantes para juzgar la tesis doctoral:

Título de la tesis: Estudio y caracterización de cargas no lineales.

Autor de la tesis: Juan José Mesas García.

Acuerda otorgar la calificación de:

- No apto
- Aprobado
- Notable
- Sobresaliente
- Sobresaliente Cum Laude

Barcelona, de de

El Presidente

El Secretario

.....
(nombre y apellidos)

.....
(nombre y apellidos)

El vocal

El vocal

El vocal

.....
(nombre y apellidos)

.....
(nombre y apellidos)

.....
(nombre y apellidos)

A la Ingeniería Eléctrica y a las Matemáticas,
por existir.

A las personas que hayan sido víctima de mis errores,
como compensación.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Luis Sainz Sopera y al Dr. Albert Ferrer Biosca, director y codirector respectivamente de esta tesis doctoral, no sólo por su extraordinaria dedicación a la misma, sino también por sus notables e interesantes aportaciones desde sus correspondientes áreas de conocimiento.

Expreso también mi gratitud al Ministerio de Educación y Ciencia por haberme seleccionado como becario FPI, pudiendo así desarrollar tareas de investigación y tesis doctoral en relación al proyecto DPI2006-02157 de título “Estudio y caracterización de dispositivos no lineales y su interacción en instalaciones eléctricas industriales”.

Tanto a mis actuales compañeros en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPC, como a mis antiguos compañeros en los Departamentos de Matemática Aplicada I y II de la UPC, quisiera dar las gracias por su inestimable y desinteresada ayuda siempre que la he necesitado.

Finalmente, agradecer a mi familia y a mis amigos su incondicional apoyo, así como a los profesores e investigadores de todos los tiempos su impagable trabajo, pues sabido es que “La ignorancia esclaviza, el conocimiento nos hace libres, la libertad nos hace felices, la felicidad (y sólo eso) nos hace tener éxito en la vida”.

Índice General

1	Introducción	1
1.1	El problema de la contaminación armónica	1
1.2	Antecedentes	2
1.3	Descripción y objetivos de la tesis	5
1.4	Estructura de la tesis	6
2	Modelización y estudio de las cargas no lineales	9
2.1	Determinación de los invariantes de las cargas no lineales	11
2.1.1	Rectificador monofásico con filtro capacitivo	11
2.1.2	Rectificador trifásico con filtro capacitivo	13
2.1.3	Rectificador trifásico de 6 pulsos	15
2.1.4	Lámpara de descarga	17
2.2	Caracterización del comportamiento de las cargas no lineales	19

2.2.1	Caracterización del comportamiento determinístico	21
2.2.2	Estudio del fenómeno de la cancelación armónica	25
2.2.3	Estudio del fenómeno de la interacción armónica	29
3	Caracterización experimental de las cargas no lineales	37
3.1	Rectificador monofásico con filtro capacitivo	39
3.1.1	Caracterización experimental	39
3.1.2	Aplicabilidad de la base de datos obtenida	41
3.2	Rectificador trifásico con filtro capacitivo	44
3.2.1	Caracterización experimental	44
3.2.2	Aplicabilidad de la base de datos obtenida	47
3.3	Rectificador trifásico de 6 pulsos	47
3.4	Lámpara de descarga	49
4	Estudio de la intensidad del neutro en sistemas trifásicos con presencia de cargas no lineales monofásicas	53
4.1	Determinación de la intensidad del neutro de una instalación trifásica en condiciones de desequilibrio	54
4.1.1	Influencia del desequilibrio de las tensiones de alimentación	57
4.1.2	Influencia del distinto número de cargas no lineales por fase	58
4.1.3	Influencia del distinto tipo de cargas no lineales por fase	59
4.2	Validación experimental de los estudios realizados	59
4.2.1	Influencia del desequilibrio de las tensiones de alimentación	60
4.2.2	Influencia del distinto número de cargas no lineales por fase	60
4.2.3	Influencia del distinto tipo de cargas no lineales por fase	61
5	Aportaciones, conclusiones y futuras líneas de investigación	63
5.1	Aportaciones	63
5.2	Conclusiones	65
5.3	Futuras líneas de investigación	68
6	Bibliografía	73

6.1 Referencias consultadas por el doctorando	73
6.1.1 Libros	73
6.1.2 Artículos de revista y de congreso	73
6.1.3 Otras publicaciones	77
6.2 Producción científica del doctorando	78
6.2.1 Artículos de revista	78
6.2.2 Artículos de congreso	79

Anexo: Publicaciones que conforman la tesis	81
--	-----------

Índice de Figuras

2.1	Estudio del rectificador monofásico con filtro capacitivo	12
2.2	Estudio del rectificador trifásico con filtro capacitivo	14
2.3	Estudio del rectificador trifásico de 6 pulsos	15
2.4	Estudio de la lámpara de descarga	17
2.5	5° y 7° armónicos de la intensidad normalizada consumida por las cargas no lineales	27
2.6	Factor de potencia de la lámpara de descarga en función del invariante $v_{A,N}$	32
2.7	Fdp de la distribución exponencial de $V_{k,N}$ ($k = 3, 5, 7$ y 9), es decir, $V_{k,N} \sim Exponencial(60)$	34
2.8	Fdps del 1 ^{er} y 5° armónicos de intensidad (modelo A, $v_{A,N} = 50\%$, $R_N = 0$ y 10%) (columna izquierda) e influencia de la distorsión armónica de la tensión sobre las intensidades fundamental y armónicas consumidas por la lámpara de descarga (columna derecha)	35
3.1	Equipos de medida	38
3.2	Ensayos sobre el ordenador personal (columna izquierda)	

y la televisión (columna derecha)	43
3.3 Ensayo 1 (fila superior), ensayo 2 (fila central) y ensayo 3 (fila inferior) sobre el rectificador trifásico de 6 pulsos	48
3.4 Ensayo 1 (columna izquierda) y ensayo 2 (columna derecha) sobre las correspondientes lámparas de descarga	50
3.5 Ensayo 2 sobre la correspondiente lámpara de descarga	51
4.1 Esquema de la instalación trifásica a estudio	55

1. Introducción

1.1 El problema de la contaminación armónica

Desde principios de los setenta, la contaminación armónica de los sistemas eléctricos de potencia se ha convertido en un problema de creciente actualidad debido al considerable incremento de las cargas no lineales: *cargas que, excitadas con tensión sinusoidal, consumen intensidades no sinusoidales aunque, por lo general, periódicas* [1-4]. A causa del continuo incremento de este tipo de cargas, en particular de los dispositivos semiconductores y la electrónica de potencia, la distorsión armónica de las tensiones e intensidades ha ido aumentando pudiéndose producir un conjunto de efectos indeseables que afectarían al buen funcionamiento y calidad de servicio del sistema eléctrico. Entre otros, estos efectos son [4, 9]:

- Una disminución de la eficiencia global del sistema eléctrico.
- La saturación de las instalaciones, causando su envejecimiento prematuro y dando lugar a un sobredimensionamiento de las mismas.
- Un mal funcionamiento, e incluso destrucción, tanto de los elementos constituyentes del sistema eléctrico perturbado como de las cargas conectadas a dicho sistema lo

que se traduce en un coste adicional en el balance económico de los procesos productivos.

- Sobrecarga de los bancos de compensación de potencia reactiva.
- Aparición de vibraciones y ruidos acústicos en motores, transformadores, bobinas, etc.

Debido a todo lo anteriormente mencionado, la problemática que implica la existencia de armónicos en la red ha derivado fundamentalmente en cuatro áreas de investigación [1-4]:

- El estudio de las causas que originan el problema de la contaminación armónica. Comprende el estudio y modelización de las diferentes cargas no lineales conectadas en la red con el objetivo de caracterizar los armónicos de intensidad generados por dichas cargas.
- La monitorización y medida de la calidad del servicio eléctrico en la red. Su objetivo final es definir índices y normativas que cuantifiquen y permitan limitar la distorsión de tensiones e intensidades a niveles tolerables para el sistema y los receptores.
- La predicción de la contaminación armónica del sistema. Abarca el estudio del flujo armónico de cargas con el objetivo de obtener la tensión fundamental y armónica de todos los nudos de la red así como los parámetros que caracterizan el comportamiento de las cargas no lineales para un estado de carga dado.
- El estudio de soluciones paliativas al problema de la contaminación armónica. Se centra en la obtención de recomendaciones referentes al diseño o adecuación de la red, mejoras en el diseño de las cargas perturbadoras y diseño de equipos de filtrado y eliminación armónica.

1.2 Antecedentes

Los estudios e investigaciones iniciados en los años setenta en el campo de los armónicos en los sistemas eléctricos de potencia, y que han sido presentados brevemente en el punto anterior, han avanzado considerablemente en el ámbito internacional desde

principios de los ochenta. Actualmente, los investigadores tienden cada vez más a presentar trabajos de refinamiento sobre las técnicas y los estudios desarrollados para el análisis del problema armónico.

En particular, se ha dedicado especial atención al análisis y modelización de las cargas no lineales, ya que son los elementos contaminantes del sistema. Dichas cargas se pueden clasificar en tres categorías [1, 3, 39]:

- Basadas en arcos de descarga: Lámparas de descarga, soldadores y hornos de arco.
- Basadas en inductancias saturables: Reactancias para limitar arcos de descarga, transformadores y motores trabajando en saturación.
- Electrónicas: Rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, rectificadores trifásicos de 6 y 12 pulsos, cargadores de baterías, etc.

De todas las cargas no lineales anteriores, las más habituales y, por tanto, las más estudiadas en la literatura científica son los rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, los rectificadores trifásicos de 6 pulsos y las lámparas de descarga, [39].

La mayor parte de los trabajos sobre dichas cargas persiguen fundamentalmente el análisis de su comportamiento con el objeto de predecir mediante modelos analíticos teóricos, técnicas de simulación o herramientas gráficas las intensidades armónicas que inyectan en la red los rectificadores monofásicos con filtro capacitivo [5-10, 40], los rectificadores trifásicos con filtro capacitivo [8-17, 40], los rectificadores trifásicos de 6 pulsos [15-18, 41, 42] y las lámparas de descarga [10, 19-22]. La caracterización completa de dichas intensidades supone tanto la determinación de su módulo como la de su ángulo de fase. Algunos de estos estudios analizan las cargas no lineales a partir de parámetros que persiguen caracterizar su comportamiento de forma unívoca, aunque en la mayoría de los casos dichos parámetros no son justificados teóricamente y no caracterizan completamente su comportamiento [8, 15, 16, 18]. La referencia [8] obtiene estos parámetros a partir de la normalización de los rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, aunque se trabaja con la hipótesis de tensión de continua sin rizado

(condensador de continua infinito). Las otras tres referencias presentan modelos normalizados de los rectificadores trifásicos controlados (de 6 pulsos) y no controlados (con filtro capacitivo) con el objetivo de caracterizar dichas cargas a partir de los parámetros obtenidos en la normalización. Desgraciadamente, los estudios y modelos desarrollados en la literatura y comentados anteriormente no han sido validados experimentalmente, o bien su validación ha sido realizada a partir de un número reducido de medidas. Entre estos estudios experimentales se pueden destacar [8], [9] y [22-29].

Tal como se ha mencionado, los trabajos sobre las cargas no lineales tienen como primer objetivo la determinación de sus intensidades armónicas (en módulo y ángulo) para caracterizar así su comportamiento y poder determinar la distorsión armónica en las instalaciones eléctricas a partir de las expresiones de dichas intensidades. No obstante, estos estudios han llevado también a la necesidad de analizar fenómenos particulares del comportamiento de las cargas no lineales como son la cancelación y la interacción armónica, los cuales deben de tenerse en consideración cuando se desea calcular de forma correcta la distorsión armónica de la intensidad. El primero consiste en la disminución del valor eficaz de la intensidad armónica total consumida por un conjunto de cargas no lineales debido a los desfases existentes entre las intensidades armónicas individuales consumidas por cada una de las cargas que constituyen el conjunto [5, 9, 24, 29-31]. El segundo consiste en la influencia de las tensiones armónicas en bornes de las cargas no lineales sobre las intensidades armónicas consumidas por dichas cargas [6, 17, 32, 33, 39].

La caracterización completa del comportamiento de las cargas no lineales permite, por tanto, abordar el análisis de las diversas problemáticas que aparecen en el campo de la calidad y de los armónicos. Entre estas problemáticas, destaca el estudio de la intensidad del conductor neutro en instalaciones trifásicas con cargas no lineales monofásicas conectadas [34-36]. Si la instalación trabaja en condiciones simétricas y equilibradas tanto de alimentación como de carga, únicamente los armónicos de intensidad de tercer orden circulan por el neutro y son de valor triple a los de las fases. En cambio, si dicha instalación no trabaja en las condiciones anteriores, la suma de los armónicos de intensidad de primer y quinto orden no es nula, pudiéndose incrementar el valor eficaz de la intensidad que circula por el neutro respecto a la situación equilibrada.

1.3 Descripción y objetivos de la tesis

Enmarcada en este contexto, y como continuación de los trabajos realizados por el grupo de investigación QSE (Calidad del Suministro Eléctrico) de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) sobre modelización de cargas no lineales para la determinación de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de potencia [39-41], se ha realizado como tesis una serie de estudios sobre las cargas no lineales más habituales en dichos sistemas (rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, rectificadores trifásicos de 6 pulsos y lámparas de descarga) encaminados básicamente a la caracterización de su comportamiento y al análisis de su influencia en los sistemas eléctricos de potencia. La tesis se ha desarrollado en colaboración con el grupo de investigación GNOM (Grupo de Optimización Numérica y Modelización) de la UPC para poder analizar el problema numérico planteado por el sistema de ecuaciones no lineales que caracteriza cada una de las cargas no lineales, así como poder abordar con garantías problemas de optimización.

Frente a todo lo presentado en el apartado 1.2, los objetivos de esta tesis son:

- Analizar la modelización de las cuatro cargas no lineales más habituales en los sistemas eléctricos de potencia con el objetivo de introducir de forma justificada el concepto de invariante y establecer rangos de valores para dichos invariantes de acuerdo a sus condiciones habituales de funcionamiento.
- Aprovechar las posibilidades que ofrecen los invariantes y, a partir de los rangos de valores obtenidos para cada uno de ellos, proceder a caracterizar el comportamiento determinístico de las cargas no lineales objeto de estudio y también a analizar los fenómenos de la cancelación y la interacción armónica.
- Caracterizar y estudiar experimentalmente, también a partir de los invariantes, las intensidades fundamental y armónicas (módulo y ángulo) que consumen las cargas no lineales consideradas en esta tesis, ya sea mediante la obtención de modelos

experimentales (bases de datos) validados tanto experimental como numéricamente, la validación experimental de los modelos analíticos estudiados o bien el ajuste de los parámetros de cualquiera de los anteriores modelos (estimación de parámetros) a partir de adquisiciones experimentales.

- Estudiar la intensidad del neutro en sistemas trifásicos en los que hay conectadas cargas no lineales monofásicas (en particular, rectificadores monofásicos con filtro capacitivo), utilizando los invariantes y validando experimentalmente los resultados que se obtengan.

1.4 Estructura de la tesis

La presente tesis está formada por seis capítulos y un anexo:

- El **Capítulo 1** es esta introducción. En primer lugar, se presenta la problemática de la contaminación armónica en los sistemas eléctricos de potencia y las áreas de investigación a que ha dado lugar. A continuación, se realiza una revisión de los antecedentes y del estado del arte que existe en esta materia hasta el momento. Por último, se describen los objetivos y la estructura de la tesis que se ha desarrollado.
- El **Capítulo 2** recoge el análisis de la modelización de las cuatro cargas no lineales estudiadas con el objetivo de introducir de forma justificada el concepto de invariante y establecer rangos de valores para dichos invariantes de acuerdo a sus condiciones habituales de funcionamiento. Aprovechando las posibilidades que ofrecen los invariantes y a partir de los rangos de valores obtenidos para cada uno de ellos, se procede a caracterizar el comportamiento determinístico de las cargas no lineales objeto de estudio y también a analizar los fenómenos de la cancelación y la interacción armónica.
- El **Capítulo 3** pone de relieve que también es posible la utilización de los invariantes para caracterizar y estudiar experimentalmente las intensidades fundamental y

armónicas que consumen las cuatro cargas no lineales consideradas en esta tesis. El trabajo experimental presentado va desde la obtención de modelos experimentales (bases de datos) validados tanto experimental como numéricamente, pasando por la validación experimental de los modelos analíticos estudiados y acabando en el ajuste de los parámetros de cualquiera de los anteriores modelos (estimación de parámetros) a partir de adquisiciones experimentales.

- El **Capítulo 4** se centra en aprovechar las ventajas que ofrecen los invariantes para el estudio de la intensidad del neutro en sistemas trifásicos en los que hay conectadas cargas no lineales monofásicas (en particular, rectificadores monofásicos con filtro capacitivo). En primer lugar, se determina analíticamente la intensidad que circula por el neutro de una instalación en condiciones de desequilibrio generales. A continuación, se estudia la influencia de tres situaciones de desequilibrio particulares realizando simulaciones con rectificadores monofásicos con filtro capacitivo para obtener resultados numéricos. Por último, se validan los resultados anteriores con pruebas experimentales en el laboratorio.
- El **Capítulo 5** está destinado a la descripción de las aportaciones realizadas, las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación que se han abierto fruto de todo el trabajo desarrollado en la tesis.
- El **Capítulo 6** constituye una recopilación tanto de las referencias consultadas por el doctorando para la realización de la presente tesis como de su producción científica derivada de la misma.
- El **Anexo** muestra el compendio de los cuatro artículos de calidad contrastada que conforman la tesis, todos ellos publicados en revistas de reconocido índice de impacto indexadas en el *Journal Citation Report*.

2. Modelización y estudio de las cargas no lineales

La mayor parte de los trabajos sobre las cargas no lineales persiguen fundamentalmente el análisis de su comportamiento con el objeto de predecir mediante modelos analíticos teóricos, técnicas de simulación o herramientas gráficas las intensidades armónicas que inyectan en la red, determinando tanto el módulo como el ángulo de fase de dichas intensidades para así caracterizar completamente su comportamiento [5-22, 40-42]. Algunos de estos estudios analizan las cargas no lineales a partir de parámetros que persiguen caracterizar su comportamiento de forma unívoca, aunque en la mayoría de los casos dichos parámetros no son justificados teóricamente y no caracterizan completamente su comportamiento [8, 15, 16, 18].

Los trabajos anteriores, además de permitir el análisis del comportamiento de las cargas no lineales, han llevado también a la necesidad de analizar fenómenos particulares de su comportamiento como son la cancelación [5, 9, 24, 29-31] y la interacción armónica [6, 17, 32, 33, 39], los cuales deben de tenerse en consideración cuando se desea calcular de forma correcta la distorsión armónica de la intensidad.

Frente a todo lo anteriormente comentado, en este capítulo se ha estudiado la modelización de las cargas no lineales con el objetivo de introducir de forma justificada el concepto de invariante y establecer rangos de valores para dichos invariantes de acuerdo a sus condiciones habituales de funcionamiento [46]. Tal como se presentará a continuación, la importancia de los invariantes obtenidos en el estudio reside fundamentalmente en que caracterizan de forma unívoca el comportamiento de las cargas no lineales. En particular, las cargas no lineales estudiadas son las siguientes:

- Rectificador monofásico con filtro capacitivo.
- Rectificador trifásico con filtro capacitivo.
- Rectificador trifásico de 6 pulsos.
- Lámpara de descarga.

Además, en el presente capítulo se ha analizado el comportamiento determinístico [46, 50, 51] de las cargas no lineales anteriores y los fenómenos de cancelación [46, 52] e interacción armónica [46, 53, 54] aprovechando las ventajas que ofrecen los invariantes obtenidos.

Las cargas no lineales se han modelizado utilizando *circuitos lineales a tramos* [39]. Como hipótesis general para todo el estudio realizado, las tensiones de alimentación se consideran sinusoidales, es decir,

$$v(\theta) = \sqrt{2}V \cos(\theta + \theta_v) \quad (2.1)$$

para las cargas monofásicas, y

$$\begin{aligned} v_a(\theta) &= \sqrt{2}V \cos(\theta + \theta_{va}) \\ v_b(\theta) &= v_a(\theta - 2\pi/3) \quad , \quad v_c(\theta) = v_a(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2.2)$$

para las cargas trifásicas.

Además se observa que las cargas trifásicas se consideran alimentadas con tensiones simétricas y equilibradas.

2.1 Determinación de los invariantes de las cargas no lineales

Tal como se ha comentado anteriormente, el trabajo desarrollado en [46] ha permitido introducir el concepto de invariante en la modelización de las cuatro cargas no lineales ya mencionadas. Para ello se ha aplicado el siguiente procedimiento:

- Descripción del circuito equivalente de cada carga así como de las ondas de tensión e intensidad asociadas a su comportamiento. Presentación de las hipótesis o simplificaciones que se han adoptado en su modelización.
- Presentación de cada topología del circuito equivalente asociada a cada uno de los tramos lineales en que se descompone su funcionamiento.
- Para cada tramo, análisis del sistema de ecuaciones diferenciales que caracteriza el funcionamiento de la topología correspondiente al tramo estudiado.
- Normalización de los sistemas de ecuaciones diferenciales planteados e introducción y justificación teórica del concepto de invariante.
- Caracterización del comportamiento de las cargas no lineales a partir de los invariantes y establecimiento de rangos para dichos invariantes.

Se presenta a continuación un resumen de los resultados obtenidos en [46].

2.1.1 Rectificador monofásico con filtro capacitivo

En la Figura 2.1(a), se presenta el circuito equivalente utilizado en el estudio del rectificador monofásico con filtro capacitivo. Se realizan las siguientes hipótesis en su estudio:

- Los parámetros que lo caracterizan son los mostrados en la Figura 2.1(a). En concreto, la carga de continua se modeliza como una resistencia R_D , [5, 6, 29, 30, 39].
- Se analiza su comportamiento en conducción discontinua.

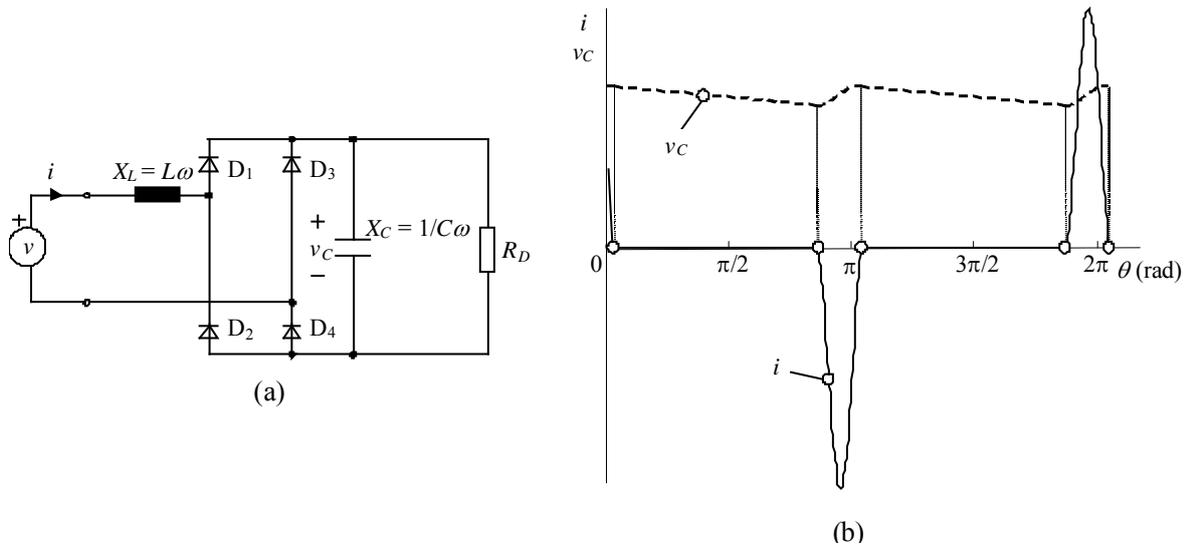


Figura 2.1. Estudio del rectificador monofásico con filtro capacitivo: a) Circuito equivalente. b) Tensión e intensidad.

En la Figura 2.1(b), se presentan la tensión e intensidad que caracterizan el comportamiento del rectificador, es decir, la tensión del lado de continua v_C y la intensidad consumida por el rectificador i .

Siguiendo el procedimiento ya indicado y tal como se desarrolla en [46], se toman como referencias para la normalización del modelo de la carga el valor eficaz de la tensión de alimentación y la resistencia del lado de continua del rectificador (es decir, $U_R = V$ y $Z_R = R_D$ de (2.1) y de la Figura 2.1(a) respectivamente y, por tanto, $I_R = U_R/Z_R = V/R_D$). Realizando esta normalización se consigue que las ecuaciones de la carga expresadas en las nuevas variables normalizadas, $v_{C,N} = v_C/U_R$ y $i_N = i/I_R$, dependan sólo de los parámetros normalizados siguientes:

$$x_{L,N} = \frac{X_L}{Z_R} = \frac{X_L}{R_D}, \quad x_{C,N} = \frac{X_C}{Z_R} = \frac{X_C}{R_D}. \quad (2.3)$$

Así, el comportamiento del rectificador puede ser descrito de forma unívoca con los dos parámetros normalizados anteriores, los cuales llamaremos *invariantes* del rectificador monofásico con filtro capacitivo.

El rango de valores de $x_{L,N}$ y $x_{C,N}$ a considerar en futuros estudios puede ser obtenido relacionando cada uno de estos invariantes con la relación de cortocircuito $R_{SC} = S_{CC}/S_{Carga}$ y el rizado de continua del rectificador $\Delta v_C/V_C$, respectivamente [46].

Así pues, los rangos de valores establecidos son $x_{L,N}(\%) = (0.05 \dots 10)$ y $x_{C,N}(\%) = (0.5 \dots 4.5)$, los cuales aproximadamente corresponden a $R_{SC} = (5 \dots 1000)$ y a $\Delta v_C/V_C(\%) = (1 \dots 10)$, respectivamente.

Finalmente comentar que, aunque no ha sido objeto del estudio el funcionamiento del rectificador en conducción continua, éste también podría ser caracterizado a partir de los invariantes presentados, es decir, $x_{L,N}$ y $x_{C,N}$.

2.1.2 Rectificador trifásico con filtro capacitivo

En la Figura 2.2(a), se presenta el circuito equivalente utilizado en el estudio del rectificador trifásico con filtro capacitivo. Se realizan las siguientes hipótesis en su estudio:

- Los parámetros que lo caracterizan son los mostrados en la Figura 2.2(a). En concreto, la carga de continua se modeliza como una resistencia R_D , [39].
- Se analiza su comportamiento en conducción continua (CCM) y discontinua (DCM).

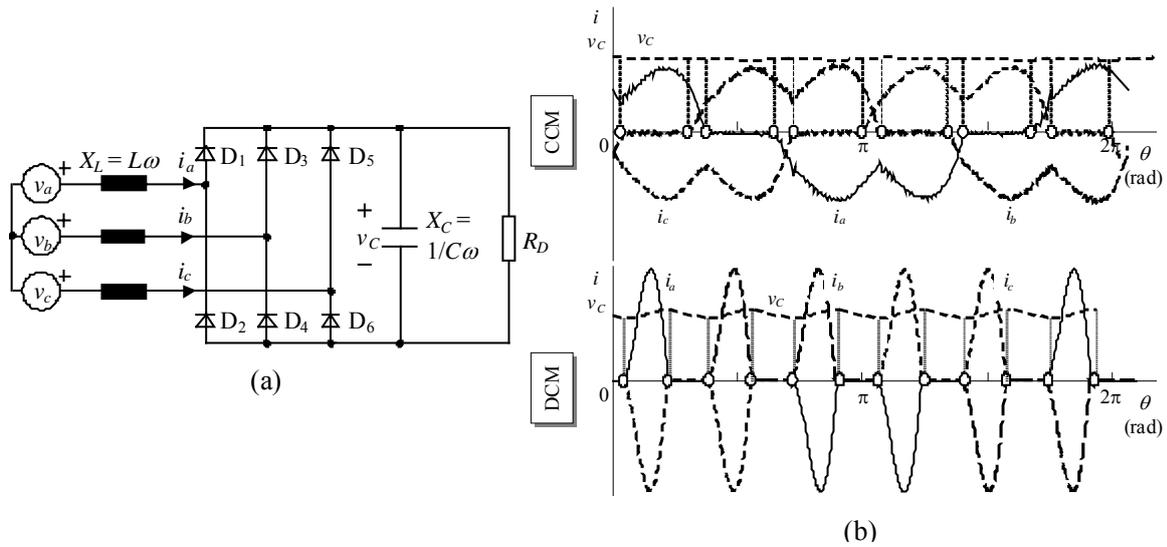


Figura 2.2. Estudio del rectificador trifásico con filtro capacitivo: a) Circuito equivalente. b) Tensiones e intensidades.

En la Figura 2.2(b), se presentan las tensiones e intensidades que caracterizan el comportamiento del rectificador, es decir, la tensión del lado de continua v_c y las intensidades consumidas por las tres fases del rectificador i_a , i_b e i_c .

Siguiendo el procedimiento ya indicado y tal como se desarrolla en [46], se toman como referencias para la normalización del modelo de la carga el valor eficaz de la tensión fase-neutro de alimentación y la resistencia del lado de continua del rectificador (es decir, $U_R = V$ y $Z_R = R_D$ de (2.2) y de la Figura 2.2(a) respectivamente y, por tanto, $I_R = U_R/Z_R = V/R_D$). Realizando esta normalización se consigue que las ecuaciones de la carga expresadas en las nuevas variables normalizadas, $v_{c,N} = v_c/U_R$ y $i_{f,N} = i_f/I_R$ ($f = a, b, c$), dependan sólo de los parámetros normalizados siguientes:

$$x_{L,N} = \frac{X_L}{Z_R} = \frac{X_L}{R_D} \quad , \quad x_{C,N} = \frac{X_C}{Z_R} = \frac{X_C}{R_D}. \quad (2.4)$$

Así, el comportamiento del rectificador puede ser descrito de forma unívoca con los dos parámetros normalizados anteriores, los cuales llamaremos *invariantes* del rectificador trifásico con filtro capacitivo.

El rango de valores de $x_{L,N}$ y $x_{C,N}$ a considerar en futuros estudios puede ser obtenido relacionando cada uno de estos invariantes con la relación de cortocircuito $R_{SC} = S_{CC}/S_{Carga}$ y el rizado de continua del rectificador $\Delta v_C/V_C$ en DCM, respectivamente [46].

Así pues, los rangos de valores establecidos son $x_{L,N}(\%) = (0.05 \dots 10)$ y $x_{C,N}(\%) = (2 \dots 20)$, los cuales aproximadamente corresponden a $R_{SC} = (5 \dots 1000)$ y a $\Delta v_C/V_C(\%) = (1 \dots 10)$, respectivamente.

2.1.3 Rectificador trifásico de 6 pulsos

En la Figura 2.3(a), se presenta el circuito equivalente utilizado en el estudio del rectificador trifásico de 6 pulsos. Se realizan las siguientes hipótesis en su estudio:

- Los parámetros que lo caracterizan son los mostrados en la Figura 2.3(a). En concreto, la carga del lado de continua se modeliza como una fuente de corriente constante I_D (ausencia de rizado en la intensidad del lado de continua) y se conoce también la potencia P consumida por el rectificador, [18, 41, 42].

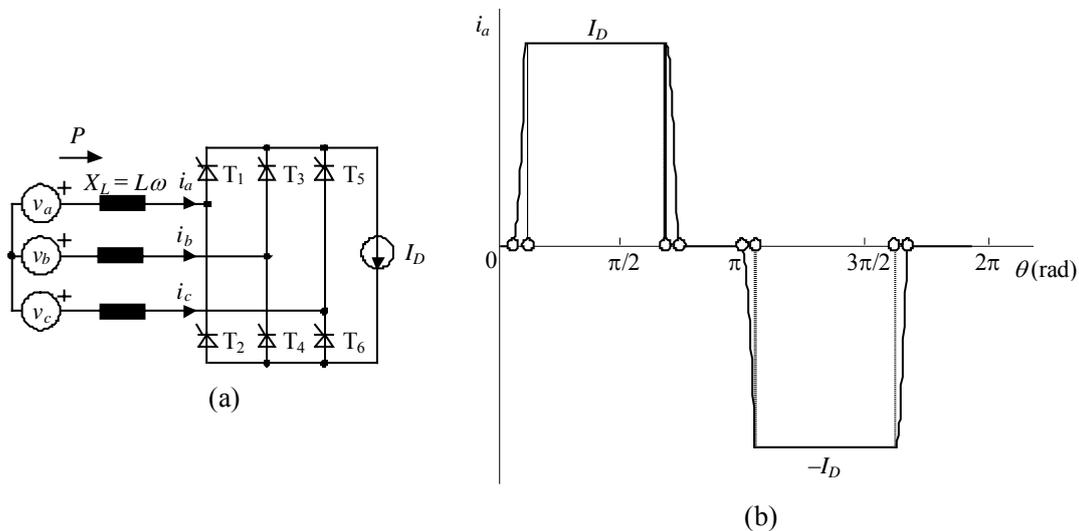


Figura 2.3. Estudio del rectificador trifásico de 6 pulsos: a) Circuito equivalente. b) Intensidad.

En la Figura 2.3(b), se presenta la intensidad que caracteriza el comportamiento del rectificador, es decir, la intensidad consumida por una fase del rectificador i_a (fase a).

Siguiendo el procedimiento ya indicado y tal como se desarrolla en [46], se toman como referencias para la normalización del modelo de la carga el valor eficaz de la tensión fase-neutro de alimentación y la intensidad del lado de continua del rectificador (es decir, $U_R = V$ y $I_R = I_D$ de (2.2) y de la Figura 2.3(a) respectivamente y, por tanto, $Z_R = U_R/I_R = V/I_D$ y $S_R = U_R \cdot I_R = V \cdot I_D$). Realizando esta normalización se consigue que las ecuaciones de la carga expresadas en las nuevas variables normalizadas, $i_{f,N} = i_f/I_R$ ($f = a, b, c$), dependan sólo de los parámetros normalizados siguientes:

$$x_{L,N} = \frac{X_L}{Z_R} = \frac{X_L}{V/I_D}, \quad p_N = \frac{P}{S_R} = \frac{P}{V \cdot I_D}. \quad (2.5)$$

Así, el comportamiento del rectificador puede ser descrito de forma unívoca con los dos parámetros normalizados anteriores, los cuales llamaremos *invariantes* del rectificador trifásico de 6 pulsos.

El rango de valores de $x_{L,N}$ y p_N a considerar en futuros estudios puede ser obtenido relacionando cada uno de estos invariantes con la relación de cortocircuito $R_{SC} = S_{CC}/S_{Carga}$ y el ángulo de disparo α del rectificador, respectivamente [46].

Así pues, los rangos de valores establecidos son $x_{L,N}(\%) = (0.1 \dots 25)$ y $p_N(\%) = (0 \dots 233.9)$, los cuales aproximadamente corresponden a $R_{SC} = (5 \dots 1000)$ y a $\alpha(^{\circ}) = (0 \dots 90)$, respectivamente.

Finalmente comentar que, aunque es habitual en la bibliografía considerar la hipótesis de ausencia de rizado en la intensidad del lado de continua del rectificador, de no haberse considerado tal hipótesis su circuito equivalente sería distinto (la fuente de intensidad constante I_D debe ser sustituida por una resistencia, una inductancia y una fuente de tensión constante conectadas en serie entre sí, [41, 42]) y, por tanto, el estudio debería ser formulado de nuevo y serían otros los invariantes que caracterizaran el comportamiento de la carga.

2.1.4 Lámpara de descarga

En la Figura 2.4(a), se presenta el circuito equivalente utilizado en el estudio de la lámpara. Se realizan las siguientes hipótesis en su estudio:

- Los parámetros que la caracterizan son los mostrados en la Figura 2.4(a). En concreto, la tensión de arco se modeliza con la onda cuadrada v_A , [10, 21, 22, 39].

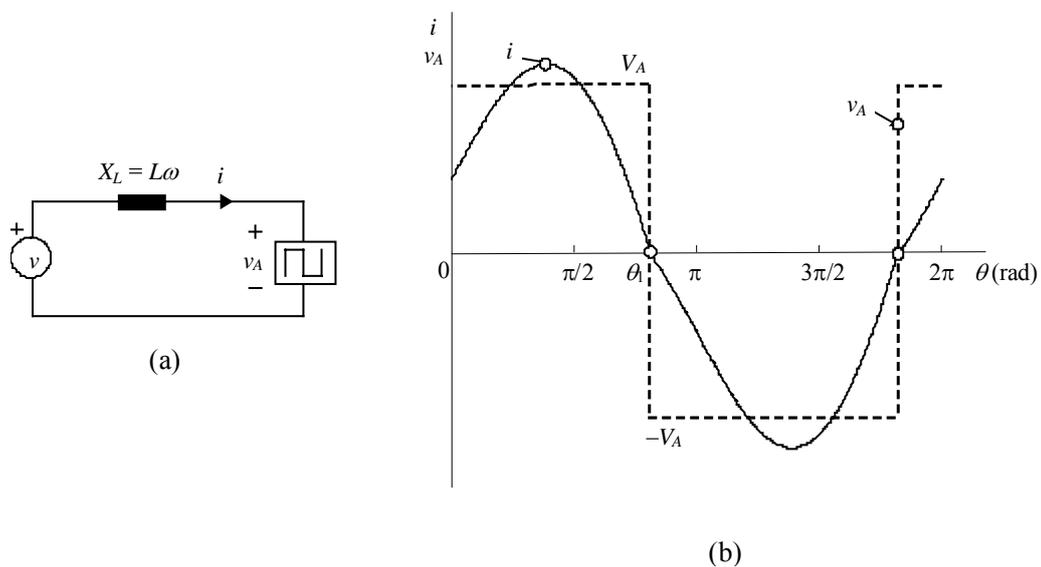


Figura 2.4. Estudio de la lámpara de descarga: a) Circuito equivalente. b) Tensión e intensidad.

En la Figura 2.4(b), se presentan la tensión e intensidad que caracterizan el comportamiento de la lámpara, es decir, la tensión de arco v_A y la intensidad consumida por la lámpara i .

Siguiendo el procedimiento ya indicado y tal como se desarrolla en [46], se toman como referencias para la normalización del modelo de la carga el valor eficaz de la tensión de alimentación y la reactancia de la lámpara (es decir, $U_R = V$ y $Z_R = X_L$ de (2.1) y de la Figura 2.4(a) respectivamente y, por tanto, $I_R = U_R/Z_R = V/X_L$). Realizando esta normalización se consigue que la ecuación de la carga expresada en la nueva variable normalizada, $i_N = i/I_R$, dependa sólo del parámetro normalizado siguiente:

$$v_{A,N} = \frac{V_A}{U_R} = \frac{V_A}{V}. \quad (2.6)$$

Así, el comportamiento de la lámpara puede ser descrito de forma unívoca con el parámetro normalizado anterior, el cual llamaremos *invariante* de la lámpara de descarga.

El rango de valores de $v_{A,N}$ a considerar en futuros estudios puede ser obtenido relacionando el invariante con el ángulo de conmutación θ_1 de la lámpara [10, 46], el cual, tal como se desprende de la Figura 2.4(b), es el ángulo inicial de la semionda negativa tanto de la intensidad i como de la tensión v_A .

Así pues, el rango de valores establecido es $v_{A,N} (\%) = (0 \dots 75.9)$, el cual, considerando $\theta_v = 0$ en (2.1), corresponde a $\theta_1 (^\circ) = (122.48 \dots 180)$.

Finalmente comentar que, aunque no ha sido objeto del estudio el funcionamiento de la lámpara en conducción discontinua, éste también podría ser caracterizado a partir del invariante presentado, es decir, $v_{A,N}$, [10].

2.2 Caracterización del comportamiento de las cargas no lineales

El concepto de invariante introducido en la modelización de las cargas no lineales puede ser utilizado en futuros estudios sobre dichas cargas tales como la caracterización de su comportamiento determinístico, así como en el análisis de los fenómenos de la cancelación y la interacción armónica asociados a ellas. Esta caracterización así como el análisis de los fenómenos anteriores pasa por la determinación de las intensidades armónicas consumidas por las cargas no lineales. En este sentido, el hecho de que los invariantes caractericen de forma unívoca el comportamiento de dichas cargas aconseja realizar los estudios anteriores con las intensidades armónicas del modelo normalizado (intensidades armónicas normalizadas), las cuales dependerán exclusivamente de dichos invariantes.

Así, las intensidades armónicas consumidas por cada una de las cargas no lineales pueden ser obtenidas analíticamente a partir de la descomposición en serie de Fourier de sus respectivas funciones intensidad consumida, $i(\theta)$, [4] mediante

$$\underline{I}_h = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\theta) e^{-jh\theta} d\theta \quad (h = 1, 3, 5, \dots). \quad (2.7)$$

Considerando el modelo normalizado, (2.7) se puede reescribir [46] según

$$\begin{aligned} \underline{I}_h &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I_R i_N(\theta) e^{-jh\theta} d\theta \\ &= I_R \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_N(\theta) e^{-jh\theta} d\theta = I_R \underline{I}_{h,N} \quad (h = 1, 3, 5, \dots), \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$ son las intensidades armónicas normalizadas consumidas por dichas cargas e I_R es la intensidad de referencia ($I_R = U_R/Z_R = V/R_D$ en el caso de los rectificadores con filtro capacitivo, $I_R = I_D$ en el caso del rectificador de 6 pulsos e $I_R = V/X_L$ en el caso de la lámpara de descarga).

Tal como se ha mencionado, las intensidades armónicas normalizadas, $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$, serán las mismas para cargas del mismo tipo con invariantes del mismo valor, es decir, estas intensidades están directamente relacionadas con los invariantes de una carga. Así, según (2.8), conocidas las intensidades $\underline{I}_{h,N}$ para unos invariantes concretos se podrían obtener las intensidades armónicas consumidas por una carga con los mismos invariantes tan sólo con multiplicarlas por su intensidad de referencia.

El procedimiento anterior supone que las intensidades armónicas normalizadas y las reales tienen el mismo ángulo de fase. Esto sólo es cierto si las intensidades normalizadas han sido determinadas a partir de una tensión de alimentación con el mismo ángulo de fase que la tensión aplicada a la carga cuyas intensidades consumidas se desean obtener. Para considerar la influencia del ángulo de fase de la tensión de alimentación en estudios posteriores y generalizar la expresión (2.8), se estudiará el caso de una carga alimentada con una tensión de ángulo de fase θ_f (la tensión de alimentación es $v_{Carga}(\theta) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\theta + \theta_f)$ y por tanto la tensión normalizada es $v_{Carga,N}(\theta) = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot \cos(\theta + \theta_f)$) mientras que las intensidades normalizadas asociadas a los mismos invariantes que la carga a estudio fueron obtenidas para un ángulo nulo (en este caso la tensión de alimentación es $v(\theta) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\theta)$ y la tensión normalizada es $v_N(\theta) = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot \cos(\theta)$). Según lo anterior, es claro que, por ser el valor de los invariantes y el de las tensiones normalizadas el mismo, las intensidades normalizadas en ambos casos son las mismas pero desplazadas el ángulo θ_f , es decir, $i_{Carga,N}(\theta) = i_N(\theta + \theta_f)$. Así, las intensidades armónicas consumidas por la carga a estudio se pueden calcular a partir de las normalizadas utilizando

$$\begin{aligned} \underline{I}_h &= I_R \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{Carga,N}(\theta) e^{-jh\theta} d\theta = I_R \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_N(\theta + \theta_f) e^{-jh\theta} d\theta \\ &= e^{jh\theta_f} I_R \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_N(\xi) e^{-jh\xi} d\xi = e^{jh\theta_f} I_R \underline{I}_{h,N} \quad (h = 1, 3, 5, \dots). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Según (2.9), se pueden determinar fácilmente las intensidades armónicas consumidas por una carga no lineal alimentada por una tensión genérica $v_{Carga}(\theta) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\theta + \theta_f)$ si se conocen las intensidades armónicas normalizadas asociadas a invariantes del mismo

valor que los de la carga a estudio y a una tensión de alimentación de ángulo de fase nulo. Para ello es suficiente con multiplicar las intensidades armónicas normalizadas por la intensidad de referencia de la carga a estudio, I_R , y por el término $e^{jh\theta_f}$ que tiene en cuenta el desplazamiento de las tensiones de alimentación.

A continuación, y una vez presentada la caracterización de las intensidades armónicas a partir del modelo normalizado, se desarrollarán los estudios mencionados al inicio del presente apartado.

2.2.1 Caracterización del comportamiento determinístico

A partir del rango de valores habituales de cada uno de los invariantes obtenidos en el apartado 2.1, se ha analizado en [46] el comportamiento determinístico de las cuatro cargas no lineales estudiadas. Los resultados se presentan en la Sección 5 y en las Figuras 2-6 de dicha referencia.

Además, siguiendo el mismo procedimiento y a partir de los mismos invariantes, en [50] y [51] se ha realizado un estudio más exhaustivo de dicho comportamiento en base a las mismas figuras presentadas en [46]. Dado que estas dos referencias no forman parte del compendio de artículos que constituyen esta tesis, las principales conclusiones obtenidas del estudio realizado en dichas referencias se detallan a continuación:

Rectificador monofásico con filtro capacitivo (ver Figura 3 de [46])

- Las intensidades fundamental y armónicas están básicamente caracterizadas por el invariante $x_{L,N}$. Cuanto mayor es el invariante $x_{L,N}$, menores son los valores eficaces de las intensidades armónicas (una forma común de reducir las intensidades armónicas es añadir una inductancia de “choque”). Puede observarse que hay una atenuación significativa de los valores eficaces de las intensidades armónicas por encima del séptimo armónico cuando $x_{L,N}$ crece.

- La distorsión armónica de la intensidad de línea está determinada principalmente por los armónicos de orden más bajo $I_{3,N}$, $I_{5,N}$ e $I_{7,N}$, siendo sus rangos de valores $1.9 \dots I_{3,N} \dots 0.7$, $1.75 \dots I_{5,N} \dots 0.2$ y $1.5 \dots I_{7,N} \dots 0.2$.
- El ángulo de fase de la intensidad fundamental está próximo a cero para valores bajos de $x_{L,N}$ y sólo decrece a $\phi_1 = -20^\circ$ para $x_{L,N} = 10\%$. Cuanto mayor es el orden del armónico, mayor es la influencia del invariante $x_{L,N}$ sobre los ángulos de fase de las intensidades armónicas.
- La pequeña influencia del invariante $x_{C,N}$ puede no ser considerada tanto en el estudio del valor eficaz de la intensidad para los armónicos de orden más bajo como en el estudio del ángulo de fase de la intensidad fundamental. Nótese que esta influencia sí debe ser tenida en cuenta en el análisis de los ángulos de fase de las intensidades armónicas. Sin embargo, los valores de $x_{C,N}$ más pequeños no afectan a los resultados de manera significativa, especialmente para valores de $x_{L,N}$ elevados. En la práctica, la capacidad del condensador del lado de continua es lo bastante grande (es decir, el valor de $x_{C,N}$ lo suficientemente pequeño) para asumir que las intensidades fundamental y armónicas no están afectadas por él. Por tanto, puede considerarse un condensador del lado de continua con capacidad casi infinita, es decir, $x_{C,N} \leq 0.5\%$, [8, 10].

Rectificador trifásico con filtro capacitivo (ver Figura 4 de [46])

- Las intensidades fundamental y armónicas están básicamente caracterizadas por el invariante $x_{L,N}$. Cuanto mayor es el invariante $x_{L,N}$, menores son los valores eficaces de las intensidades armónicas, especialmente en DCM –Modo de Conducción Discontinua–, es decir, para los valores de $x_{L,N}$ más bajos (una forma común de reducir las intensidades armónicas es añadir una inductancia de “choque”).
- La distorsión armónica de la intensidad de línea está determinada principalmente por los armónicos de orden más bajo $I_{5,N}$ e $I_{7,N}$, siendo sus rangos de valores $1.8 \dots I_{5,N} \dots 0.3$ y $1.6 \dots I_{7,N} \dots 0.2$.
- El ángulo de fase de la intensidad fundamental permanece próximo a cero independientemente de los valores de $x_{L,N}$. Cuanto mayor es el orden del armónico,

mayor es la influencia del invariante $x_{L,N}$ sobre los ángulos de fase de las intensidades armónicas.

- La influencia del invariante $x_{C,N}$ puede no ser considerada en el estudio tanto del valor eficaz como del ángulo de fase de la intensidad fundamental. Esto también es cierto tanto para el valor eficaz como para el ángulo de fase de las intensidades armónicas en CCM (Modo de Conducción Continua) pero no en DCM. Sin embargo, en DCM, los valores de $x_{C,N}$ más pequeños no afectan a los resultados de manera significativa. En la práctica, la capacidad del condensador del lado de continua es normalmente lo bastante grande (es decir, el valor de $x_{C,N}$ lo suficientemente pequeño) para asumir que las intensidades fundamental y armónicas no están afectadas por él. Por tanto, puede considerarse un condensador del lado de continua con capacidad casi infinita, es decir, $x_{C,N} \leq 2\%$, [8, 10].

Rectificador trifásico de 6 pulsos (ver Figura 5 de [46])

- Los valores eficaces de las intensidades fundamental y armónicas están básicamente caracterizados por el invariante $x_{L,N}$, mientras que los valores de ángulo de fase de dichas intensidades lo están por el invariante p_N . Considerando el modelo del rectificador y tomando como referencia la tensión de alimentación de la fase a [$\theta_{va} = 0$ en (2.2)], estos valores pueden ser descritos aproximadamente mediante las expresiones [16, 51, 56]

$$I_{h,N} \approx \frac{\sqrt{6} \operatorname{sen}(h\mu/2)}{\pi h \frac{h\mu/2}}, \quad \phi_h \approx \phi_{ho} - h(\alpha + \mu/2), \quad (2.10)$$

donde $\phi_{ho} = 0$ para $h = 1, 7, \dots$, $\phi_{ho} = \pi$ para $h = 5, 11, \dots$ y

$$\mu \approx \frac{6x_{L,N}}{\sqrt{54 - (p_N\pi)^2}}, \quad \alpha + \mu/2 \approx \cos^{-1}\left(\frac{p_N\pi}{3\sqrt{6}}\right). \quad (2.11)$$

- Cuanto mayor es el invariante $x_{L,N}$, mayor es el ángulo de solapamiento μ (2.11) y, por tanto, menor es el valor eficaz de las intensidades armónicas con respecto a la ley de las intensidades armónicas idealizadas $(I_{h,N})_{ID} = \sqrt{6}/(\pi \cdot h)$ y según el factor de amortiguamiento $[\operatorname{sen}(h \cdot \mu/2)]/(h \cdot \mu/2)$, (2.10). Esta atenuación es más grande para los

armónicos de orden más elevado. La influencia del invariante p_N sobre el ángulo de solapamiento (2.11) amortigua ligeramente el valor eficaz de las intensidades fundamental y armónicas.

- La distorsión armónica de la intensidad de línea está determinada principalmente por los armónicos de orden más bajo $I_{5,N}$ e $I_{7,N}$, siendo sus rangos de valores $0.156 \dots I_{5,N} \dots 0.130$ y $0.111 \dots I_{7,N} \dots 0.086$.
- Cuanto menor es el invariante p_N , mayor es el ángulo $\alpha + \mu/2$ (2.11) y, por tanto, mayor es la influencia de este invariante sobre los ángulos de fase de las intensidades armónicas, (2.10). Esta influencia es más grande para los armónicos de orden más elevado. El invariante $x_{L,N}$ no afecta al ángulo $\alpha + \mu/2$ significativamente (2.11) y, por tanto, no afecta al ángulo de fase de las intensidades fundamental y armónicas.
- El ángulo de fase de la intensidad fundamental varía según $\phi_1 \approx -(\alpha + \mu/2)$, el cual puede ser aproximado por $\phi_1 \approx -\alpha$ para valores pequeños de $x_{L,N}$ (es decir, para valores pequeños de μ).

Lámpara de descarga (ver Figura 6 de [46])

- Las intensidades fundamental y armónicas están caracterizadas por el invariante $v_{A,N}$. Considerando el modelo de la lámpara y tomando como referencia la tensión de alimentación [$\theta_v = 0$ en (2.1)], estas intensidades pueden ser descritas mediante las expresiones [10, 50]

$$I_{1,N} = \sqrt{1 - (2 - \lambda^2) \cdot v_{A,N}^2}, \quad \phi_1 = -\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{v_{A,N} \sqrt{\lambda^2 - v_{A,N}^2}}{1 - v_{A,N}^2} \right), \quad (2.12)$$

$$I_{h,N} = \frac{\lambda \cdot v_{A,N}}{h^2}, \quad \phi_h = h \cdot \text{sen}^{-1} \left(\frac{v_{A,N}}{\lambda} \right),$$

donde $\lambda = 2\sqrt{2}/\pi$ y $h = 3, 5, \dots$.

- Cuanto mayor es el invariante $v_{A,N}$, menor es el valor eficaz de la intensidad fundamental y, a su vez, mayor y proporcional es el de las intensidades armónicas ($I_{h,N} \propto v_{A,N}$).

- La distorsión armónica de la intensidad de línea está determinada principalmente por el armónico de orden más bajo $I_{3,N}$ (porque $I_{h,N} \propto 1/h^2$), siendo su rango de valores $0 \dots I_{3,N} \dots 0.076$.
- El ángulo de fase de la intensidad fundamental está próximo a -90° para valores bajos de $v_{A,N}$ y sólo se incrementa hasta $\phi_1 = -49.5^\circ$ para $v_{A,N} = 75\%$. La influencia del invariante $v_{A,N}$ sobre los ángulos de fase de las intensidades armónicas es mayor cuanto más grande es el orden del armónico.

2.2.2 Estudio del fenómeno de la cancelación armónica

El fenómeno de la cancelación armónica consiste en la disminución del valor eficaz del h -ésimo armónico de la intensidad total consumida por un conjunto de cargas no lineales debida a los desfases existentes entre los también h -ésimos armónicos de las intensidades consumidas individualmente por cada una de las cargas no lineales que integran dicho conjunto. Estos desfases se deben a la diversidad de las fases del h -ésimo armónico de intensidad propiciada por la distinta naturaleza o por el distinto valor de los parámetros de las cargas no lineales integrantes del conjunto, [5, 9, 24, 29-31]. Así, el fenómeno se produce cuando las intensidades armónicas de una determinada frecuencia están en oposición de fase o próximas a ella y, por tanto, la suma geométrica de dichas intensidades es mucho menor que su suma aritmética.

Para cuantificar el nivel de cancelación armónica de orden h que se tiene en la intensidad total consumida por un conjunto de cargas no lineales se define el *factor de diversidad* (*diversity factor*) de intensidades armónicas de orden h como

$$DF_{I_h} = \frac{\left| \sum_{j=1}^N \underline{I}_h^j \right|}{\sum_{j=1}^N I_h^j} \quad (2.13)$$

donde $\underline{I}_h^j = I_h^j \angle \phi_h^j$ es el fasor asociado a la intensidad armónica de orden h consumida por la j -ésima carga no lineal perteneciente al conjunto de N cargas, [5].

Este factor de diversidad puede tomar valores entre 0 y 1. Cuanto más pequeño es su valor, mayor es el nivel de cancelación armónica de orden h que se tiene.

En la Sección 6 de [46] se completó la obtención de los invariantes con una aplicación práctica de los mismos sobre cuatro ensayos en el laboratorio, en los que se apunta y analiza el fenómeno de la cancelación armónica. Estos ensayos también sirvieron para validar los modelos normalizados de las cargas no lineales estudiadas.

Los cuatro ensayos consisten en la medición de las intensidades armónicas totales que consumen varias cargas no lineales de diferente tipo compartiendo el mismo bus (se considera que dos cargas no lineales son de diferente tipo si son de diferente naturaleza o si, siendo de idéntica naturaleza, tienen distinto valor de sus parámetros característicos):

- Ensayo 1: Dos lámparas de descarga idénticas y un rectificador monofásico con filtro capacitivo.
- Ensayo 2: Dos rectificadores monofásicos con filtro capacitivo.
- Ensayo 3: Un rectificador trifásico con filtro capacitivo y un rectificador trifásico de 6 pulsos.
- Ensayo 4: Dos rectificadores trifásicos con filtro capacitivo.

Los ensayos realizados muestran que se producen cancelaciones armónicas significativas para los siguientes armónicos de intensidad:

- Ensayo 1: Tercer armónico de intensidad.
- Ensayo 2: Séptimo armónico de intensidad.
- Ensayo 3: Quinto armónico de intensidad.
- Ensayo 4: Séptimo armónico de intensidad.

Para analizar y completar los resultados del estudio y partiendo de los invariantes, se procedió a representar en diagramas de contorno la zona donde el valor absoluto de la diferencia de ángulos de fase de las intensidades armónicas está comprendido entre 150° y

180° para el tercer, séptimo, quinto y séptimo armónicos de intensidad de los ensayos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. En base a los diagramas de contorno anteriores, el fenómeno de cancelación entre las intensidades armónicas para cada ensayo ocurre dentro de la zona sombreada en el correspondiente diagrama de contorno. Esta condición se cumple en los cuatro ensayos para las intensidades armónicas ya comentadas.

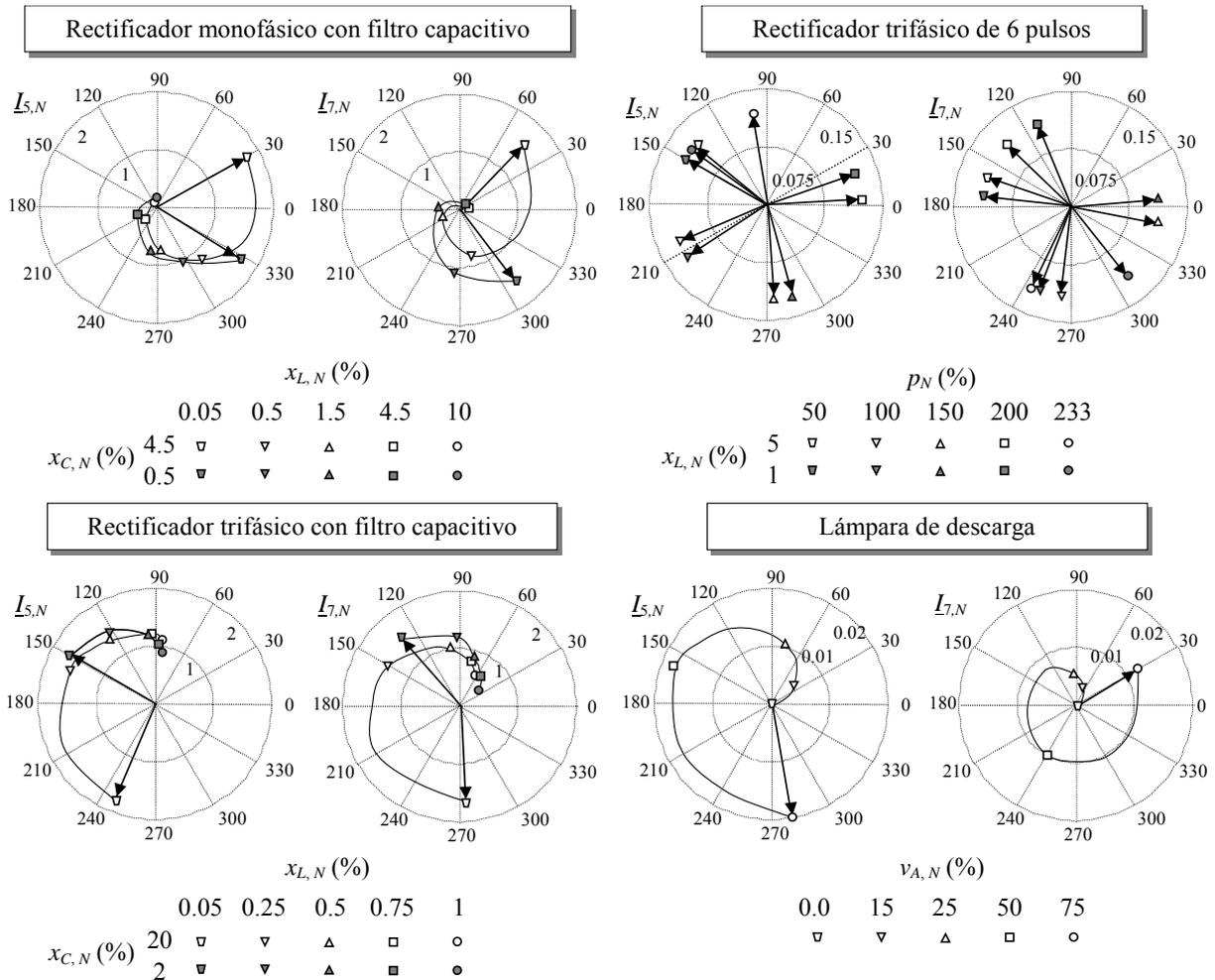


Figura 2.5. 5° y 7° armónicos de la intensidad normalizada consumida por las cargas no lineales.

El fenómeno de la cancelación armónica se analizó también de forma más general en [52], donde se realizó un análisis numérico del fenómeno representando la distribución de los ángulos de fase de las intensidades armónicas para cada carga no lineal a partir de diagramas fasoriales y en función de los invariantes. Cada distribución se obtuvo por simulación (utilizando PSpice y un programa informático desarrollado para la

investigación). En este sentido y considerando los invariantes presentados en el apartado 2.1, se realizó un análisis numérico de los ángulos de fase de las cuatro cargas no lineales objeto de estudio. Se determinaron por simulación las intensidades armónicas normalizadas, $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$, que las cargas no lineales consumen en función de sus invariantes. La Figura 2.5 muestra en un diagrama polar los fasores de estas intensidades para el quinto y el séptimo armónicos, $\underline{I}_{5,N} = I_{5,N} \angle \phi_5$ y $\underline{I}_{7,N} = I_{7,N} \angle \phi_7$. En estos diagramas fasoriales, la tensión sencilla (fase-neutro) de la fase a se ha tomado como fasor de referencia y todos los ángulos están referidos a dicho fasor. Así, la Figura 2.5 permite analizar la distribución de los ángulos de fase de las intensidades del quinto y séptimo armónicos y llegar a las siguientes conclusiones:

- Los dos armónicos analizados de las intensidades consumidas por los rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo pueden estar en oposición de fase. Por lo tanto, su suma geométrica puede ser significativamente menor que su suma aritmética y se produciría el fenómeno de la cancelación armónica.
- Los ángulos de las intensidades armónicas consumidas por el rectificador de 6 pulsos tienen una gran disparidad de valores en función del invariante p_N . Esto puede ser utilizado para conseguir que dichas intensidades estén en oposición de fase con las intensidades armónicas consumidas por otras cargas no lineales y que se produzca la cancelación armónica. No obstante, es difícil obtener esta situación al mismo tiempo para los dos armónicos estudiados y la cancelación armónica es menor que la producida entre los rectificadores con filtro capacitivo.
- La distribución continua de los ángulos de fase del quinto y séptimo armónicos consumidos por la lámpara de descarga permite analizar la posible cancelación armónica con las otras cargas no lineales. En este sentido, se observa que puede existir cancelación con el quinto armónico del rectificador monofásico con filtro capacitivo (por poder estar en oposición de fase) pero es improbable que también se pueda conseguir con el séptimo. Lo mismo sucede con el rectificador trifásico con filtro capacitivo con respecto al séptimo y al quinto armónicos. También se observa que la magnitud de los armónicos consumidos por la lámpara de descarga es mucho

menor que la del resto de cargas. Por tanto, para que exista cancelación se deberán combinar un número mayor de lámparas de descarga que del resto de cargas.

2.2.3 Estudio del fenómeno de la interacción armónica

El fenómeno de la interacción armónica consiste en la dependencia de los armónicos de intensidad consumidos por las cargas no lineales con respecto a los armónicos de tensión presentes en bornes de dichas cargas, [3].

Los investigadores del problema armónico siempre han tenido la “tentación” de modelizar las cargas no lineales sin tener en cuenta la distorsión armónica de la tensión que soportan dichas cargas (es decir, la “tentación” de considerar sinusoidal la tensión de alimentación), pues esta simplificación permite obtener modelos mucho más sencillos, [7, 10, 18, 15]. Sin embargo, es conocido que, en general, la no consideración de la interacción armónica lleva a una sobrestimación en el cálculo de las intensidades que las cargas no lineales inyectan en el sistema, [30, 32]. En este sentido, si se desea formular el problema de forma realista, es recomendable incluir los armónicos de la tensión de alimentación en los modelos utilizados, [17, 20, 32, 33, 39]. No obstante, esta generalización debe ser analizada con detalle para cada carga no lineal, ya que no todas presentan la misma sensibilidad a las tensiones armónicas y cualquier indicio que permitiese no incluirlas en el modelo de alguna carga sería bien recibido por la comunidad científica.

Según se desarrolla en el Apéndice A de [46], para analizar el fenómeno de la interacción armónica se debe considerar que la alimentación es periódica pero no sinusoidal, es decir, (2.1) y (2.2) deben generalizarse según

$$v(\theta) = \sqrt{2}V_1 \cos(\theta + \theta_{v1}) + \sqrt{2} \sum_{k=3,5,\dots} V_k \cos(k\theta + \theta_{vk}) \quad (2.14)$$

para las cargas monofásicas, y

$$\begin{aligned}
 v_a(\theta) &= \sqrt{2}V_1 \cos(\theta + \theta_{va1}) + \sqrt{2} \sum_{k=3,5,\dots} V_k \cos(k\theta + \theta_{vak}) \\
 v_b(\theta) &= v_a(\theta - 2\pi/3) \quad , \quad v_c(\theta) = v_a(\theta + 2\pi/3)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

para las cargas trifásicas.

Bajo esta consideración y tal como se deduce en [46], además de los invariantes ya establecidos para el estudio del comportamiento de las cargas no lineales, se debe tener en cuenta la influencia de los parámetros $V_{k,N} = V_k/V_1$ y θ_{vk} ($k = 3,5,\dots$), o θ_{vak} , en dicho comportamiento, lo que permite estudiar el fenómeno de interacción armónica. Para la onda fundamental $V_{1,N} = 1$ y $\theta_{v1} = 0$, o $\theta_{va1} = 0$, por lo que los ángulos de fase de las tensiones armónicas están referidos en todo el estudio al ángulo de fase de la tensión fundamental de alimentación.

Así, las intensidades armónicas normalizadas se pueden expresar como

$$\underline{I}_{h,N}^{CI} = I_{h,N}^{CI} \angle \phi_h^{CI} = \underline{g}_{h,N}^{CI}(V_{k,N}, \theta_{vk}, \beta_{1,N}, \dots, \beta_{r,N}) \quad (h = 1,3,5,\dots \ ; \ k = 3,5,\dots) \tag{2.16}$$

si se considera interacción armónica, y

$$\underline{I}_{h,N}^{SI} = I_{h,N}^{SI} \angle \phi_h^{SI} = \underline{g}_{h,N}^{SI}(\beta_{1,N}, \dots, \beta_{r,N}) \quad (h = 1,3,5,\dots) \tag{2.17}$$

si no se considera interacción armónica. Los superíndices *CI* y *SI* distinguen el estudio con y sin interacción respectivamente, h es el armónico de intensidad calculado, k es el armónico de tensión considerado en el cálculo de dicha intensidad (si se trabaja con interacción armónica) y los parámetros $\beta_{1,N}, \dots, \beta_{r,N}$ representan los invariantes de cada carga no lineal, es decir, $x_{L,N}$ y $x_{C,N}$ en el caso de los rectificadores con filtro capacitivo, $x_{L,N}$ y p_N en el caso del rectificador de 6 pulsos y $v_{A,N}$ en el caso de la lámpara de descarga. En (2.16) y (2.17), las intensidades no dependen de los parámetros $V_{1,N}$ y θ_{v1} , pues sus valores, tal como se ha comentado, son 1 y 0 respectivamente.

Tal como se presenta en [46], la interacción armónica es un fenómeno que, aunque conceptualmente sencillo, presenta un tratamiento complejo, ya que se debe analizar la influencia de un gran número de parámetros (tantos como armónicos se quieran considerar)

los cuales, en principio, no se pueden tratar de forma aislada (por ejemplo, considerando la presencia sólo de tercer armónico, $V_{3,N} = V_3/V_1$ y θ_{v3} , y el resto nulos), pues la distorsión de la tensión de alimentación, y por tanto su influencia, depende de la aportación de todos los armónicos presentes en el sistema. Así, este fenómeno ha sido muy poco estudiado en la bibliografía a pesar de su interés y en la actualidad casi todos los autores cuando quieren plantear el problema de forma precisa optan por trabajar con modelos que consideren la interacción.

Dada la dificultad apuntada anteriormente en el tratamiento del problema, como primera aproximación al mismo se desarrolló un software específico en MATLAB para analizar numéricamente el comportamiento de las cargas no lineales considerando los armónicos de tensión de forma aislada y así intentar obtener alguna conclusión sobre la sensibilidad de las intensidades fundamental y armónicas consumidas por dichas cargas frente a las tensiones armónicas, [53].

Posteriormente, se ha abierto una línea de trabajo sobre este tema en [54] analizando la influencia de las tensiones armónicas sobre las intensidades fundamental y armónicas consumidas por la lámpara de descarga mediante el método de Monte Carlo. En dicha referencia, se presenta un modelo normalizado de la lámpara de descarga más general que (2.12) en el sentido de que considera el fenómeno de la interacción armónica $V_{k,N} = V_k/V_1$ y θ_{vk} ($k > 1$), además de la resistencia R del balasto y, como consecuencia, un nuevo invariante $R_N = R/X_L$ junto con $v_{A,N}$. Dicho modelo es

$$\underline{I}_{h,N}^{(A)} = I_{h,N}^{(A)} \angle \phi_{Ih}^{(A)} = \frac{\sqrt{V_{h,N}^2 - (2 \cdot V_{h,N} \cdot \cos(h \cdot \theta_1^{(A)} + \theta_{vh} - \pi/2) - V_{Ah,N}) \cdot V_{Ah,N}}}{Z_{h,N}} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1} \left(\frac{V_{h,N} \cdot \sin(\theta_{vh} - \phi_{Zh}) + V_{Ah,N} \cdot \sin(\phi_{VAh} - \phi_{Zh})}{V_{h,N} \cdot \cos(\theta_{vh} - \phi_{Zh}) + V_{Ah,N} \cdot \cos(\phi_{VAh} - \phi_{Zh})} \right)} \quad (h \geq 1), \quad (2.18)$$

donde $\underline{Z}_{h,N} = Z_{h,N} \angle \phi_{Zh} = R_N + j \cdot h$ ($h \geq 1$) y

$$V_{Ah,N} = \frac{\lambda \cdot v_{A,N}}{h}, \quad \phi_{VAh} = (2 \cdot h + 1) \frac{\pi}{2} - h \cdot \theta_1^{(A)}. \quad (2.19)$$

El ángulo de conmutación $\theta_1^{(A)}$ se calcula mediante la resolución de la siguiente ecuación no lineal:

$$\sum_{k \geq 1} \frac{V_{k,N}}{Z_{k,N}} \cos(k \cdot \theta_1^{(A)} + \theta_{vk} - \phi_{zk}) = \frac{v_{A,N}}{\sqrt{2} \cdot R_N} \cdot \frac{(1 - e^{-R_N \cdot \pi})}{(1 + e^{-R_N \cdot \pi})}. \quad (2.20)$$

El supraíndice (A) en (2.18), (2.19) y (2.20) denota el modelo A de la lámpara de descarga. En las aplicaciones prácticas, los rangos habituales de los parámetros $V_{k,N}$, θ_{vk} , R_N y $v_{A,N}$ son:

- $V_{k,N} (\%) = (0 \dots 10)$ para $k > 1$ correspondiendo a distorsiones armónicas de la tensión de alimentación por debajo del 10%.
- $\theta_{vk} (^\circ) = (-180 \dots 180)$ para $k > 1$ correspondiendo a cualquier posible ángulo de fase de las tensiones armónicas.
- $R_N (\%) = (0 \dots 10)$ correspondiendo a los factores de potencia habituales del balasto ($\cos \varphi_b < 0.1$ porque el balasto está diseñado con pérdidas reducidas para aumentar la eficiencia energética de la lámpara de descarga) y considerando la siguiente relación entre el invariante R_N y el factor de potencia del balasto:

$$\cos \varphi_b = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \Rightarrow R_N = \frac{R}{X_L} = \frac{\cos \varphi_b}{\sqrt{1 - (\cos \varphi_b)^2}}. \quad (2.21)$$

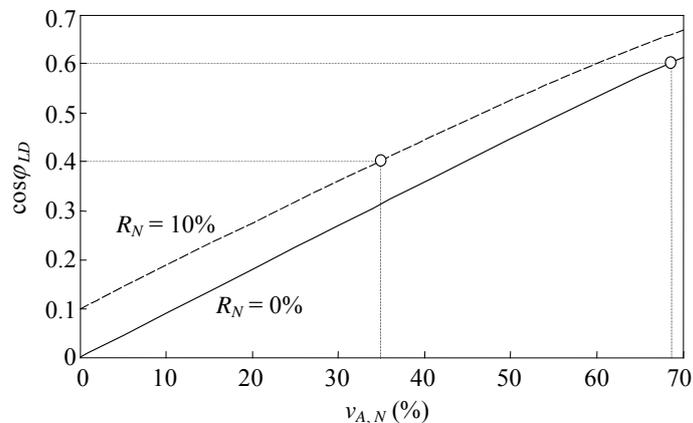


Figura 2.6. Factor de potencia de la lámpara de descarga en función del invariante $v_{A,N}$.

- $v_{A,N}(\%) = (35 \dots 70)$ correspondiendo aproximadamente a los factores de potencia habituales de la lámpara de descarga ($\cos \varphi_{LD} = P_{LD}/S_{LD} \approx 0.4$ a 0.6 , donde S_{LD} y P_{LD} son la potencia aparente y la potencia activa consumida por la lámpara de descarga, respectivamente). Para ilustrar el rango seleccionado de $v_{A,N}$, la Figura 2.6 muestra el factor de potencia de lámpara de descarga en función del invariante $v_{A,N}$ y para $R_N = 0$ y 10% . El gráfico ha sido obtenido de (2.18) y (2.20), y considerando tensión de alimentación sinusoidal (es decir, $\underline{V}_{k,N} = 0$ para $k > 1$).

El modelo anterior se compara con un modelo simplificado derivado del modelo A considerando la tensión de alimentación sinusoidal (es decir, $\underline{V}_{k,N} = 0$ para $k > 1$). Dicho modelo es

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1,N}^{(B)} &= I_{1,N}^{(B)} \angle \phi_{I1}^{(B)} = \\ & \frac{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \cos(\theta_1^{(B)} - \pi/2) - \lambda \cdot v_{A,N}\right) \cdot \lambda \cdot v_{A,N}}}{Z_{1,N}} \cdot \\ & e^{j \cdot \tan^{-1} \left(\frac{-\sin(\phi_{Z1}) + \lambda \cdot v_{A,N} \cdot \sin(3\pi/2 - \theta_1^{(B)} - \phi_{Z1})}{\cos(\phi_{Z1}) + \lambda \cdot v_{A,N} \cdot \cos(3\pi/2 - \theta_1^{(B)} - \phi_{Z1})} \right)}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\underline{I}_{h,N}^{(B)} = I_{h,N}^{(B)} \angle \phi_{Ih}^{(B)} = \frac{\lambda \cdot v_{A,N}}{h \cdot Z_{h,N}} \cdot e^{j \cdot \{(2-h+1)\pi/2 - h \cdot \theta_1^{(B)} - \phi_{Zh}\}} \quad (h > 1),$$

donde

$$\theta_1^{(B)} = \cos^{-1} \left(\frac{Z_{1,N} \cdot v_{A,N}}{\sqrt{2} \cdot R_N} \cdot \frac{(1 - e^{-R_N \cdot \pi})}{(1 + e^{-R_N \cdot \pi})} \right) + \phi_{Z1}. \quad (2.23)$$

El supraíndice (B) en (2.22) y (2.23) denota el modelo B de la lámpara de descarga.

Así, para evaluar el impacto de las tensiones armónicas en el comportamiento de la lámpara de descarga, se han realizado simulaciones con el modelo A aplicando el método de Monte Carlo para diferentes valores de $v_{A,N}$ en el rango de 35 a 70% y para dos valores de R_N ($R_N = 0$ y 10%). Para cada pareja de valores de $v_{A,N}$ y R_N , la influencia del 3^{er}, 5^o, 7^o y 9^o armónicos de tensión sobre las intensidades fundamental y armónicas es estudiada

variando de forma aleatoria sus valores eficaces y ángulos de fase (aplicando el método de Monte Carlo con $5 \cdot 10^3$ “disparos”) antes de obtener numéricamente las funciones densidad de probabilidad (fdps) tanto de los valores eficaces como de los ángulos de fase de las intensidades fundamental y armónicas, es decir, $p(I_{h,N}^{(A)})$ y $p(\phi_{lh}^{(A)})$. Estos resultados son comparados con las intensidades fundamental y armónicas obtenidas a partir del modelo B, $I_{h,N}^{(B)}$ y $\phi_{lh}^{(B)}$. En las simulaciones aplicando el método de Monte Carlo, el valor eficaz y el ángulo de fase del 3^{er}, 5^o, 7^o y 9^o armónicos de tensión son asumidos como estadísticamente independientes y, en ausencia de más información, dos fdps diferentes son consideradas para ambos tipos de variables:

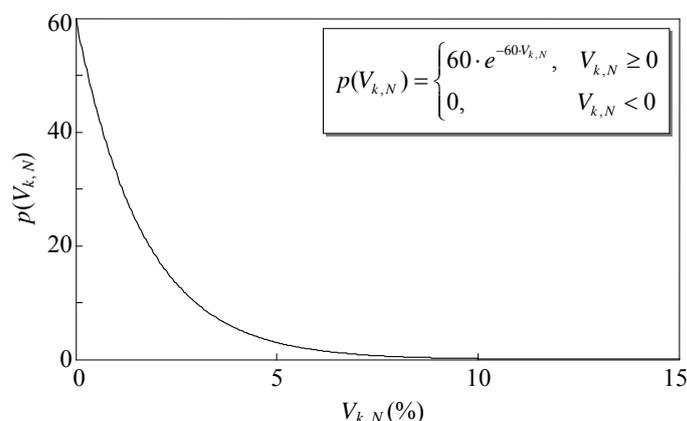


Figura 2.7. Fdp de la distribución exponencial de $V_{k,N}$ ($k = 3, 5, 7$ y 9), es decir, $V_{k,N} \sim Exponencial(60)$.

- Según la Figura 2.7, se considera una distribución exponencial con parámetro asignado $\lambda = 60$ para los valores eficaces de las tensiones armónicas, es decir $V_{k,N} \sim Exponencial(60)$ para $k = 3, 5, 7$ y 9 . Se observa que esta distribución se extiende aproximadamente desde $V_{k,N} = 0$ hasta 10%.
- Se considera una distribución uniforme en el rango que va de -180° a 180° para los ángulos de fase de las tensiones armónicas, es decir, $\theta_{vk} \sim U(-180^\circ, 180^\circ)$ para $k = 3, 5, 7$ y 9 .

Así, como ejemplo del estudio, la Figura 2.8 (columna izquierda) muestra las fdps del valor eficaz y del ángulo de fase del 1^{er} y 5^o armónicos de intensidad obtenidos a partir del

modelo A en las simulaciones aplicando el método de Monte Carlo para $v_{A,N} = 50\%$ y para $R_N = 0$ y 10% . La media de estas intensidades armónicas, $E(h^2 \cdot I_{h,N}^{(A)})$ y $E(\phi_{1h}^{(A)})$, y las intensidades armónicas obtenidas del modelo B, $h^2 \cdot I_{h,N}^{(B)}$ y $\phi_{1h}^{(B)}$, también son etiquetadas en la Figura 2.8 (columna izquierda) a modo de comparativa. Debe observarse que, aparte de coincidir aproximadamente ambos conjuntos de intensidades, las fdps de $h^2 \cdot I_{h,N}^{(A)}$ y $\phi_{1h}^{(A)}$ tienen una dispersión pequeña alrededor de su media. Resultados similares se obtienen para los otros valores de $v_{A,N}$ y R_N . Así, la Figura 2.8 (columna derecha) muestra las intensidades fundamental y armónicas obtenidas a partir del modelo B (líneas

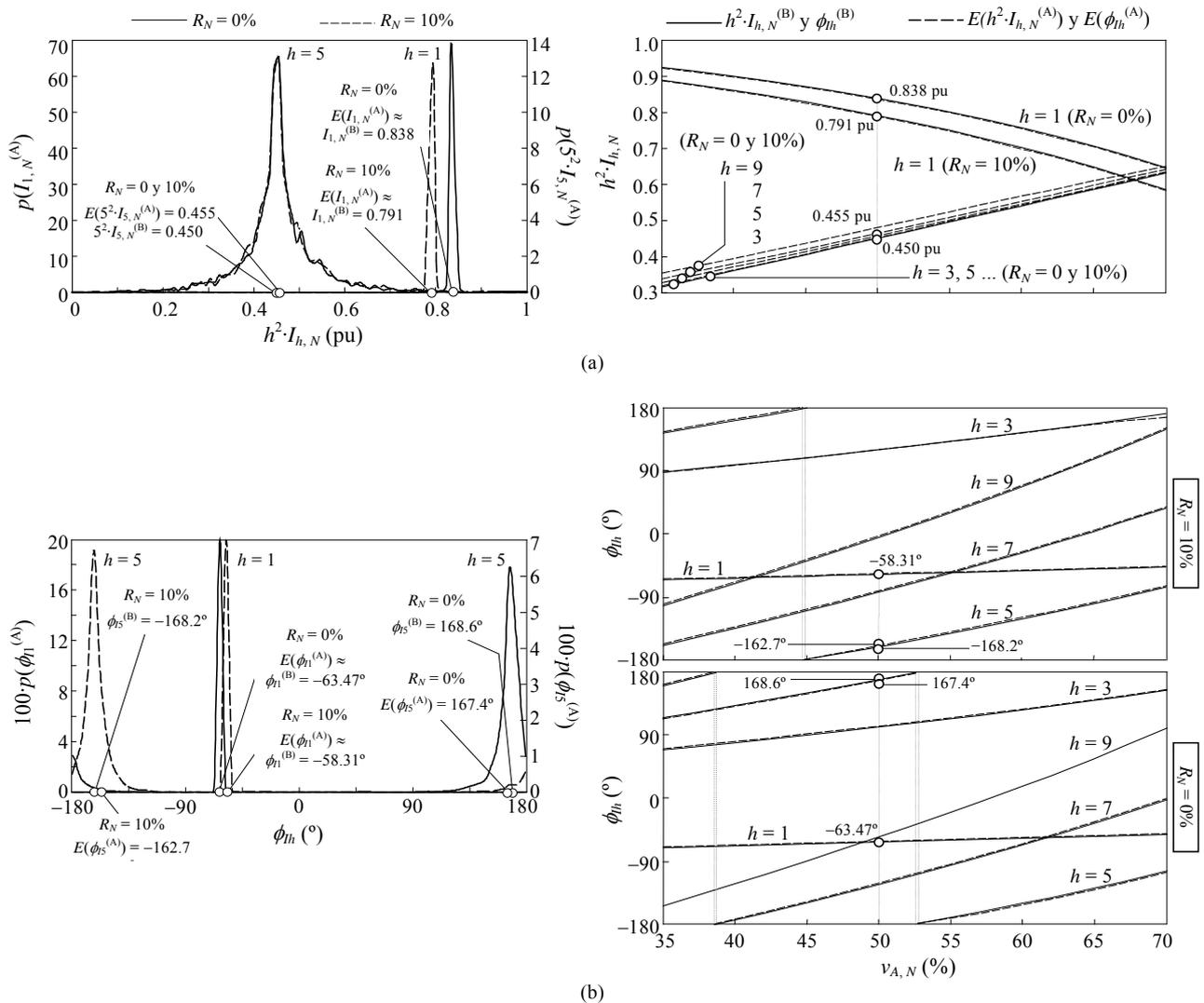


Figura 2.8. Fdps del 1^{er} y 5^o armónicos de intensidad (modelo A, $v_{A,N} = 50\%$, $R_N = 0$ y 10%) (columna izquierda) e influencia de la distorsión armónica de la tensión sobre las intensidades fundamental y armónicas consumidas por la lámpara de descarga (columna derecha): a) Valores eficaces normalizados. b) Ángulos de fase.

continuas) y los valores medios de las intensidades fundamental y armónicas obtenidas del modelo A en las simulaciones aplicando el método de Monte Carlo (líneas discontinuas) para todo el rango de $v_{A,N}$ y para $R_N = 0$ y 10%. Los resultados obtenidos en el ejemplo de la Figura 2.8 (columna izquierda) también son etiquetados en la Figura 2.8 (columna derecha). Puede observarse que en general se obtienen resultados similares a partir de ambos modelos. Únicamente los valores eficaces de las intensidades armónicas están afectados ligeramente por las tensiones armónicas. Por tanto, la influencia de las tensiones armónicas sobre las intensidades fundamental y armónicas consumidas por las lámparas de descarga es lo bastante pequeña como para considerar el modelo B una aproximación correcta del modelo A, es decir, para no considerar la interacción armónica en el modelo de dicha carga.

3. Caracterización experimental de las cargas no lineales

En general, la caracterización del comportamiento de las cargas no lineales pretende predecir las intensidades armónicas, en módulo y ángulo, que dichas cargas inyectan en el sistema. Con este fin, la mayoría de los estudios existentes ofrecen expresiones analíticas o gráficos basados en simulaciones, [5-22, 40-42], pero desafortunadamente estos procedimientos no son validados experimentalmente o la validación se realiza con un número de ensayos muy reducido, [8, 9, 22-29].

Frente a esto, el objetivo desarrollado en este capítulo es aprovechar las ventajas que ofrecen los invariantes para caracterizar y estudiar experimentalmente las intensidades fundamental y armónicas (módulo y ángulo) que consumen las cargas no lineales consideradas en esta tesis. En concreto, el trabajo experimental realizado se ha desarrollado siguiendo dos caminos diferentes:

- Los rectificadores monofásico y trifásico con filtro capacitivo, cuyos modelos analíticos son complejos, se han caracterizado experimentalmente a partir de la obtención mediante ensayos en el laboratorio de una base de datos de sus

intensidades fundamental y armónicas normalizadas, $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$ en el caso del rectificador monofásico y $\underline{I}_{ah,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$ (de la fase a) en el caso del rectificador trifásico. Esta base de datos permite calcular de forma sencilla (2.9) las intensidades fundamental y armónicas consumidas por cualquiera de las dos cargas no lineales anteriores. El trabajo desarrollado ha dado lugar, por un lado, a las publicaciones [47] y [48] que forman parte del compendio de artículos constituyentes de esta tesis, por lo que se presentarán brevemente en los siguientes apartados, y por otro lado, a la publicación [55] que no pertenece a dicho compendio, por lo que será presentada más extensamente.

- El rectificador trifásico de 6 pulsos y la lámpara de descarga, cuyos modelos analíticos utilizados, (2.10) y (2.12) respectivamente, son lo suficientemente simples para poder determinar las intensidades fundamental y armónicas de forma sencilla (2.9) y sin necesidad de recurrir a una base de datos experimental, se han caracterizado a partir de la validación de dichos modelos mediante ensayos en el laboratorio. Los resultados obtenidos han sido publicados en [56] y [54] que no pertenecen al compendio de artículos integrantes de esta tesis, por lo que se presentarán de forma más extensa en los siguientes apartados.



Figura 3.1. Equipos de medida: a) Ensayos en el laboratorio. b) Ensayos en instalaciones domésticas.

Para la realización del estudio experimental descrito en el presente capítulo se han empleado los siguientes equipos de medida:

- Ensayos en el laboratorio (ver Figura 3.1(a)): La tensión de alimentación de las cargas se genera con una fuente de alimentación AC ELGAR Smartwave Switching Amplifier de 4.5 kVA (LG) y las medidas experimentales de las tensiones e intensidades son realizadas con un analizador de calidad FLUKE 43B (FK) y un osciloscopio digital YOKOGAWA DL 708 E (YK). Así, las intensidades consumidas por las cargas son adquiridas por el osciloscopio digital y transferidas a un ordenador portátil (LC) con el cual son analizadas para obtener su espectro armónico utilizando la transformada discreta de Fourier.
- Ensayos en instalaciones domésticas (ver Figura 3.1(b)): La medición y registro de las variables eléctricas que interesa estudiar se realiza mediante un analizador de redes AR5-L de CIRCUTOR.

3.1 Rectificador monofásico con filtro capacitivo

En [47] se ha procedido a la caracterización experimental del rectificador monofásico con filtro capacitivo a partir de la obtención mediante ensayos en el laboratorio de una base de datos de sus intensidades fundamental y armónicas normalizadas, $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$. La aplicabilidad de dicha base de datos ha sido estudiada experimentalmente a partir de tres ensayos en el laboratorio, comparando los resultados hallados a partir de la base de datos con los obtenidos no sólo a través de mediciones efectuadas en dicho laboratorio sino también mediante simulaciones con PSpice.

3.1.1 Caracterización experimental

A partir de los invariantes definidos para el rectificador en el capítulo anterior ($x_{L,N} = X_L/R_D$ y $x_{C,N} = X_C/R_D$), se ha obtenido una base de datos de sus intensidades fundamental y armónicas normalizadas.

Para ello, el circuito equivalente del rectificador, Figura 2.1(a), fue construido en el laboratorio y se realizaron los ensayos experimentales correspondientes sobre él. En los ensayos, el rectificador fue alimentado por una tensión sinusoidal de ángulo de fase nulo y,

a partir del rango establecido en el capítulo anterior para los invariantes, se consideraron 5 valores de $x_{C,N}(\%)$ (0.5, 1.5, 2.5, 3.5 y 4.5) y treinta valores de $x_{L,N}(\%)$ (desde 0.05 hasta 10).

En la Figura 3 de [47] se muestra, en función de $x_{L,N}(\%)$ y para los cinco valores de $x_{C,N}(\%)$, el valor eficaz y el ángulo de fase de las intensidades fundamental y armónicas normalizadas obtenidas de las medidas del laboratorio, $I_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$. Los ángulos de las intensidades fundamental y armónicas están referidos al ángulo de fase de la tensión de alimentación que tal como se ha mencionado anteriormente fue fijado a cero en los ensayos.

A partir de la Figura 3 de [47], se puede observar:

- Tal como se comentó en el análisis de la Figura 2 de [46], cuanto mayor es el invariante $x_{L,N}$, menores son las intensidades armónicas, ya que el pulso de la intensidad consumida por el rectificador se ensancha y aplana más, [7, 9].
- El invariante $x_{C,N}$ tiene menos influencia en las intensidades fundamental y armónicas que el invariante $x_{L,N}$. Esta pequeña influencia del invariante $x_{C,N}$ puede despreciarse en el estudio del valor eficaz de las intensidades pero debe ser considerada en el estudio del ángulo de fase.

A partir de las medidas experimentales mostradas en la Figura 3 de [47], se obtuvo la base de datos de las intensidades fundamental y armónicas normalizadas, Tablas 1 a 6 de la Sección 3 de [47]. A tenor de los comentarios anteriores, para la obtención de esta base de datos se consideró que el invariante $x_{C,N}$ sólo influye en la fase de las intensidades. Los ángulos de las intensidades fundamental y armónicas de dichas tablas están referidos al ángulo de fase de la tensión de alimentación, que en los ensayos se fijó a cero.

Esta base de datos permite calcular las intensidades fundamental y armónicas consumidas por cualquier rectificador monofásico con filtro capacitivo alimentado por una tensión genérica $v(\theta) = \sqrt{2}V\cos(\theta + \theta_0)$, es decir, caracteriza experimentalmente el

comportamiento del rectificador. Para ello y según lo presentado en el capítulo anterior, se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- Se calculan los invariantes del rectificador a partir de sus parámetros, $x_{L,N} = X_L/R_D$ y $x_{C,N} = X_C/R_D$.
- A partir del valor calculado de los invariantes, se obtienen por interpolación las intensidades fundamental y armónicas normalizadas de la base de datos, $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$.
- Considerando las intensidades normalizadas obtenidas de la base de datos, $\underline{I}_{h,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$, el ángulo de fase θ_v de la tensión de alimentación y la intensidad de referencia del rectificador, $I_R = V/R_D$, se calculan las intensidades fundamental y armónicas consumidas por la carga con la expresión (2.9).

3.1.2 Aplicabilidad de la base de datos obtenida

Para comprobar la aplicabilidad de la base de datos, se han realizado en [47] tres ensayos en el laboratorio y se han comparado las intensidades fundamental y armónicas obtenidas tanto a través de mediciones efectuadas en dicho laboratorio, $\underline{I}_{h,M} = I_{h,M} \angle \phi_{h,M}$, como mediante simulaciones con PSpice, $\underline{I}_{h,P} = I_{h,P} \angle \phi_{h,P}$, con las halladas a partir de la base de datos, $\underline{I}_{h,D} = I_{h,D} \angle \phi_{h,D}$. La comparación se realiza a partir del cálculo del error relativo entre ellas,

$$\varepsilon_{ih}(\%) = 100 \left| \frac{I_{h,D} - I_{h,T}}{I_{h,D}} \right| ; \quad \varepsilon_{\phi h}(\%) = 100 \left| \frac{\phi_{h,D} - \phi_{h,T}}{\phi_{h,D}} \right| \quad (T = M, P). \quad (3.1)$$

En el primer ensayo se estudia un rectificador, analizándose la influencia de la tensión de alimentación en las intensidades fundamental y armónicas consumidas.

En el segundo ensayo se estudian dos rectificadores que comparten un mismo nudo, determinándose las intensidades armónicas totales inyectadas en dicho nudo.

Y en el tercer ensayo se estudian tres rectificadores que comparten un mismo sistema de alimentación trifásico con neutro, hallándose la intensidad que pasa por el neutro.

Tal como se puede observar en [47], los errores relativos obtenidos en los tres ensayos permiten verificar la aplicabilidad de la base de datos.

Por otro lado, en [55] también se ha validado la aplicabilidad de la base de datos utilizándola para estimar los parámetros de las fuentes de alimentación de un ordenador personal (PC) y de una televisión (TV), asimilables ambas a rectificadores monofásicos con filtro capacitivo. Para ello se realizaron dos ensayos consistentes en la medición de las intensidades consumidas por cada uno de los dos dispositivos y, a partir de las intensidades fundamental y armónicas medidas, $I_{h,M} = I_{h,M} \angle \phi_{h,M}$, se estimaron los parámetros X_L , X_C , y R_D de sus respectivos rectificadores. La estimación se realizó resolviendo el problema de optimización

$$\min_{\mathbf{x}} (S(\mathbf{x})) = \min_{\mathbf{x}} (\mathbf{s}^T(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{x})) = \min_{\mathbf{x}} \left(\sum_{i=1}^3 f_i^2(\mathbf{x}) \right), \quad (3.2)$$

donde $\mathbf{x} = (X_L, X_C, R_D)$ y $\mathbf{s} = (f_1, f_2, f_3)^T$, siendo

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) &= \frac{(I_{1,M} - I_{1,D})}{I_{1,M}}, \\ f_2(\mathbf{x}) &= \frac{(\phi_{1,M} - \phi_{1,D})}{\phi_{1,M}}, \\ f_3(\mathbf{x}) &= \frac{(\phi_{3,M} - \phi_{3,D})}{\phi_{3,M}}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

y

$$\begin{aligned} I_{1,D} &= (V/R_D) \cdot I_{1,N} = (V/R_D) \cdot g_{11}(x_{L,N}) = (V/R_D) \cdot g_{11}(X_L/R_D), \\ \phi_{h,D} &= g_{\phi h}(x_{L,N}, x_{C,N}) = g_{\phi h}(X_L/R_D, X_C/R_D) \quad (h=1,3). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Como datos del problema se tienen $V \approx V_1$ (valor eficaz de la tensión suministrada), $I_{1,M}$ y $\phi_{h,M}$ ($h=1,3$), y como incógnitas, X_L , X_C y R_D . Debe observarse que podrían haberse

escogido otras ecuaciones en (3.3), pero las propuestas han proporcionado resultados aceptables.

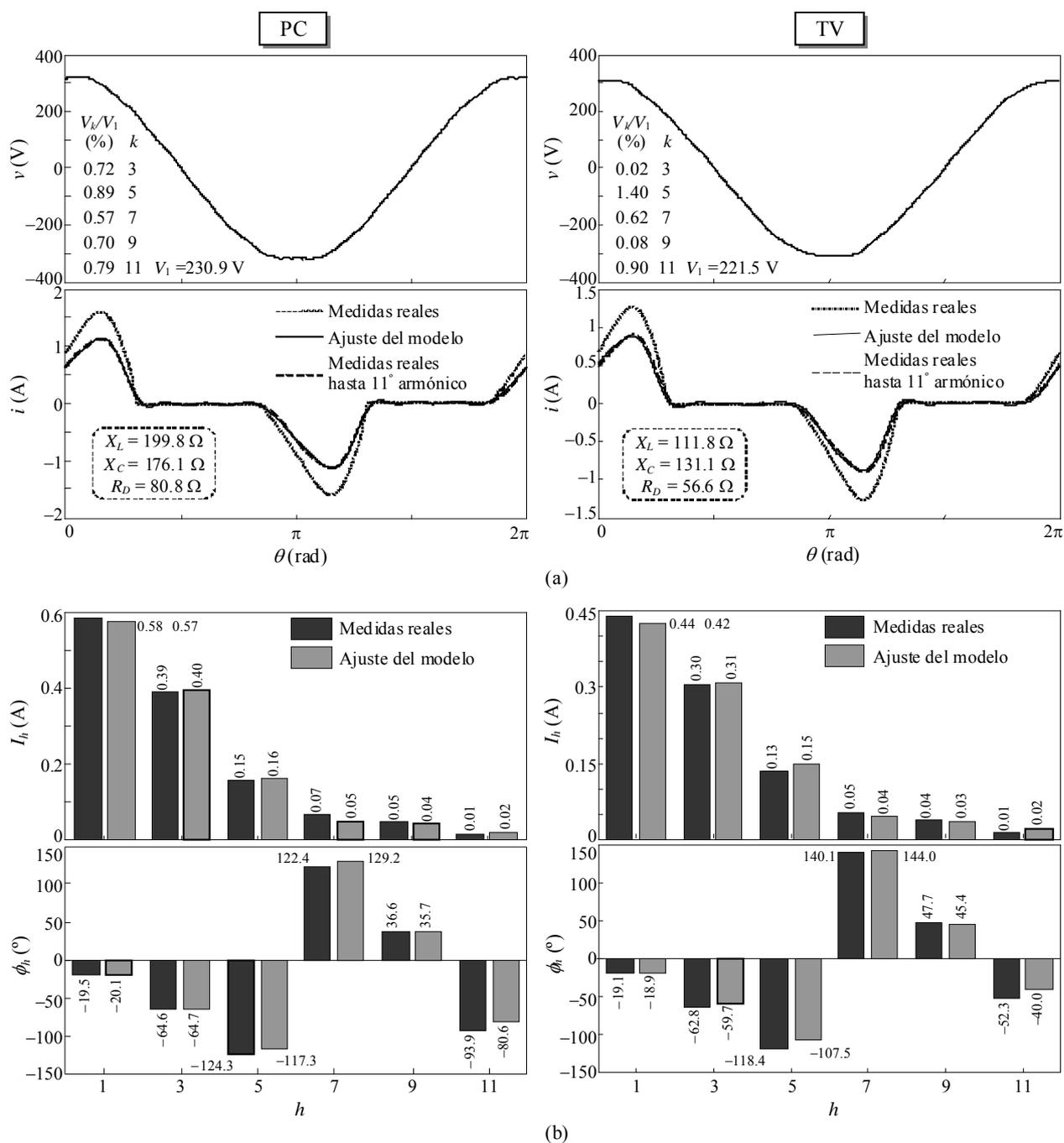


Figura 3.2. Ensayos sobre el ordenador personal (columna izquierda) y la televisión (columna derecha): a) Formas de onda de la tensión de alimentación y de la intensidad consumida. b) Espectro armónico de la intensidad consumida.

En la Figura 3.2 se muestran para los dos dispositivos (PC y TV) las formas de onda medidas tanto de la tensión de alimentación como de la intensidad consumida, v e i , así como el espectro armónico asociado a dicha intensidad. También en dicha figura se especifican los valores estimados para los parámetros de sus respectivos rectificadores. Además, la forma de onda de la intensidad estimada con el modelo y su espectro armónico asociado se ilustra en la misma figura a modo de comparativa tanto para el PC como para la TV. Dado que la base de datos únicamente proporciona hasta el undécimo armónico de intensidad, la forma de onda estimada de la intensidad y su espectro armónico obtenidos a partir de dicha base de datos se comparan con las mediciones hasta el undécimo armónico. Se puede observar que, a pesar del contenido armónico de la tensión de alimentación, lo estimado se ajusta aceptablemente a lo medido. Además, se pone de manifiesto la aplicabilidad de la base de datos cuando se tienen niveles reducidos de distorsión armónica en la tensión de alimentación.

3.2 Rectificador trifásico con filtro capacitivo

En [48] se ha procedido a la caracterización experimental del rectificador trifásico con filtro capacitivo a partir de la obtención mediante ensayos en el laboratorio de una base de datos de sus intensidades fundamental y armónicas normalizadas de la fase a , $I_{ah,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$. La aplicabilidad de dicha base de datos ha sido estudiada experimentalmente a partir de dos ensayos en el laboratorio, comparando los resultados hallados a partir de la base de datos con los obtenidos no sólo a través de mediciones efectuadas en dicho laboratorio sino también mediante simulaciones con PSpice.

3.2.1 Caracterización experimental

A partir de los invariantes definidos para el rectificador en el capítulo anterior ($x_{L,N} = X_L/R_D$ y $x_{C,N} = X_C/R_D$), se ha obtenido una base de datos de sus intensidades fundamental y armónicas normalizadas de la fase a .

Para ello, el circuito equivalente del rectificador, Figura 2.2(a), fue construido en el laboratorio y se realizaron los ensayos experimentales correspondientes sobre él. En los ensayos, el rectificador fue alimentado con tensiones sinusoidales, simétricas y equilibradas de ángulo de fase nulo para la tensión de la fase a [(2.2) con $\theta_{va} = 0$] y, a partir del rango establecido en el capítulo anterior para los invariantes, se consideraron 5 valores de $x_{C,N}$ (%) (20, 15, 10, 5 y 2) y treinta valores de $x_{L,N}$ (%) (desde 0.05 hasta 10).

En la Figura 3 de [48] se muestra, en función de $x_{L,N}$ (%) y para los cinco valores de $x_{C,N}$ (%), el valor eficaz y el ángulo de fase de las intensidades fundamental y armónicas normalizadas de la fase a obtenidas de las medidas del laboratorio, $I_{ah,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$. Los ángulos de las intensidades fundamental y armónicas están referidos al ángulo de fase de la tensión de alimentación de la fase a que tal como se ha mencionado anteriormente fue fijado a cero en los ensayos.

A partir de la Figura 3 de [48], se puede observar:

- Tal como se comentó en el análisis de la Figura 2 de [46], las intensidades fundamental y armónicas están básicamente caracterizadas por el invariante $x_{L,N}$.
- Cuanto mayor es el invariante $x_{L,N}$, menores son los valores eficaces de las intensidades armónicas, especialmente en DCM (Modo de Conducción Discontinua), es decir, para los valores de $x_{L,N}$ más bajos. Este comportamiento se corresponde con el observado a partir de la Figura 2 de [46], donde los valores más elevados de dicho invariante corresponden a los pulsos de la intensidad consumida por el rectificador más anchos.
- El ángulo de fase asociado a la intensidad fundamental permanece próximo a cero independientemente del valor de $x_{L,N}$, mientras que cuanto más grande es el orden del armónico, mayor es la influencia del invariante $x_{L,N}$ sobre los ángulos de fase de las intensidades armónicas.
- La influencia del invariante $x_{C,N}$ puede no ser considerada en el estudio del valor eficaz de la intensidad fundamental. Dicha influencia podría no ser considerada en el

estudio de las intensidades fundamental y armónicas en CCM (Modo de Conducción Continua).

A partir de las medidas experimentales mostradas en la Figura 3 de [48], se obtuvo la base de datos de las intensidades fundamental y armónicas normalizadas de la fase a , Tablas 1 a 3 de la Sección 3 de [48]. A tenor de los comentarios anteriores, para la obtención de esta base de datos se consideró que el invariante $x_{C,N}$ sólo no influye en el valor eficaz de la intensidad fundamental. Los ángulos de las intensidades fundamental y armónicas de dichas tablas están referidos al ángulo de fase de la tensión de alimentación de la fase a , que en los ensayos se fijó a cero.

Esta base de datos permite calcular las intensidades fundamental y armónicas de la fase a consumidas por cualquier rectificador trifásico con filtro capacitivo alimentado por una tensión genérica $v_a(\theta) = \sqrt{2}V\cos(\theta + \theta_{va})$, es decir, caracteriza experimentalmente el comportamiento del rectificador. Para ello y según lo presentado en el capítulo anterior, se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- Se calculan los invariantes del rectificador a partir de sus parámetros, $x_{L,N} = X_L/R_D$ y $x_{C,N} = X_C/R_D$.
- A partir del valor calculado de los invariantes, se obtienen por interpolación las intensidades fundamental y armónicas normalizadas de la fase a de la base de datos, $\underline{I}_{ah,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$.
- Considerando las intensidades normalizadas obtenidas de la base de datos, $\underline{I}_{ah,N} = I_{h,N} \angle \phi_h$, el ángulo de fase θ_{va} de la tensión de alimentación y la intensidad de referencia del rectificador, $I_R = V/R_D$, se calculan las intensidades fundamental y armónicas de la fase a consumidas por la carga con la expresión (2.9).
- Debido a que el rectificador trifásico se considera alimentado con tensiones simétricas y equilibradas, las intensidades normalizadas de las otras fases verifican $\underline{I}_{bh,N} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{ah,N}$ y $\underline{I}_{ch,N} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{ah,N}$ ($h = 1, 7, \dots$) y $\underline{I}_{bh,N} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{ah,N}$ y $\underline{I}_{ch,N} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{ah,N}$ ($h = 5, 11, \dots$), donde $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$.

3.2.2 Aplicabilidad de la base de datos obtenida

Para comprobar la aplicabilidad de la base de datos, se han realizado en [48] dos ensayos en el laboratorio y se han comparado las intensidades fundamental y armónicas de la fase a obtenidas tanto a través de mediciones efectuadas en dicho laboratorio, $\underline{I}_{ah,M} = I_{h,M} \angle \phi_{h,M}$, como mediante simulaciones con PSpice, $\underline{I}_{ah,P} = I_{h,P} \angle \phi_{h,P}$, con las halladas a partir de la base de datos, $\underline{I}_{ah,D} = I_{h,D} \angle \phi_{h,D}$. La comparación se realiza a partir del cálculo del error relativo entre ellas,

$$\varepsilon_{ih}(\%) = 100 \left| \frac{I_{h,D} - I_{h,T}}{I_{h,D}} \right| ; \quad \varepsilon_{\phi h}(\%) = 100 \left| \frac{\phi_{h,D} - \phi_{h,T}}{\phi_{h,D}} \right| \quad (T = M, P). \quad (3.5)$$

En el primer ensayo se estudia un rectificador, analizándose la influencia de la tensión de alimentación en las intensidades fundamental y armónicas consumidas tanto en CCM como en DCM.

En el segundo ensayo se estudian dos rectificadores que comparten un mismo nudo, determinándose las intensidades armónicas totales inyectadas en dicho nudo.

Tal como se puede observar en [48], los errores relativos obtenidos en los dos ensayos permiten verificar la aplicabilidad de la base de datos.

3.3 Rectificador trifásico de 6 pulsos

El estudio determinístico del rectificador trifásico de 6 pulsos iniciado en [46] y profundizado en [51], se ha completado en [56] con la validación experimental de su modelo normalizado, (2.10), el cual permite determinar de forma sencilla (2.9) las intensidades fundamental y armónicas que consume el rectificador en función de los valores de sus invariantes.

Para ello se realizaron tres ensayos en el laboratorio consistentes en la medición de las intensidades consumidas por un rectificador trifásico de 6 pulsos (ver en Figura 2.3(a) su circuito equivalente) con tres juegos de parámetros distintos:

- Ensayo 1: $L = 25.7$ mH, $I_D = 0.5$ A, $P \approx 110$ W.
- Ensayo 2: $L = 2.45$ mH, $I_D = 0.5$ A, $P \approx 146$ W.
- Ensayo 3: $L = 2.45$ mH, $I_D = 0.5$ A, $P \approx 92$ W.

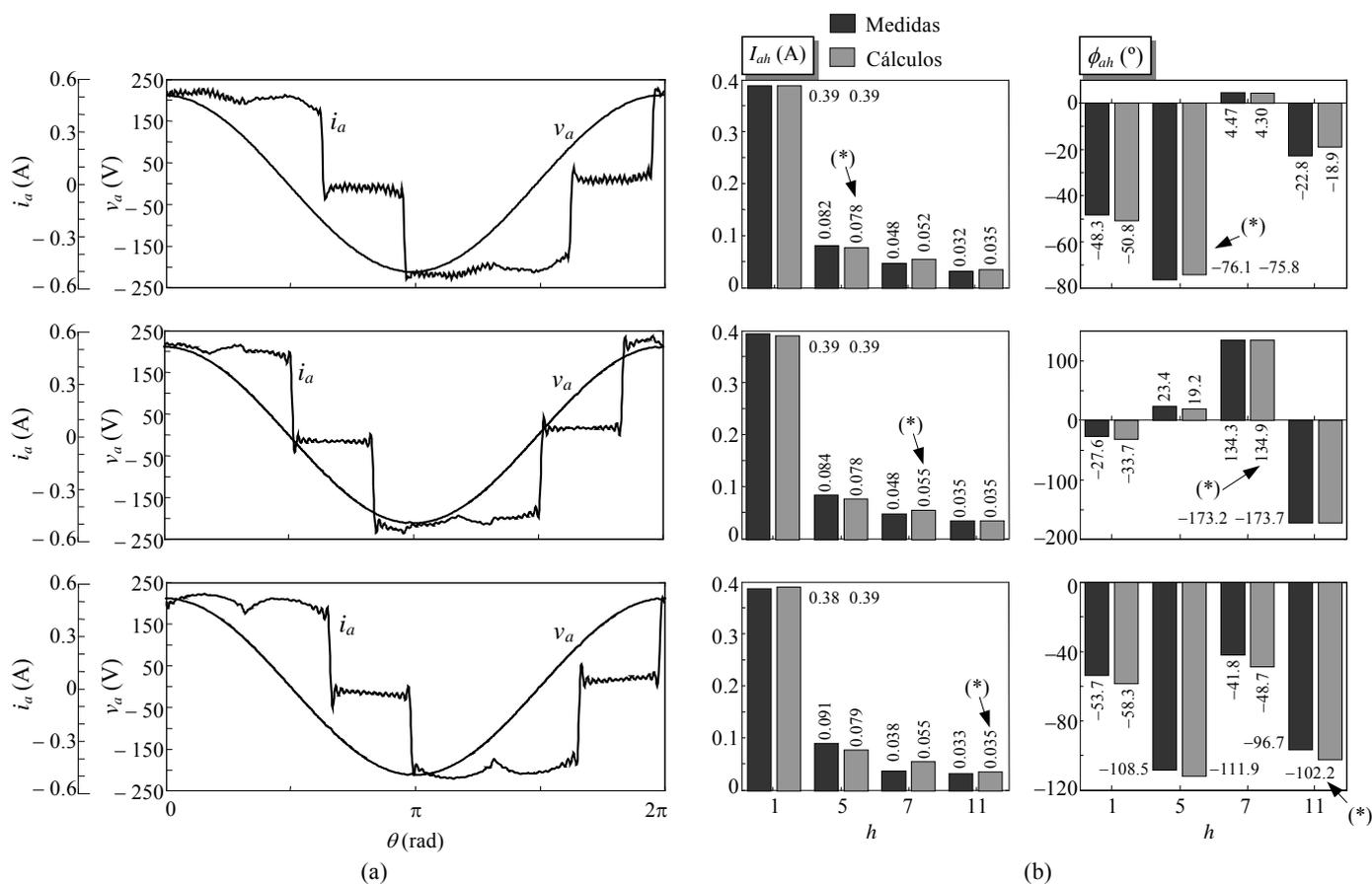


Figura 3.3. Ensayo 1 (fila superior), ensayo 2 (fila central) y ensayo 3 (fila inferior) sobre el rectificador trifásico de 6 pulsos: a) Formas de onda de la tensión de alimentación y de la intensidad consumida de la fase a . b) Espectro armónico de la intensidad consumida de la fase a .

En los tres ensayos, el rectificador trifásico fue alimentado con tensiones sinusoidales, simétricas y equilibradas de valor eficaz $V = 150$ V y de ángulo de fase nulo para la tensión de la fase a [(2.2) con $\theta_{va} = 0$]. La Figura 3.3 muestra para los tres ensayos las formas de onda medidas tanto de la tensión de alimentación como de la intensidad consumida de la

fase a , v_a e i_a , así como el espectro armónico asociado a dicha intensidad, $\underline{I}_{ah} = I_{ah} \angle \phi_{ah}$. Además, el espectro armónico de la intensidad consumida de la fase a calculado a partir de (2.10) utilizando (2.9) se ilustra en la misma figura a modo de comparativa para los tres ensayos.

A continuación, se presentan tres ejemplos numéricos (cada uno de ellos asociado a un ensayo distinto) de cómo se efectúa el cálculo de las intensidades armónicas de la fase a a partir de (2.10) empleando (2.9):

- Ensayo 1 (determinación de \underline{I}_{a5}): Como $x_{L,N} = 2.69\%$ y $p_N = 146.6\%$ (2.5), la intensidad normalizada es $\underline{I}_{a5,N} \approx 0.78/5 \angle -75.8^\circ = 0.156 \angle -75.8^\circ$ (2.10). Entonces

$$\underline{I}_{a5} = 0.5 \cdot \underline{I}_{a5,N} \approx 0.078 \angle -75.8^\circ \text{ A.} \quad (3.6)$$

- Ensayo 2 (determinación de \underline{I}_{a7}): Como $x_{L,N} = 0.26\%$ y $p_N = 195\%$ (2.5), la intensidad normalizada es $\underline{I}_{a7,N} \approx 0.78/7 \angle 134.9^\circ = 0.111 \angle 134.9^\circ$ (2.10). Entonces

$$\underline{I}_{a7} = 0.5 \cdot \underline{I}_{a7,N} \approx 0.055 \angle 134.9^\circ \text{ A.} \quad (3.7)$$

- Ensayo 3 (determinación de \underline{I}_{a11}): Como $x_{L,N} = 0.26\%$ y $p_N = 122.5\%$ (2.5), la intensidad normalizada es $\underline{I}_{a11,N} \approx 0.78/11 \angle -102.2^\circ = 0.0709 \angle -102.2^\circ$ (2.10). Entonces

$$\underline{I}_{a11} = 0.5 \cdot \underline{I}_{a11,N} \approx 0.035 \angle -102.2^\circ \text{ A.} \quad (3.8)$$

Los resultados obtenidos se han marcado con un asterisco en la Figura 3.3. Además, en dicha figura puede observarse que las diferencias entre lo medido y lo calculado son pequeñas. El tercer ensayo es el que muestra la mayor diferencia como consecuencia del rizado que presenta la intensidad del lado de continua.

3.4 Lámpara de descarga

El estudio determinístico de la lámpara de descarga iniciado en [46] y profundizado en [50], se ha completado en [54] con la validación experimental del modelo normalizado (2.22), más general que (2.12). Este modelo, al igual que (2.12), permite determinar empleando (2.9) las intensidades fundamental y armónicas que consume la lámpara en función de los valores de sus invariantes.

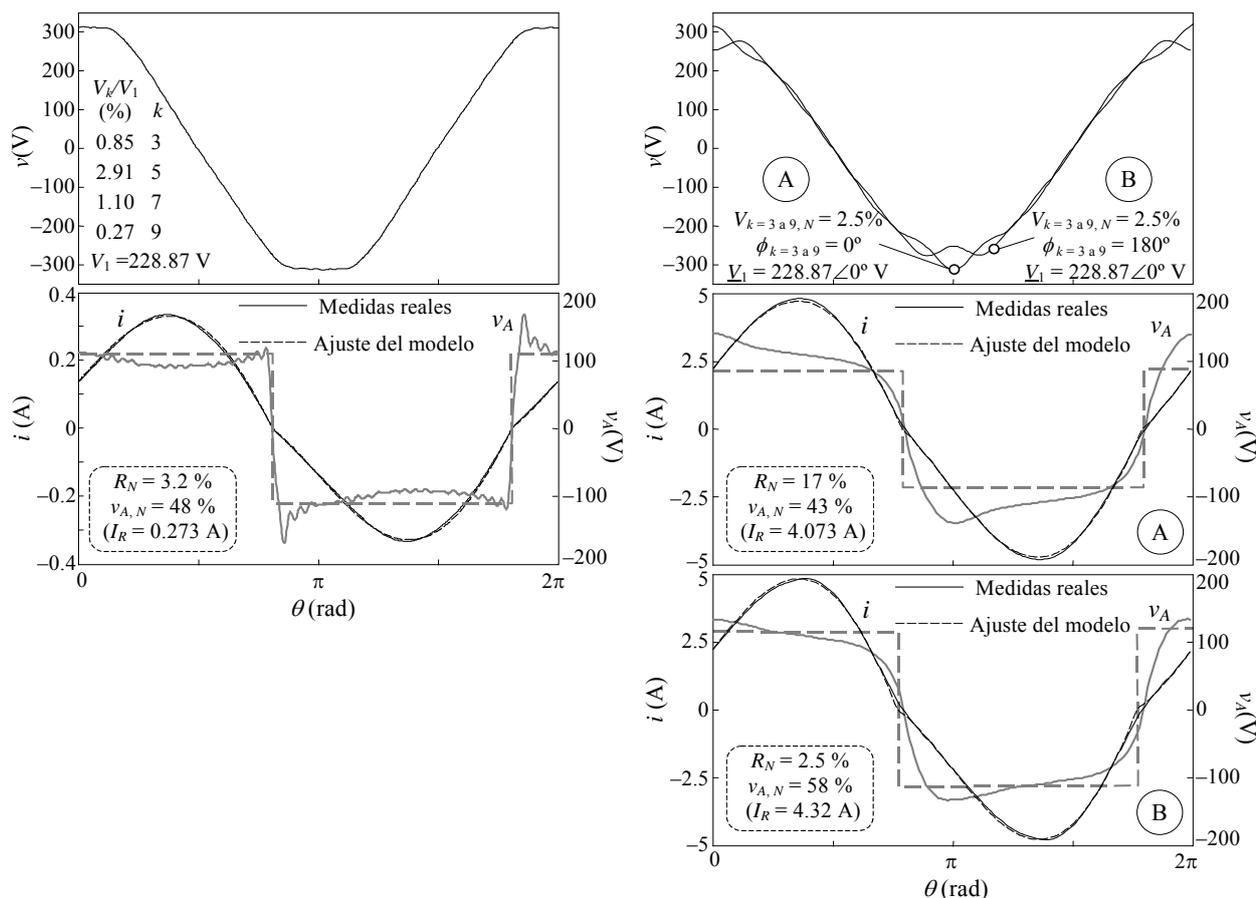


Figura 3.4. Ensayo 1 (columna izquierda) y ensayo 2 (columna derecha) sobre las correspondientes lámparas de descarga: Formas de onda de la tensiones de alimentación, de las intensidades consumidas y de las tensiones de arco.

Para su validación se realizaron dos ensayos consistentes en la medición tanto de la tensión de arco como de la intensidad consumida por dos lámparas de descarga (ver en Figura 2.4(a) su circuito equivalente al que se añadiría la resistencia R del balasto), cada una de ellas ensayada en un escenario distinto:

- Ensayo 1 (en una instalación doméstica): Lámpara fluorescente compacta SYLVANIA de 26 W (modelo Lynx-D CF-D 26 W/840) instalada en una lámpara downlight NEXIA de 230 V/50 Hz 2x26 W Serie 01 (modelo G24d-3).
- Ensayo 2 (en el laboratorio): Lámpara de halogenuro metálico SYLVANIA de 400 W (modelo HSI-T 400/4K) con un balasto magnético LOYJE (modelo 4.340-IS).

En ambos ensayos, las lámparas fueron alimentadas con las tensiones distorsionadas que se especifican a continuación:

- Ensayo 1: Tensión de la instalación doméstica distorsionada con un contenido armónico $V_{k,N} = 0.85, 2.91, 1.10$ y 0.27% con $k = 3, 5, 7$ y 9 respectivamente y siendo $V_1 = 228.87$ V ($THD = 3.26\%$).
- Ensayo 2: Cuatro tensiones distorsionadas de contenidos armónicos respectivos $\underline{V}_{k=3 a 9, N} = 2.5\angle 0^\circ, 2.5\angle 180^\circ, 5\angle 0^\circ$ o $5\angle 180^\circ$ % siendo $\underline{V}_1 = 228.87\angle 0^\circ$ V, las cuales han sido generadas con la fuente de alimentación AC ELGAR Smartwave Switching Amplifier (Figura 3.1(a)).

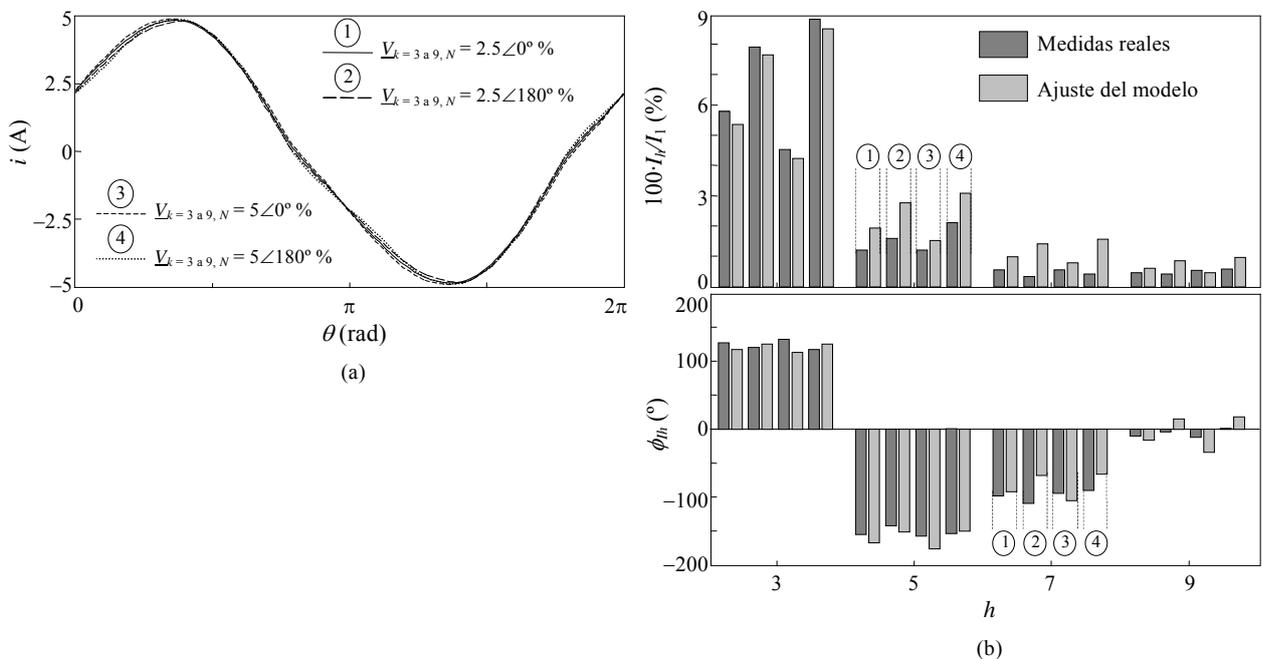


Figura 3.5. Ensayo 2 sobre la correspondiente lámpara de descarga: a) Formas de onda de las intensidades consumidas. b) Espectros armónicos de las intensidades consumidas.

La Figura 3.4 muestra para el ensayo 1 y para el ensayo 2 (en relación a este último ensayo, únicamente para las tensiones de alimentación $\underline{V}_{k=3 \text{ a } 9, N} = 2.5\angle 0^\circ$ y $2.5\angle 180^\circ$) las formas de onda medidas tanto de la tensión de alimentación como de la intensidad consumida, v e i , así como la de la tensión de arco, v_A . También en dicha figura se especifican los valores estimados para los parámetros de las correspondientes lámparas de descarga. Además, las formas de onda de la intensidad y de la tensión de arco estimadas con el modelo se ilustran en la misma figura a modo de comparativa tanto para el ensayo 1 como para el ensayo 2.

Además, respecto al ensayo 2, la Figura 3.5 muestra para las cuatro tensiones de alimentación aplicadas las respectivas formas de onda medidas de las intensidades consumidas, i , así como los espectros armónicos asociados a dichas intensidades. Además, los espectros armónicos de las intensidades consumidas calculados a partir de (2.22) utilizando (2.9) se ilustran en la misma figura a modo de comparativa para las cuatro tensiones de alimentación aplicadas.

De la Figura 3.4 puede deducirse que, a pesar del contenido armónico de la tensión de alimentación, lo estimado se ajusta aceptablemente a lo medido. En los casos que se muestran del ensayo 2, los valores obtenidos del invariante R_N son demasiado grandes ($R_N = 17\%$ para la primera tensión de alimentación aplicada) y, aunque la lámpara de descarga es la misma, los valores del invariante $v_{A, N}$ son ligeramente diferentes. Esto puede deberse a que la forma de onda medida de la tensión de arco difiere del modelo de onda cuadrada que se considera en (2.22).

Además, en la Figura 3.5 se puede observar que, a pesar de la diferencia en la distorsión armónica que presentan las cuatro tensiones de alimentación aplicadas en el ensayo 2, las cuatro formas de onda medidas de las intensidades consumidas son aproximadamente idénticas. Sin embargo, los valores eficaces de sus respectivas intensidades armónicas son ligeramente diferentes dependiendo de la tensión de alimentación aplicada, aunque esto no es cierto para los ángulos de fase.

4. Estudio de la intensidad del neutro en sistemas trifásicos con presencia de cargas no lineales monofásicas

En las instalaciones eléctricas, suele haber un gran número de cargas no lineales monofásicas que generan armónicos de intensidad por el conductor del neutro [34-36]. Si la instalación trabaja en condiciones simétricas y equilibradas, los armónicos de primer y quinto orden ($h = 1,7,\dots$ y $h = 5,11,\dots$) forman un sistema de secuencia directa e inversa respectivamente, y los armónicos de tercer orden ($h = 3,9,\dots$) forman un sistema de secuencia homopolar [3]. En esta situación, únicamente los armónicos de tercer orden circulan por el neutro y son de valor triple a los de las fases. Los desequilibrios en la instalación tales como desequilibrios de la tensión de alimentación o desequilibrios en las cargas provocan la pérdida de la simetría de secuencia directa e inversa en los armónicos de primer y quinto orden. Así, en esta situación, la suma de estos armónicos en el neutro de la instalación no es cero pudiéndose incrementar el valor eficaz de la intensidad que circula por este conductor respecto a la situación equilibrada.

El objetivo de este capítulo es estudiar analíticamente la determinación de la intensidad que circula por el neutro de las instalaciones trifásicas cuando hay conectadas cargas no lineales monofásicas en las mismas. Así, el trabajo desarrollado en [49] y presentado brevemente en este capítulo estudia el impacto de los rectificadores monofásicos con filtro capacitivo en la intensidad del neutro y la influencia de los desequilibrios en dicha intensidad. Concretamente, se estudia analíticamente la influencia de tres posibles situaciones de desequilibrio en la intensidad del neutro:

- Desequilibrio de las tensiones de alimentación.
- Distinto número de cargas no lineales por fase.
- Distinto tipo de cargas no lineales por fase.

La estructura del trabajo desarrollado en [49] es la siguiente:

- Se caracteriza el desequilibrio de las tensiones de alimentación a partir de los factores de desequilibrio.
- A partir de la caracterización de las cargas no lineales desarrollada en el Capítulo 2, se determina analíticamente la intensidad que circula por el neutro de la instalación en condiciones de desequilibrio.
- Se estudia la influencia de las tres situaciones de desequilibrio presentadas anteriormente y se realizan simulaciones con rectificadores monofásicos con filtro capacitivo para obtener resultados numéricos.
- Se validan los resultados anteriores con pruebas experimentales en el laboratorio.

4.1 Determinación de la intensidad del neutro de una instalación trifásica en condiciones de desequilibrio

Se estudia el sistema trifásico mostrado en la Figura 4.1 para analizar la obtención de las intensidades armónicas que circulan por el neutro. El estudio admite la conexión de

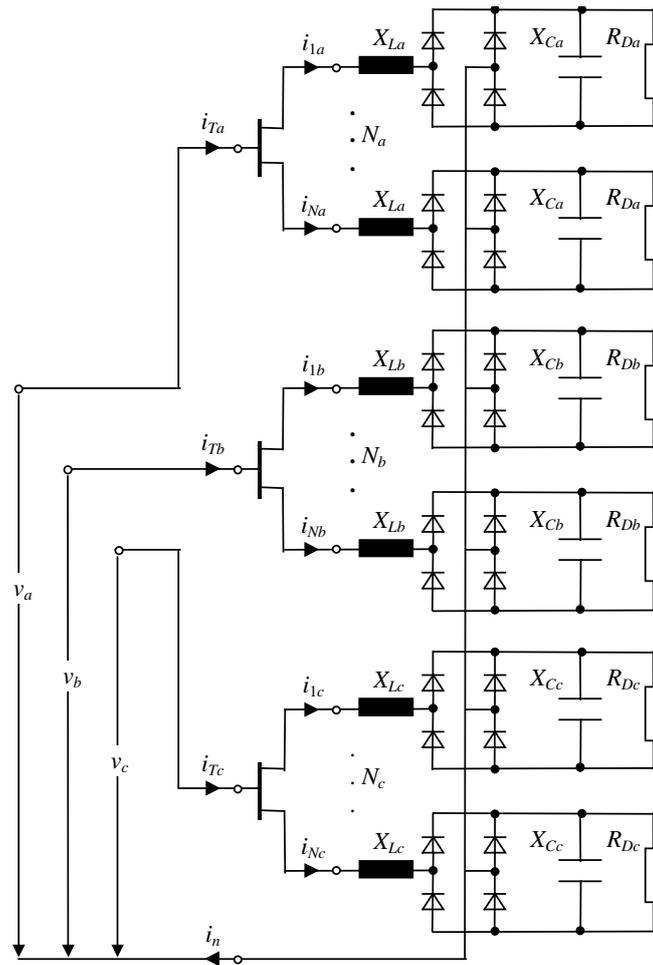


Figura 4.1. Esquema de la instalación trifásica a estudio.

distintas cargas no lineales monofásicas. En concreto, éstas van a ser rectificadores monofásicos con filtro capacitivo.

Según la Figura 4.1, la intensidad del neutro es la suma de las intensidades de las fases, $i_n = i_{Ta} + i_{Tb} + i_{Tc} = N_a i_a + N_b i_b + N_c i_c$. En esta expresión, se ha considerado que en una misma fase las cargas conectadas son de idéntica naturaleza y además tienen idéntico valor de sus parámetros característicos. Así pues, la intensidad consumida por cada una de las cargas conectadas a una misma fase es idéntica (es decir, $i_{1f} = \dots = i_{Nf} = i_f$ y $i_{Tf} = N_f \cdot i_f$ con $f = a, b, c$). Por lo tanto, en base a lo desarrollado en [49], las intensidades armónicas del conductor neutro podrán ser calculadas según

$$\underline{I}_{nh} = N_a \underline{I}_{ah} + N_b \underline{I}_{bh} + N_c \underline{I}_{ch} = \left(N_a \underline{Y}_{ah} \underline{F}_a^{(h)} + N_b \underline{Y}_{bh} \underline{F}_b^{(h)} + N_c \underline{Y}_{ch} \underline{F}_c^{(h)} \right) \underline{V}_p^{(h)}, \quad (4.1)$$

donde, a partir de los distintos parámetros que intervienen, la expresión anterior permitirá estudiar la influencia en la intensidad del neutro de los siguientes desequilibrios:

- Desequilibrio de las tensiones de alimentación a partir de los términos $\underline{F}_a^{(h)}$, $\underline{F}_b^{(h)}$ y $\underline{F}_c^{(h)}$, siendo

$$\begin{aligned} \underline{F}_f^{(h)} &= F_f e^{jh\phi_f} = F_f e^{j\phi_f} e^{j(h-1)\phi_f} = \underline{F}_f e^{j(h-1)\phi_f} \quad (h=1,3,5,\dots ; f=a,b,c), \\ \begin{bmatrix} \underline{F}_a \\ \underline{F}_b \\ \underline{F}_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_z / \underline{V}_p \\ 1 \\ \underline{V}_{ng} / \underline{V}_p \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} \quad (\underline{a} = e^{j2\pi/3}). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Se pueden considerar tensiones arbitrarias e independientes pero sinusoidales para cada fase del sistema y sus correspondientes fasores serán, $\underline{V}_a = V_a \angle \theta_a$, $\underline{V}_b = V_b \angle \theta_b$ y $\underline{V}_c = V_c \angle \theta_c$. Además, se definen los factores de desequilibrio $\underline{m}_z = \underline{V}_z / \underline{V}_p$ y $\underline{m}_{ng} = \underline{V}_{ng} / \underline{V}_p$ como las relaciones de las tensiones de secuencia homopolar (\underline{V}_z) e inversa (\underline{V}_{ng}) con respecto a las de secuencia directa (\underline{V}_p) [43-45].

- Distinto número de cargas no lineales por fase a partir de los términos N_a , N_b y N_c , siendo N_f el número de cargas no lineales conectadas a la fase f ($f = a, b, c$).
- Distinto tipo de cargas no lineales por fase a partir de los términos \underline{Y}_{ah} , \underline{Y}_{bh} y \underline{Y}_{ch} , siendo

$$\underline{Y}_{fh} = \frac{\underline{I}_{fh,N}}{Z_{fR}} \quad (h=1,3,5,\dots ; f=a,b,c), \quad (4.3)$$

donde $\underline{I}_{fh,N}$ son las intensidades armónicas normalizadas asociadas a un valor concreto de los invariantes de la carga a estudio conectada a la fase f y Z_{fR} es la impedancia de referencia para la normalización de dicha carga (para el rectificador monofásico con filtro capacitivo, $Z_{fR} = R_{Df}$). Se debe comentar que los términos \underline{Y}_{fh} presentados en esta tesis están expresados a partir de las intensidades normalizadas mientras que los términos $\underline{Y}_{rh} = \underline{I}_{rh} / V_r$ definidos en [49] están expresados a partir de las intensidades de un caso de referencia arbitrario. No obstante, se puede demostrar de forma sencilla que ambos son estrictamente iguales,

es decir, $\underline{Y}_{fh} = \underline{Y}_{rh}$. El cambio realizado en la tesis respecto al artículo es para utilizar el modelo normalizado y, por tanto, los invariantes en todas las expresiones de la tesis. Estos términos \underline{Y}_{fh} son diferentes para cada carga, ya que $\underline{I}_{fh, N}$ dependen de sus invariantes y Z_{fR} de sus parámetros (R_{Df} en el caso del rectificador monofásico). Tal como se ha comentado, en una misma fase se consideran conectadas el mismo tipo de cargas con los mismos parámetros (X_{Lf} , X_{Cf} and R_{Df} en el caso del rectificador monofásico). Así, sus intensidades consumidas son las mismas (es decir, $i_{1f} = \dots = i_{Nf} = i_f$ y $i_{Tf} = N_f \cdot i_f$ con $f = a, b, c$). Sin embargo, entre fases pueden haber cargas diferentes o de diferentes parámetros, por lo que las intensidades consumidas por fase (i_{Ta} , i_{Tb} e i_{Tc}) pueden ser distintas.

A partir de (4.1) se pueden determinar:

- Los valores eficaces de las intensidades de las fases, I_a , I_b e I_c y del neutro, I_n ,
- la relación entre el valor eficaz de las intensidades armónicas del neutro, I_{nh} , y el valor medio de los tres valores eficaces de las intensidades armónicas de las fases, $(I_{ah} + I_{bh} + I_{ch})/3$, es decir, ri_{nh} ,
- y la relación entre el valor eficaz de la intensidad del neutro, I_n , y el valor medio de los tres valores eficaces de las intensidades de las fases, $(I_a + I_b + I_c)/3$, es decir, ri_n .

$$\begin{aligned}
 I_f &= \sqrt{\sum_{h \geq 1} I_{fh}^2} \quad (f = a, b, c), & I_n &= \sqrt{\sum_{h \geq 1} I_{nh}^2}, \\
 ri_{nh} &= \frac{I_{nh}}{(I_{ah} + I_{bh} + I_{ch})/3} \quad (h > 1), & & \\
 ri_n &= \frac{I_n}{(I_a + I_b + I_c)/3}. & &
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

En [49] se estudia con detalle a partir de (4.1) y (4.4) la influencia de los tres desequilibrios de forma independiente sobre la intensidad del conductor neutro.

4.1.1 Influencia del desequilibrio de las tensiones de alimentación

En este punto sólo se considera el desequilibrio de la tensión de alimentación ($\underline{F}_a^{(h)}$, $\underline{F}_b^{(h)}$ y $\underline{F}_c^{(h)}$). Por tanto, existen el mismo número de cargas no lineales por fase ($N_a=N_b=N_c=N$) y todas las cargas conectadas al sistema trifásico tienen los mismos parámetros ($\underline{Y}_{ah} = \underline{Y}_{bh} = \underline{Y}_{ch} = \underline{Y}_h = \underline{I}_{h,N}/Z_R$).

Del estudio realizado en [49], donde se particularizaron las expresiones (4.1) y (4.4) a las condiciones anteriores, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En comparación con la situación equilibrada, $\underline{m}_z = 0$ y $\underline{m}_{ng} = 0$, el desequilibrio de las tensiones de alimentación hace aumentar los armónicos de primer y quinto orden de la intensidad del neutro y hace disminuir los armónicos de tercer orden. Esto es debido a que el desequilibrio provoca la pérdida de la simetría de secuencia directa e inversa en los armónicos de primer y quinto orden y la simetría de secuencia homopolar en los armónicos de tercer orden. Por lo tanto, la suma de los armónicos de primer y quinto orden de las intensidades de las fases no es nula y la suma de los armónicos de tercer orden es menor que la suma de sus amplitudes.
- La influencia en los armónicos de la intensidad del neutro comentada anteriormente es menor para la onda fundamental y los armónicos de tercer orden.
- A pesar de la influencia en los armónicos de la intensidad del neutro, el desequilibrio de la tensión de la alimentación influye poco en el valor eficaz de la intensidad del neutro, I_n , es decir, en el factor ri_n (4.4).

4.1.2 Influencia del distinto número de cargas no lineales por fase

En este punto sólo se considera un número diferente de cargas no lineales por fase (N_a, N_b, N_c). Por tanto, las tensiones de alimentación son equilibradas ($\underline{m}_z = \underline{m}_{ng} = 0$, es decir, $\underline{F}_a^{(h)} = 1$, $\underline{F}_b^{(h)} = e^{-jh \cdot 2\pi/3}$ y $\underline{F}_c^{(h)} = e^{jh \cdot 2\pi/3}$) y todas las cargas conectadas al sistema trifásico tienen los mismos parámetros ($\underline{Y}_{ah} = \underline{Y}_{bh} = \underline{Y}_{ch} = \underline{Y}_h = \underline{I}_{h,N}/Z_R$).

Del estudio realizado en [49], donde se particularizaron las expresiones (4.1) y (4.4) a las condiciones anteriores, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Para un número diferente de cargas por fase, los armónicos de primer y quinto orden de la intensidad del neutro aumentan a medida que crece el desequilibrio de la carga (es decir, la diferencia entre el número de cargas por fase).
- Los armónicos de tercer orden de la intensidad del neutro no dependen del número de cargas por fase y son siempre el triple del valor medio de la intensidad armónica correspondiente que circula por las fases.
- El número de cargas por fase tiene una gran influencia en el valor eficaz de la intensidad del neutro, I_n , es decir, en el factor ri_n (4.4). Este valor eficaz aumenta a medida que crece el desequilibrio de la carga.

4.1.3 Influencia del distinto tipo de cargas no lineales por fase

En este punto sólo se considera un conjunto de cargas no lineales con distinto valor de sus parámetros por fase ($\underline{Y}_{fh} = \underline{I}_{fh,N}/Z_{fR}$ con $f = a, b, c$). Por tanto, las tensiones de alimentación son equilibradas ($\underline{m}_z = \underline{m}_{ng} = 0$, es decir, $\underline{F}_a^{(h)} = 1$, $\underline{F}_b^{(h)} = e^{-jh \cdot 2\pi/3}$ y $\underline{F}_c^{(h)} = e^{jh \cdot 2\pi/3}$) y existe el mismo número de cargas no lineales por fase ($N_a = N_b = N_c = N$).

Del estudio realizado en [49], donde se particularizaron las expresiones (4.1) y (4.4) a las condiciones anteriores, se concluye que el desequilibrio estudiado influye poco en el valor eficaz de la intensidad del neutro. No obstante, esta conclusión en principio sólo es válida para la situación estudiada porque, tal como se ha comentado, las relaciones ri_{nh} y ri_n dependen de intensidades armónicas normalizadas, $I_{ah,N}$, $I_{bh,N}$ e $I_{ch,N}$, las cuales son función de las cargas no lineales conectadas en las fases del sistema.

4.2 Validación experimental de los estudios realizados

Tal como se describe en [49], se realizaron tres ensayos sobre el sistema trifásico de la Figura 4.1 para validar experimentalmente cada uno de los tres estudios realizados. Dos rectificadores diferentes fueron construidos para realizar las medidas en el laboratorio: un rectificador tipo D de parámetros $L^{(D)} = 7.35$ mH, $C^{(D)} = 530.4$ μ F y $R_D^{(D)} = 1200$ Ω

$(x_{L,N}^{(D)}(\%) = 0.192$ y $x_{C,N}^{(D)}(\%) = 0.5)$ y un rectificador tipo E de parámetros $L^{(E)} = 80$ mH, $C^{(E)} = 75.8$ μ F y $R_D^{(E)} = 1200$ Ω ($x_{L,N}^{(E)}(\%) = 2.09$ y $x_{C,N}^{(E)}(\%) = 3.5$). Las conclusiones obtenidas a partir de los ensayos se comentan en los siguientes apartados.

4.2.1 Influencia del desequilibrio de las tensiones de alimentación

Para estudiar la influencia del desequilibrio de las tensiones de alimentación en la intensidad del neutro se conectó en cada fase del sistema trifásico un rectificador tipo D ($N_a = N_b = N_c = 1$) y se analizaron 2 casos utilizando la fuente de alimentación AC ELGAR Smartwave Switching Amplifier (Figura 3.1(a)):

- Caso 1: Se estudió un desequilibrio caracterizado por $\underline{m}_{ng}(\%) = 2.5 \angle 30^\circ$ y $\underline{m}_z(\%) = 0$ ($\underline{V}_a = 200.3 \angle 0.7^\circ$ V, $\underline{V}_b = 200.0 \angle -121.4^\circ$ V y $\underline{V}_c = 195.7 \angle 120.7^\circ$ V).
- Caso 2: Se estudió un desequilibrio caracterizado por $\underline{m}_{ng}(\%) = 2.5 \angle 30^\circ$ y $\underline{m}_z(\%) = 5 \angle 30^\circ$ ($\underline{V}_a = 213.1 \angle 2.0^\circ$ V, $\underline{V}_b = 191.3 \angle -120^\circ$ V y $\underline{V}_c = 195.8 \angle 117.8^\circ$ V).

Se pudo comprobar la poca influencia que tiene el desequilibrio de las tensiones de alimentación en la variación de las intensidades del neutro respecto al caso equilibrado.

4.2.2 Influencia del distinto número de cargas no lineales por fase

Para estudiar la influencia del distinto número de cargas no lineales por fase en la intensidad del neutro se alimentó el sistema trifásico con tensiones simétricas y equilibradas de valor eficaz $V = 200$ V ($\underline{V}_a = 200 \angle 0^\circ$ V, $\underline{V}_b = 200 \angle -120^\circ$ V y $\underline{V}_c = 200 \angle 120^\circ$ V) y se conectaron al sistema rectificadores tipo D distribuidos de la siguiente forma:

- Cinco rectificadores en la fase a ($N_a = 5$).
- Un rectificador en la fase b ($N_b = 1$).
- Dos rectificadores en la fase c ($N_c = 2$).

Se pudo comprobar la gran influencia que tiene el desequilibrio del distinto número de cargas por fase en la variación de las intensidades del neutro respecto al caso equilibrado, concretamente en las intensidades armónicas de primer y quinto orden y, en consecuencia, en el valor eficaz de la intensidad del neutro.

4.2.3 Influencia del distinto tipo de cargas no lineales por fase

Para estudiar la influencia del distinto tipo de cargas no lineales por fase en la intensidad del neutro se alimentó el sistema trifásico con tensiones equilibradas de valor eficaz $V = 200 \text{ V}$ ($\underline{V}_a = 200 \angle 0^\circ \text{ V}$, $\underline{V}_b = 200 \angle -120^\circ \text{ V}$ y $\underline{V}_c = 200 \angle 120^\circ \text{ V}$) y se conectaron al sistema un rectificador por fase ($N_a = N_b = N_c = 1$) pero de distinto tipo en cada fase. En concreto se conectaron rectificadores tipo *D* en las fases *a* y *c* y rectificador tipo *E* en la fase *b*.

Se pudo comprobar que la influencia que tiene el desequilibrio del distinto tipo de cargas no lineales por fase en la variación de las intensidades del neutro respecto al caso equilibrado es reducida, pero mayor que la producida por el desequilibrio de las tensiones de alimentación.

5. Aportaciones, conclusiones y futuras líneas de investigación

Se presenta como tesis un compendio de cuatro artículos [46-49] que constituyen cuatro estudios sobre las cargas no lineales más habituales en los sistemas eléctricos de potencia (rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, rectificadores trifásicos de 6 pulsos y lámparas de descarga) encaminados básicamente a la caracterización de su comportamiento y al análisis de su influencia en dichos sistemas. A continuación se describen las aportaciones realizadas, las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación que se han abierto.

5.1 Aportaciones

Mediante la presente tesis doctoral se han realizado las siguientes aportaciones:

- En [46] se ha caracterizado el comportamiento de las cargas no lineales a través de sus invariantes, los cuales han sido justificados teóricamente.

La utilidad de estos invariantes reside en que dos cargas no lineales con diferente valor de sus parámetros tendrán el mismo comportamiento con respecto a sus variables normalizadas si sus invariantes son iguales. Además, la utilización de dichos invariantes siempre reduce en uno (en dos si contamos la tensión de alimentación de la carga) el número de parámetros necesarios para estudiar las cargas no lineales. Por otro lado, se han establecido rangos de valores para los invariantes en base a criterios razonados, lo que permite el estudio de las cargas no lineales para sus condiciones habituales de funcionamiento.

Aprovechando las posibilidades que ofrecen los invariantes correspondientes a cada una de las cargas no lineales objeto de estudio, se ha procedido a caracterizar su comportamiento determinístico [46, 50, 51]. Además, se ha realizado algún apunte sobre los fenómenos de la cancelación [46, 52] y la interacción [46, 53, 54] armónica.

- En [47] y [48] se ha realizado la caracterización experimental del comportamiento del rectificador monofásico y trifásico con filtro capacitivo respectivamente.

En concreto, utilizando los invariantes definidos en [46] y a partir de ensayos en el laboratorio, se han obtenido sendas bases de datos de las intensidades armónicas normalizadas (en módulo y ángulo) para ambos rectificadores. Estas bases de datos permiten calcular de forma sencilla las intensidades armónicas consumidas por las respectivas cargas no lineales. La aplicabilidad de las bases de datos ha sido comprobada comparando tanto las intensidades medidas en diferentes ensayos en el laboratorio como las intensidades obtenidas a partir de simulaciones mediante PSpice con las halladas a partir de dichas bases de datos. En particular, para el rectificador monofásico con filtro capacitivo, también se ha verificado la aplicabilidad de su base de datos utilizándola para estimar los parámetros de las fuentes de alimentación de pequeños consumos monofásicos asimilables a rectificadores monofásicos con filtro capacitivo [55]. Además, también se han podido concluir aspectos particulares del

comportamiento de ambos rectificadores, corroborando los deducidos en [46], [50] y [51], a partir de lo obtenido en los ensayos.

Los estudios experimentales presentados anteriormente se han completado con los realizados en [56] y [54] para el rectificador trifásico de 6 pulsos y la lámpara de descarga respectivamente. En este caso, los modelos normalizados de ambas cargas permiten disponer de expresiones sencillas para calcular las intensidades armónicas que consumen y, por ello, únicamente se ha procedido a la validación experimental de dichas expresiones.

- Por último, en [49] se ha estudiado la intensidad del neutro en sistemas trifásicos en los que hay conectadas cargas no lineales monofásicas, en particular, rectificadores monofásicos con filtro capacitivo.

Concretamente, se ha estudiado la influencia en dicha intensidad de tres posibles situaciones de desequilibrio: desequilibrio de las tensiones de alimentación, distinto número de cargas no lineales por fase y distinto tipo de cargas no lineales por fase. Además, se han determinado expresiones analíticas que permiten comparar la intensidad del neutro con la intensidad de las fases. Finalmente, el estudio teórico realizado se ha validado experimentalmente con ensayos en el laboratorio sobre un circuito trifásico donde se han ido conectando diversos rectificadores monofásicos con filtro capacitivo y se han forzado los tres tipos de desequilibrio estudiados.

5.2 Conclusiones

Estos son los estudios presentados a lo largo de esta tesis junto con las conclusiones que se han obtenido de cada uno de ellos:

- Del estudio efectuado en [46] se concluye que es posible caracterizar el comportamiento de las cargas no lineales a través de sus invariantes, que son el

mínimo número de parámetros necesarios para la caracterización completa de su comportamiento no lineal.

- Los estudios determinísticos realizados en [46], [50] y [51] para cada una de las cargas no lineales en función de sus correspondientes invariantes han permitido validar la utilización de los invariantes y han puesto de manifiesto cuáles de esos invariantes son los más influyentes en sus respectivos comportamientos y cuáles lo son menos.
- En [46], cuatro ensayos en el laboratorio han puesto de relieve el fenómeno de la cancelación armónica. Este fenómeno es analizado numéricamente de forma más general en [52] a partir de simulaciones con PSpice y con un software desarrollado a tal efecto que ha permitido determinar las intensidades armónicas consumidas por las cargas no lineales y, a partir de ellas, caracterizar la distribución de sus ángulos de fase utilizando diagramas fasoriales. Del estudio realizado se ha podido concluir lo siguiente (ver Figura 2.5):
 - Es muy probable la cancelación armónica entre los rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, ya que sus intensidades pueden estar habitualmente en oposición de fases para un amplio rango de sus invariantes.
 - Las intensidades armónicas consumidas por los rectificadores trifásicos de 6 pulsos presentan una gran diversidad en sus fases en función de su invariante p_N , lo que facilita la cancelación armónica con otras cargas. No obstante, es difícil obtener dicha cancelación para dos armónicos simultáneamente, lo cual no permite lograr una distorsión armónica total excesivamente reducida.
 - Las lámparas de descarga también ofrecen la posibilidad de cancelación de las intensidades con las otras cargas, aunque por un lado no se pueden cancelar dos armónicos simultáneamente y por otro la magnitud de sus intensidades armónicas es mucho menor que la del resto.

- El fenómeno de interacción armónica ha sido introducido en [46] y estudiado en primera aproximación y numéricamente en [53] a partir de un software desarrollado a tal efecto con MATLAB. A partir del estudio realizado se puede concluir lo siguiente:
 - Los rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo son las cargas no lineales más sensibles a la distorsión armónica.
 - La lámpara de descarga también es sensible a la distorsión, pero cada armónico de tensión sólo influye en el mismo armónico de intensidad. Además, los armónicos de tensión influyen muy poco en la intensidad fundamental consumida por la carga.
 - El rectificador de 6 pulsos bajo la consideración de ausencia de rizado en el lado de continua no es sensible a la distorsión de las tensiones y su modelización se podría realizar sin considerar la interacción armónica.

Posteriormente, en [54] se aborda el estudio del fenómeno de la interacción armónica en relación a la lámpara de descarga mediante el método de Monte Carlo, quedando corroborado lo concluido para dicha carga en [53].

- Los estudios experimentales efectuados en [47] y [48] para los rectificadores monofásico y trifásico con filtro capacitivo respectivamente, permiten afirmar que las bases de datos de las intensidades armónicas normalizadas (en módulo y ángulo) obtenidas experimentalmente en función de sus respectivos invariantes son válidas para calcular de forma sencilla las intensidades armónicas consumidas por ambos rectificadores. En particular, para el rectificador monofásico con filtro capacitivo, su correspondiente base de datos también es válida para estimar los parámetros de fuentes de alimentación monofásicas [55].

- De igual modo, los estudios experimentales que se desarrollan en [56] y [54] para el rectificador trifásico de 6 pulsos y la lámpara de descarga respectivamente, llevan a la conclusión de que sus respectivos modelos normalizados son válidos para calcular de forma sencilla las intensidades armónicas consumidas por ambas cargas.
- Finalmente, los estudios presentados en [49] para analizar la influencia de situaciones de desequilibrio en la intensidad del neutro en sistemas trifásicos en los que hay conectadas cargas no lineales monofásicas, permiten concluir que:
 - El desequilibrio de las tensiones de alimentación influye poco en la intensidad del neutro.
 - El distinto número de cargas no lineales por fase tiene una gran influencia en la intensidad del neutro, aumentando su valor eficaz a medida que crece el grado de desequilibrio entre las cargas conectadas en cada fase.
 - El distinto tipo de cargas no lineales por fase parece influir poco en la intensidad del neutro. No obstante, esta conclusión ha sido deducida para un desequilibrio en concreto: distinto tipo de carga no lineal en la fase *b*. Así que, para poder llegar a conclusiones definitivas, sería necesario e interesante desarrollar un estudio más exhaustivo sobre este desequilibrio.

5.3 Futuras líneas de investigación

Como futuras líneas de investigación derivadas del trabajo desarrollado se prevén las que se describen a continuación:

- Los estudios realizados en [46] y [54] sobre la lámpara de descarga van a ser continuados en breve con estudios adicionales encaminados a caracterizar mejor el modelo de la tensión de arco y, por tanto, el modelo de dicha lámpara.

- Dado que las condiciones de operación de las cargas no lineales varían con el tiempo, los estudios determinísticos realizados en [46], [50] y [51] no son suficientes para caracterizar completamente el comportamiento de dichas cargas. En este sentido, es necesario aplicar técnicas probabilísticas para evaluar las variaciones aleatorias de las intensidades armónicas consumidas por dichas cargas y determinar dicho comportamiento. Fruto de la experiencia adquirida en [57] y a partir del rango de valores habituales de cada uno de los invariantes, se ha analizado en [50] y [51] el comportamiento estocástico de las cuatro cargas no lineales estudiadas aplicando el método de Monte Carlo. El estudio realizado significa el primer paso para la determinación analítica de las funciones densidad de probabilidad asociadas a las intensidades armónicas consumidas por las cargas no lineales y debe ayudar a analizar la posible cancelación entre dichas intensidades considerando el carácter estocástico de los parámetros de dichas cargas. Respecto a la determinación analítica de las funciones densidad de probabilidad, ya ha sido enviado un artículo a una revista de reconocido índice de impacto en el que se ha logrado este objetivo para la lámpara de descarga.
- El programa de simulación elaborado para analizar numéricamente el fenómeno de la cancelación armónica en [52] debe permitir en el futuro un estudio numérico más profundo de dicho fenómeno. Para ello, el programa anterior ha sido adaptado para su utilización como subrutina controlada por otro programa que permite tratar la cancelación como problema de optimización. En este sentido, se están preparando dos artículos de revista:
 - En el primero de ellos, se analiza el fenómeno de la cancelación armónica entre un conjunto de ordenadores (asimilables a rectificadores monofásicos con filtro capacitivo) y otro de fluorescentes (asimilables a lámparas de descarga) en función de sus invariantes y haciendo uso del factor de diversidad. Como principal aportación, se propone un nuevo índice denominado factor de diversidad total cuyo cometido será evaluar el nivel de cancelación armónica que se tiene de todos los

armónicos en global, a diferencia del factor de diversidad, que sólo evalúa la que se tiene de un armónico en concreto.

- En el segundo, se profundiza en el anterior estudio mediante la aplicación de un algoritmo de optimización global denominado ECAM (Extended Cutting Angle Method [37]) perteneciente a la MATLAB Toolbox GANSO (Global And Non-Smooth Optimization). El objetivo es determinar para qué valores de los invariantes de las cargas implicadas en el análisis se produce el mínimo global de factor de diversidad (tanto total como individual). Además, dada la posibilidad de que exista mínimo global en diversos puntos, para poderlos determinar todos es necesario aplicar ECAM según una técnica especial que va a ser aportada en dicho artículo.

En ambos casos, dentro de la subrutina controlada por el programa de optimización, ha sido necesario liberar al modelo analítico del rectificador monofásico con filtro capacitivo de su dependencia de un método numérico para la determinación de las intensidades fundamental y armónicas consumidas por dicha carga para unos valores concretos de sus invariantes. Esta liberación ha sido posible haciendo uso del método de interpolación por polinomios cúbicos de Hermite [38]. Otra opción para no tener dependencias de métodos numéricos en el modelo sería emplear directamente el modelo experimental (base de datos) del rectificador [47], aunque esto iría en perjuicio de la precisión.

En el futuro, se contempla la posibilidad de realizar estudios numéricos similares al presentado anteriormente para otros conjuntos de cargas no lineales.

También está previsto estudiar analíticamente el fenómeno de la cancelación armónica a partir de modelos sencillos de las cargas no lineales, con el fin de obtener expresiones que permitan determinar las mismas distribuciones de los ángulos de fase que antes fueron obtenidas de forma numérica en [52]. Estas expresiones deben permitir estudiar el fenómeno de la cancelación armónica de forma teórica y llegar a conclusiones de carácter general.

- El análisis del fenómeno de la interacción armónica efectuado en [53] sirve para tener una primera idea del comportamiento de las cargas no lineales frente a la distorsión armónica en la tensión de alimentación, pero es necesario un estudio más detallado y profundo de dicho fenómeno. En este sentido, se prevén dos líneas de trabajo:
 - La primera de ellas, aplicar el método de Monte Carlo a cada una de las restantes cargas no lineales objeto de estudio tal como se ha hecho en [54] para la lámpara de descarga.
 - La segunda, realizar un tratamiento analítico del problema para obtener unas matrices de sensibilidades armónicas. Estas matrices de sensibilidades relacionan las intensidades armónicas consumidas por las cargas con las tensiones armónicas en sus bornes, por lo que su análisis permitirá obtener conclusiones más precisas sobre la influencia de las tensiones armónicas en el comportamiento de las cargas.
- Los estudios experimentales desarrollados en [47], [48], [56] y [54] para los rectificadores monofásico y trifásico con filtro capacitivo, el rectificador trifásico de 6 pulsos y la lámpara de descarga respectivamente, permiten disponer de modelos normalizados de dichas cargas los cuales han sido validados tanto experimentalmente como numéricamente. Dichos modelos van a ser utilizados próximamente ([54], [55] y otro artículo que ya ha sido enviado a una revista de reconocido índice de impacto) para:
 - Caracterizar conjuntos de los consumos no lineales más habituales en las instalaciones eléctricas industriales, comerciales y domésticas a partir de medidas experimentales: ajuste de modelos teóricos y de modelos agregados.

- Determinar la distorsión armónica de la intensidad consumida en las instalaciones eléctricas a partir de los modelos ajustados. Estos modelos serán validados con medidas experimentales en dichas instalaciones.

Además, se van a utilizar medidas experimentales de las intensidades armónicas consumidas por cargas no lineales y por conjuntos de dichas cargas para determinar de forma analítica, numérica o experimental las funciones densidad de probabilidad asociadas a dichas intensidades (se ha enviado un artículo a una revista de reconocido índice de impacto en el que dichas funciones han sido determinadas experimentalmente para ordenadores personales y, a partir de ellas, se ha analizado el fenómeno de la cancelación armónica desde un punto de vista estocástico). De igual modo, a partir de medidas experimentales en parques eólicos, se pretende realizar un estudio estadístico de la distorsión armónica en la generación distribuida. En esta línea, ya se ha enviado un artículo a una revista de reconocido índice de impacto con un estudio de este tipo.

- El estudio presentado en [49] sobre la influencia de situaciones de desequilibrio en la intensidad del neutro en sistemas trifásicos en los que hay conectadas cargas no lineales monofásicas, se realizó en relación a una carga no lineal monofásica específica (rectificador monofásico con filtro capacitivo) y para tres situaciones concretas de desequilibrio (desequilibrio de las tensiones de alimentación, distinto número de cargas no lineales por fase y distinto tipo de cargas no lineales por fase). En el futuro, se contempla extender este estudio a otras cargas no lineales monofásicas y a otras posibles situaciones de desequilibrio.

6. Bibliografía

6.1 Referencias consultadas por el doctorando

6.1.1 Libros

- [1] J. Arrillaga, N. R. Watson, *Power System Harmonics, Second Edition*. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] J. Arrillaga, C. P. Arnold, *Computer Analysis of Power Systems*. John Wiley & Sons, 1990.
- [3] A. Gómez Expósito, *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*. McGraw-Hill, 2002.
- [4] G. T. Heydt, *Electric Power Quality*. Stars in a Circle Publications, 1991.

6.1.2 Artículos de revista y de congreso

- [5] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, M. J. Samotyj, *An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power*

- Electronic Loads*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 467-473.
- [6] A. Mansoor, W. M. Grady, R. S. Thallam, M. T. Doyle, S. D. Krein, M. J. Samotyj, *Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995, pp. 1416-1422.
- [7] S. Herraiz, L. Sainz, J. Pedra, *Behaviour of Single-Phase Full-Wave Rectifier*. European Transactions on Electrical Power (ETEP), Vol. 13, No. 3, May/June 2003, pp. 185-192.
- [8] A. W. Kelley, W. F. Yadusky, *Rectifier Design for Minimum Line-Current Harmonics and Maximum Power Factor*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 332-341.
- [9] S. Hansen, P. Nielsen, F. Blaabjerg, *Harmonic Cancellation by Mixing Nonlinear Single-Phase and Three-Phase Loads*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, January/February 2000, pp. 152-159.
- [10] J. G. Mayordomo, A. Hernández, R. Asensi, L. F. Beites, M. Izzeddine, *A Unified Theory of Uncontrolled Rectifiers, Discharge Lamps and Arc Furnaces. PART I: An Analytical Approach for Normalized Harmonic Emission Calculations*. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98), Athens, Greece, October 1998, pp. 740-748.
- [11] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, P. Varilone, P. Verde, *Analytical Modeling for Harmonic Analysis of Line Current of VSI-Fed Drives*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004, pp. 1212-1224.
- [12] S.-G. Jeong, J.-Y. Choi, *Line Current Characteristics of Three-Phase Uncontrolled Rectifiers under Line Voltage Unbalance Condition*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 6, November 2002, pp. 935-945.
- [13] M. H. Rashid, A. I. Maswood, *Analysis of Three-Phase AC-DC Converters under Unbalanced Supply Conditions*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 3, May/June 1988, pp. 449-455.

- [14] R. Asensi, J. G. Mayordomo, F. Orzáez, L. F. Beites, *Iterative Harmonic Analysis for Controlled and Uncontrolled AC/DC Converters under Unbalanced Conditions: A Compromise between Model Accuracy and Flexibility*. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98), Athens, Greece, October 1998, pp. 412-418.
- [15] M. Grötzbach, R. Redmann, *Line Current Harmonics of VSI-Fed Adjustable-Speed Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 2, March/April 2000, pp. 683-690.
- [16] M. Grötzbach, R. Redmann, *Analytical Predetermination of Complex Line-Current Harmonics in Controlled AC/DC Converters*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, May/June 1997, pp. 601-612.
- [17] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, R. Asensi, F. Orzáez, M. Izzeddine, L. Zabala, *A Contribution for Modeling Controlled and Uncontrolled AC/DC Converters in Harmonic Power Flows*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998, pp. 1501–1508.
- [18] M. Grötzbach, M. Bauta, R. Redmann, *Line Side Behaviour of Six-Pulse Diode Bridge Rectifiers with AC-Side Reactance and Capacitive Load*. Proceedings of the 3rd European Conference on Power Quality (PQ'95), Bremen, Germany, November 1995, pp. 525-534.
- [19] J. G. Mayordomo, R. Asensi, L. F. Beites, J. Bueno, L. Zabala, J. Amantegui, *A Frequency Domain Arc Furnace Model for Harmonic Power Flows Under Balanced Conditions*. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'96), Las Vegas, NV, USA, October 1996, pp. 419-427.
- [20] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, R. Asensi, M. Izzeddine, L. Zabala, J. Amantegui, *A New Frequency Domain Arc Furnace Model for Iterative Harmonic Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1771–1778.
- [21] A. E. Emanuel, L. Peretto, *The Response of Fluorescent Lamp with Magnetic Ballast to Voltage Distortion*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 289-295.
-

- [22] G. W. Chang, *Characterizing Harmonic Currents Generated by Fluorescent Lamps in Harmonic Domain*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, pp. 1583-1585.
- [23] R. Arseneau, M. Ouellette, *The Effects of Supply Harmonics on the Performance of Compact Fluorescent Lamps*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 473-479.
- [24] F. A. Gorgette, J. Lachaume, W. M. Grady, *Statistical Summation of the Harmonic Currents Produced by a Large Number of Single Phase Variable Speed Air Conditioners: A Study of Three Specific Designs*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000, pp. 953-959.
- [25] P. J. Moore, I. E. Portugués, *The Influence of Personal Computer Processing Modes on Line Current Harmonics*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, pp. 1363-1368.
- [26] D. O. Koval, C. Carter, *Power Quality Characteristics of Computer Loads*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, May/June 1997, pp. 613-621.
- [27] A. Capasso, R. Lamedica, A. Prudenzi, *Experimental Characterization of Personal Computers Harmonic Impact on Power Quality*. Computer Standards and Interfaces, Vol. 21, No. 4, September 1999, pp. 321-333.
- [28] R. Lamedica, C. Sorbillo, A. Prudenzi, *The Continuous Harmonic Monitoring of Single-Phase Electronic Appliances: Desktop PC and Printers*. Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'00), Orlando, FL, USA, October 2000, pp. 697-702.
- [29] A. Mansoor, W. M. Grady, P. T. Staats, R. S. Thallam, M. T. Doyle, M. J. Samotyj, *Predicting the Net Harmonic Currents Produced by Large Numbers of Distributed Single-Phase Computer Loads*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, October 1995, pp. 2001-2006.
- [30] A. Mansoor, W. M. Grady, *Analysis of Compensation Factors Influencing the Net Harmonic Current Produced by Single-Phase Non-Linear Loads*. Proceedings of the

- 8th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98), Athens, Greece, October 1998, pp. 883-889.
- [31] A. Capasso, R. Lamedica, A. Prudenzi, *Estimation of Net Harmonic Currents Due to Dispersed Non-Linear Loads within Residential Areas*. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98), Athens, Greece, October 1998, pp. 700-705.
- [32] O. Boix, L. Sainz, J. Pedra, *Harmonic Interaction in Capacitor Rectifier Loads*. European Transactions on Electrical Power (ETEP), Vol. 10, No. 2, March/April 2000, pp. 93-97.
- [33] O. Boix, L. Sainz, J. Pedra, *Analysis of Models of Gas Discharge Lamps for Harmonic Studies*. Science and Engineering Journal, Vol. 10, No. 1, June 2001, pp. 51-57.
- [34] J. J. M. Desmet, I. Sweertvaegher, G. Vanalme, K. Stockman, R. J. M. Belmans, *Analysis of the Neutral Conductor Current in a Three-Phase Supplied Network with Nonlinear Single-Phase Loads*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 3, May/June 2003, pp. 587-593.
- [35] T. M. Gruz, *A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, July/August 1990, pp. 719-725.
- [36] A.-C. Liew, *Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Lighting Circuits*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 4, July/August 1989, pp. 776-782.
- [37] G. Beliakov, *Extended Cutting Angle Method of Global Optimization*. Pacific Journal of Optimization, Vol. 4, No. 1, January 2008, pp. 153-176.
- [38] F. N. Fritsch, R. E. Carlson, *Monotone Piecewise Cubic Interpolation*. SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 17, No. 2, April 1980, pp. 238-246.

6.1.3 Otras publicaciones

- [39] O. Boix, *Estudio y Modelización en Régimen Permanente de Cargas No Lineales para el Análisis Armónico de Redes Eléctricas*. Tesis Doctoral, ETSEIB, UPC, Barcelona, 1996.
- [40] S. Herraiz, *Aportaciones al Estudio del Flujo Armónico de Cargas*. Tesis Doctoral, ETSEIB, UPC, Barcelona, 2002.
- [41] E. Tubau, *Estudio y Modelización de los Convertidores AC/DC de Seis y Doce Pulsos*. Tesis Doctoral, ETSEIB, UPC, Barcelona, 2001.
- [42] J. G. Mayordomo, *Análisis de los Armónicos Introducidos en las Redes Eléctricas por los Convertidores Estáticos de Potencia*. Tesis Doctoral, ETSIIM, UPM, Madrid, 1986.
- [43] *Testing and Measurement Techniques – Unbalance, Immunity Test*. IEC Standard 61000-4-27, August 2000.
- [44] *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book) (ANSI)*. IEEE Std. 141-1993.
- [45] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Std. 1159-1995.

6.2 Producción científica del doctorando

6.2.1 Artículos de revista

- [46] L. Sainz, J. J. Mesas, A. Ferrer, *Characterization of Non-Linear Load Behavior*. Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 78, No.10, October 2008, pp. 1773-1783.
- [47] L. Sainz, J. Pedra, J. J. Mesas, *Single-Phase Full-Wave Rectifier Study with Experimental Measurements*. Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 77, No. 3-4, March 2007, pp. 339-351.
- [48] L. Sainz, J. J. Mesas, A. Ferrer, *Three-Phase Full-Wave Rectifier Study with*

Experimental Measurements. Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 79, No. 4, April 2009, pp. 521-530.

- [49] L. Sainz, J. Pedra, J. J. Mesas, *Study of Neutral Conductor Current in Three-Phase Networks with Single-Phase Converters*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1466-1476.

6.2.2 Artículos de congreso

- [50] J. J. Mesas, L. Sainz, A. Ferrer, *Deterministic and Stochastic Study of the Single-Phase Non-Linear Load Behavior*. Proceedings of the 8th IASTED International Conference on Power and Energy Systems (EuroPES'08), Corfu, Greece, June 2008, pp. 44-49.
- [51] J. J. Mesas, L. Sainz, A. Ferrer, *Deterministic and Stochastic Study of the Three-Phase Non-Linear Load Behavior*. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG'09), Lisbon, Portugal, March 2009, pp. 297-302.
- [52] L. Sainz, J. J. Mesas, S. Herraiz, *Study of Harmonic Cancellation between AC/DC Converter Currents*. Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'04), Lake Placid, NY, USA, September 2004, pp. 148-153.
- [53] J. J. Mesas, S. Herraiz, L. Sainz, *Harmonic Interaction in Non-Linear Devices*. Proceedings of the 3rd IASTED International Conference on Power and Energy Systems (EuroPES'03), Marbella, Spain, September 2003, pp. 120-125.
- [54] J. J. Mesas, L. Sainz, A. Ferrer, *Discharge Lamp Harmonic Interaction Study by Monte Carlo Simulation and Experimental Measurements*. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG'09), Lisbon, Portugal, March 2009, pp. 303-308.
- [55] J. J. Mesas, L. Sainz, A. Ferrer, *Estimation of Single-Phase Uncontrolled Rectifier Parameters*. Proceedings of the 9th IASTED International Conference on Power and

- Energy Systems (EuroPES'09), Palma de Mallorca, Spain, September 2009, pp. 57-61.
- [56] J. J. Mesas, L. Sainz, A. Ferrer, *Deterministic and Experimental Study on Three-Phase 6-Pulse Rectifiers*. Proceedings of the 9th IASTED International Conference on Power and Energy Systems (EuroPES'09), Palma de Mallorca, Spain, September 2009, pp. 62-66.
- [57] L. Sainz, J. J. Mesas, *Stochastic Study of the Harmonic Response of Electric Systems with Capacitors and Shunt Filters*. Proceedings of the 8th IASTED International Conference on Power and Energy Systems (EuroPES'08), Corfu, Greece, June 2008, pp. 56-61.

Anexo: Publicaciones que conforman la tesis

A continuación se adjunta el compendio de los cuatro artículos de calidad contrastada que constituyen la tesis, todos ellos publicados en revistas de reconocido índice de impacto indexadas en el *Journal Citation Report*:

- L. Sainz, J. Pedra, J. J. Mesas, *Study of Neutral Conductor Current in Three-Phase Networks with Single-Phase Converters*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1466-1476.
Índice de impacto (2006): 0.496
- L. Sainz, J. Pedra, J. J. Mesas, *Single-Phase Full-Wave Rectifier Study with Experimental Measurements*. Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 77, No. 3-4, March 2007, pp. 339-351.
Índice de impacto (2007): 0.446
- L. Sainz, J. J. Mesas, A. Ferrer, *Characterization of Non-Linear Load Behavior*. Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 78, No.10, October 2008, pp. 1773-1783.

Índice de impacto (2008): 0.952

- L. Sainz, J. J. Mesas, A. Ferrer, *Three-Phase Full-Wave Rectifier Study with Experimental Measurements*. Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 79, No. 4, April 2009, pp. 521-530.

Índice de impacto (2008): 0.952