

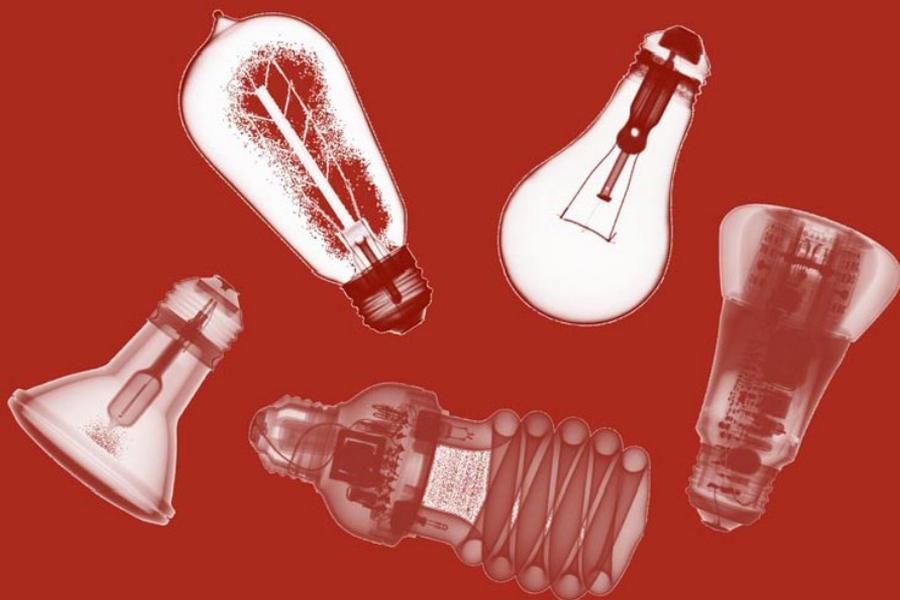


ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO ELÉCTRICO EN LOS SISTEMAS DE ALUMBRADO

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

Presentada por

AURORA DEL ROCÍO GIL DE CASTRO



Dirigida por:

Antonio Moreno Muñoz

Juan José González de la Rosa

Córdoba, junio 2012

TITULO: *Estudio y caracterización de la calidad de suministro eléctrico en los sistemas de alumbrado*

AUTOR: *AURORA DEL ROCÍO GIL DE CASTRO*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



Dto. de Arquitectura de Computadores, Electrónica y
Tecnología Electrónica



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Estudio y Caracterización de la Calidad de Suministro Eléctrico en los Sistemas de Alumbrado

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

presentada por

Aurora del Rocío Gil de Castro

dirigida por:

Dr. D. Antonio Moreno Muñoz
Dr. D. Juan José González de la Rosa

Córdoba, junio 2012



TÍTULO DE LA TESIS: Estudio y Caracterización de la Calidad de Suministro Eléctrico en los Sistemas de Alumbrado

DOCTORANDA: Aurora del Rocío Gil de Castro

INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

La doctoranda **Aurora del Rocío Gil de Castro** ha realizado satisfactoriamente y en los plazos previstos, el trabajo de investigación que se presenta en esta memoria de Tesis: **Estudio y Caracterización de la Calidad de Suministro Eléctrico en los Sistemas de Alumbrado**.

En ella, la doctoranda ha realizado un análisis extensivo y pormenorizado de la calidad de suministro eléctrico, específicamente del fenómeno de los armónicos, y centrado en el ámbito de la iluminación, tanto de interior como de exterior.

Ha realizado una amplia labor experimental en la que ha contemplado toda la variedad de tecnologías existentes hoy en día, incluso de última generación, como es el caso de las lámparas de LED. Como consecuencia de esto, se ha visto obligada a trabajar con una gran variedad de equipos de medida e instrumental electrónico, entre los que se incluyen osciloscopios y analizadores de espectro de última generación. Además, ha desarrollado diversas herramientas, tanto software como hardware, para la caracterización y pre-certificación de los distintos balastos en el laboratorio de instrumentación electrónica, según lo exigido por la rigurosa normativa de Compatibilidad Electromagnética vigente.

Como consecuencia de este trabajo ha surgido una colaboración entre *Lulea University of Technology* (Suecia), donde realizó su estancia, y la *Universidad de Córdoba*, que ya está dando sus primeros frutos.

En definitiva, esta tesis supone un hito importante, ya que ha contribuido al conocimiento general de este complejo fenómeno de los armónicos, así como la caracterización del impacto combinado de las distintas fuentes generadoras en la distribución eléctrica. Esto queda reflejado en las positivas revisiones y alentadores comentarios que ha recibido en los trabajos presentados tanto en revistas de impacto como en los congresos internacionales a los que ha asistido la doctoranda.

Por todo ello, a nuestro juicio, reúne los requisitos necesarios exigidos para optar al grado de Doctor.

Córdoba, 1 de junio de 2012

Firma de los directores

Fdo. Antonio Moreno Muñoz

Fdo. Juan José González de la Rosa

Abstract

A recent study carried out for the European Commission has shown that between 30% and 50% of electricity used for lighting could be saved by investing in energy-efficient lighting systems. In most cases, such investments are not only profitable and sustainable but they also improve lighting quality.

According to the application, indoor and outdoor lighting systems present a wide variety of lamp technologies. The former includes incandescent, halogen and CFL. The latter includes HPS mainly connected to both electronic and electromagnetic ballasts. Both technologies share the incoming presence of LED lamps. At the moment LED lamps are not commonly used as street lighting systems, although recent technology is improving gradually the LEDs efficiency and color quality which allows their application in all lighting systems. However, energy saving is often used as one of their selling features, and customers need to have a clear understanding of LED energy-saving potential.

On the other hand, lighting also affects the Power Quality (PQ) of the electrical distribution system. PQ is concerned with deviations of the voltage or current from the ideal single-frequency sine wave of constant amplitude and frequency. Power quality deterioration is due to events and steady state disturbances which include harmonic distortion among others.

The main focus of this thesis is the harmonic characterization of several lighting technologies. The change to LED lamps has been considered both in indoor and outdoor. In order to do so, a wide variety of measurements have been needed in both fields of lighting. Harmonics and interharmonics have been considered, and all the frequency range up to 150 kHz has been studied. Aggregation of devices has also been taken into account, in such way; magnitudes, phase angles and complex current from harmonics have been characterized. This will help us to foresee the impact of adding new devices and characterize the expected harmonic content after the addition.

Conclusions in indoor lighting reveal that the harmonic impact strongly depends on which other equipment is connected and that devices like TV, computer and microwave have a much bigger impact than the lamps. The impact of LED lamps is smaller, for most harmonics, than for CFLs for the same amount of lumen because LED lamps take less fundamental current. Several of the observations show a shift towards emission at higher frequencies with the introduction of LED lamps. Also interharmonic and even-harmonic levels appear to increase with the introduction of LED lamps. Although no adverse impacts of this are yet to be expected.

Moreover, regarding the change to LED in outdoor lighting, the harmonic emission from LED street lamps is less than from HPS lamps, including all frequency bands. Replacing HPS lamps with LED lamps will thus not result in an increase in harmonic levels in the grid. Some other advantages like dimming possibilities and energy savings will increase efficiency within our lighting system. Though no aggregation has been observed with electronic ballasts, more measurements are needed to accurately estimate the emission from uniformed and mixed loads.

Resumen

Un reciente estudio de la Comisión Europea revela que es posible ahorrar entre un 30% y un 50% en la electricidad empleada en iluminación mediante la inversión en sistemas de iluminación eficientes. En la mayoría de los casos, esas inversiones no solo son rentables y sostenibles, sino que también mejoran la calidad de la iluminación.

Según la aplicación, los sistemas de alumbrado para interior y exterior presentan una amplia variedad de tecnologías de lámparas. En el alumbrado de interior se incluyen, entre otras, las incandescentes, halógenas y CFL; mientras que en el de exterior encontramos principalmente lámparas de sodio de alta presión (HPS) conectadas a balastos electrónicos y electromagnéticos. Ambos tipos de alumbrado engloban la cada vez mayor presencia de lámparas de LED. Éstas no se usan actualmente en el alumbrado público, a pesar de presentar continuamente importantes mejoras en la eficiencia y en la calidad del color, lo que permite su aplicación en todos los sistemas de alumbrado. Sin embargo, al usarse el ahorro energético como característica de venta, los usuarios necesitan tener claro su ahorro energético.

Por otro lado, la iluminación también afecta a la calidad de suministro del sistema de distribución eléctrico. La calidad de suministro está relacionada con las desviaciones en la tensión y corriente de la forma de onda sinusoidal de amplitud y frecuencia constantes. El deterioro en la calidad de suministro se debe a eventos y perturbaciones en el estado estacionario entre los que se incluye la distorsión armónica entre otras.

El tema principal de la tesis es la caracterización armónica de diversas tecnologías de iluminación. Se ha estudiado el cambio a LED en alumbrado de interior y exterior. Para poder evaluar esto ha sido necesaria la realización de diversos experimentos. Se han considerado tanto los armónicos (hasta 150 kHz) como los interarmónicos; así como la agregación de cargas, para lo que se han caracterizado magnitudes, ángulos de fase, y la expresión compleja de las corrientes. Esto servirá de ayuda a la hora de caracterizar el impacto de añadir nuevos dispositivos, y en la caracterización armónica tras dicha agregación.

Las conclusiones en el alumbrado de interior revelan que el impacto armónico depende en gran medida de los otros equipos conectados, y que dispositivos como la televisión, el ordenador o el microondas tienen un impacto mucho mayor que las lámparas. El impacto de los LED es menor, para la mayoría de los órdenes armónicos, que en las CFL para la misma cantidad de lúmenes, ya que las primeras absorben menos corriente. Se muestra además un cambio en la emisión hacia las altas frecuencias derivado de la introducción de LED. También parecen aumentar los interarmónicos y los armónicos pares con la introducción de las mismas. Sin embargo, en general, no se espera un gran impacto de lo anterior.

Además, en cuanto a los LED en el alumbrado de exterior, su emisión armónica es menor que la de las lámparas HPS para todo el espectro en frecuencia. Por lo que la sustitución de sodio por LED no resultará en un incremento de los niveles armónicos. Algunas otras ventajas como las posibilidades de atenuación incrementarán la eficiencia de nuestro sistema de alumbrado. A pesar de no haberse observado agregación con los balastos electrónicos, se necesitan más medidas para predecir de forma precisa la emisión de mezcla de lámparas iguales y distintas.

Publicaciones derivadas directamente de esta tesis:

Gil-de-Castro, A., Moreno-Muñoz, A., Larsson, A., de la Rosa, J.J.G., Bollen, M.H.J.; LED Street Lighting. A new power quality comparison among street light technologies, Lighting Research and Technology, prepublished June 2012, DOI: 10.1177/1477153512450866

Gil-de-Castro, A., Rönnberg S., Bollen, M. H. J., Moreno-Muñoz, A., and Pallares-Lopez, V.; Harmonics from a domestic customer with different lamp technologies (2012) ICHQP12 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 1-6.

Harmonic phase angles for a domestic customer with different types of lighting. Aurora Gil-de-Castro, Sarah K. Rönnberg, Math H.J. Bollen, Antonio Moreno-Muñoz. Submitted to IEEE Transactions on Sustainable Energy.

Impact of device switching on the harmonic emission for a domestic customer with different types of lighting. Aurora Gil-de-Castro, Sarah K. Rönnberg, Math H.J. Bollen, Antonio Moreno-Muñoz. Submitted to International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

Gil-de-Castro, A., Moreno-Munoz, A., de la Rosa, J.J.G.; Comparative study of electromagnetic and electronic ballasts - An assessment on harmonic emission (2012) Przegląd Elektrotechniczny, 88 (2), pp. 288-294.

Gil-De-Castro, A., Moreno-Munoz, A., De La Rosa, J.J.G., Flores Arias, J.M., Pallares-Lopez, V.; Study of harmonic generated by electromagnetic and electronic ballast used in street lighting (2011) Proceedings - ISIE 2011: 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, art. no. 5984196, pp. 425-430.

Gil-De-Castro, A., Muñoz, A.M., López, V.P., Pérez, A.A.; Harmonic effect in street lighting (2011) 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, CPE 2011 - Conference Proceedings, art. no. 5942200, pp. 16-21.

Gil-de-Castro, A., Moreno-Munoz, A., De La Rosa, J.J.G.; Characterizing the harmonic attenuation effect of high-pressure sodium lamps (2010) ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, art. no. 5625424.

Otras publicaciones relacionadas con la tesis:

Bellido Outeiriño, F.J., Domingo-Perez, F., Gil-De-Castro, A., Flores Arias, J., Moreno-Munoz, A.; In-building lighting management system with wireless communications (2012) IEEE International Conference on Consumer Electronics, art. no. 6161751, pp. 83-85.

Bellido-Outeirino, F.J., Flores-Arias, J.M., Domingo-Perez, F., Gil-De-Castro, A., Moreno-Munoz, A.; Building lighting automation through the integration of DALI with

wireless sensor networks (2012) IEEE Transactions on Consumer Electronics, 58 (1), art. no. 6170054, pp. 47-52.

Domingo-Pérez, F., Gil-De-Castro, A., Flores-Arias, J.M., Bellido-Outeiriño, F.J., Moreno-Muñoz, A.; Lighting control system based on DALI and wireless sensor networks (2012) 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012, art. no. 6175666

Domingo-Perez, F., Gil-de-Castro, A., Flores-Arias, J.M., Bellido-Outeirino, F.J., Moreno-Munoz, A.; Low-rate wireless personal area networks and DALI protocol applied to street lighting (2011) Lecture Notes in Electrical Engineering, 121 LNEE, pp. 465-472.

F. Domingo-Perez, A. Gil-de-Castro, J.M. Flores-Arias, F.J. Bellido-Outeirino, and A. Moreno-Munoz; Low-rate wireless personal area networks applied to street lighting Lighting Research and Technology, 1477153511431129, first published on December 14, 2011

Agradecimientos

Tras un largo periodo de trabajo, muchas son las personas que merecen ser mencionadas en esta tesis. Como en mis anteriores proyectos finales de carrera, y en general, como todo en esta vida, los primeros a los que menciono son mi familia que son mi padre, madre, hermana y Javi. Por todo el apoyo que he recibido siempre, por estar siempre pendientes de mí, porque me han animado a seguir adelante en este duro camino al que lleva la docencia, en los malos momentos, incluso cuando suponía que me fuera de su lado en el periodo de la estancia. Por estar siempre dispuestos a acompañarme a repetir una y mil veces los experimentos. Siempre estaré agradecida con vosotros, sois lo más importante en mi vida. Esta tesis también es vuestra.

También gracias a todas las personas que quiero y se han ido de mi lado, incluso aquellas que no conocí personalmente pero como si lo hubiera hecho, porque sé que siempre estarán cuidando de mí, siempre iluminando mi camino.

En el ámbito laboral, a todos mis compañeros, que en su día fueron mis profesores, y de los que he aprendido todo, en lo laboral y humano. En primer lugar a mis directores, Antonio y Juan José, por su ayuda en todo lo que he necesitado y por todo lo que he aprendido gracias a ellos. Por buscar siempre la vía para seguir con ellos a través de numerosos proyectos y finalmente como docente en el Dpto., por permitirme ser su alumna, de nuevo, por enseñarme todo lo que saben.

A Víctor, Miguel, José M^a, Kiko, Isabel, Juan y todos los demás, porque hoy son mis compañeros y amigos, porque me han brindado sus conocimientos siempre que los he ido a buscar, por todo el apoyo, porque me han hecho sentir como en familia.

A mis buenos amigos, Isa, Manolo y Fran, que habéis sufrido tanto como yo el proceso de esta tesis. Isa, mi buena amiga, no sólo en lo laboral, mucho más en lo personal. Manolo, un buen amigo al que aprecio y del que he aprendido mucho, siempre dispuesto a compartirlo todo. Fran, por la ayuda en el tema de las comunicaciones. También Javi, con quien además de desayunos junto con los anteriores, he pasado muchas horas en clase, y a partir de ahora, 'no pararemos de crear'. También a M. Dolores, una magnífica persona que siempre ha estado a mi lado, dándome buenos consejos. A Juan Carlos, por la exhaustiva revisión del documento.

De mi época en el Dto. de Mecánica también me llevo muy buenos compañeros y de los que aprendí el maravilloso mundo de los materiales. Gracias en especial a Alberto.

And of course, not for being placed at the end of the acknowledgement it is less important, my especial thanks to professor Math Bollen, an important person in my personal and professional life. You have awaked in me an unstoppable interest on harmonics. This acknowledgement is also extended to my colleagues and friends from University of Luleå, and more concretely, Anders, Kai, Martin, Matts and Sarah. You all are one of the important pillars in this thesis. I have learnt as much as I know right now thanks to you. I will never forget my stay there for many reasons, you were really friendly with me, sharing all that you know and have, you even arranged all the lamps required for my measurements which ended up with the current thesis, and you supported me when I had to repeat the measurements over and over. *Tack så mycket.*

Abreviaturas

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
APFC	Active Power Factor Correction
CSD	Comisión para el Desarrollo Sostenible
DALI	<i>Digital Addressable Lighting Interface</i>
DDF	<i>Dimming Degree Factor</i>
DPF	Factor de potencia de desplazamiento
EMC	Compatibilidad electromagnética
EMI	Interferencias electromagnéticas
ERD	Energías renovables distribuidas
f.d.p.	Factor de potencia
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSL	Factor de Supervivencia de una Lámpara
GD	Generación distribuida
GEI	Gases de efecto invernadero
HF	Alta frecuencia
HID	Descarga de alta corriente
HII	Índice de Inclusividad Armónica
HIV	Valor de Inclusividad Armónica
HPS	Sodio de alta presión
IR	Infrarrojos
LED	Diodo emisor de luz
MAED	Modelo para el análisis de la demanda de energía
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OLED	Diodo emisor de luz orgánico
PCC	Punto de conexión común
PLC	<i>Power Line Communication</i>
RMS	Valor cuadrático medio
SCR	Rectificador controlado con semiconductores
SMPS	Fuente de alimentación conmutada
TDD	Distorsión total de la demanda
THDI	Distorsión armónica total de la corriente
THDV	Distorsión armónica total de la tensión
TIHD	Distorsión interarmónica total
TIC	Tecnologías de la información y comunicación
TSHD	Distorsión subarmónica total
WSM	<i>Weighted Sum Model</i>

Índice de figuras

Figura 1-1. Esquema del flujo de energía.....	2
Figura 1-2. Representación de una Smart Grid. Fuente [2].....	2
Figura 1-3. Factores que impulsan una transformación en el panorama actual.....	3
Figura 1-4. La figura de la izquierda muestra una iluminación completa, la figura central muestra el apagado parcial y la de la derecha muestra la iluminación atenuada. Fuente: [33].....	9
Figura 2-1. Distorsión de la corriente causada por una resistencia no lineal.	15
Figura 2-2. Cambio en el espectro armónico (percentil 95) antes y después del cambio a LED en una vivienda (Estrella roja=primeros 7 días, cuadrado azul= últimos siete días). Fuente [57].	20
Figura 2-3. Cambio en el espectro interarmónico (percentil 95) antes y después del cambio a LED en una vivienda (Estrella roja=primeros 7 días, cuadrado azul= últimos siete días). Fuente [57].	20
Figura 2-4. Evolución del espectro armónico para la caracterización de la agregación..	30
Figura 2-5. Representación en 3D de una serie de datos.....	33
Figura 2-6. Evolución temporal (en magnitud) de una serie de datos.	33
Figura 2-7. Evolución temporal (en tanto por ciento) de una serie de datos.....	34
Figura 3-1. Espectro de los armónicos de tensión en el punto de medida.....	37
Figura 3-2. Espectro de los armónicos de corriente de los dispositivos utilizados en el experimento.	37
Figura 3-3. Espectro de corriente tomado de diferentes tipos de lámparas fluorescentes. Fuente: [54].	38
Figura 3-4. Armónicos de corriente en el plano complejo (mA) de los dispositivos utilizados en el experimento.	39
Figura 3-5. Espectro armónico de corriente (A) de los estados probable y menos probable, para todos los escenarios.	40
Figura 3-6. Valores de los armónicos de corriente 3°, 5°, 7° y 9° (A) frente al tiempo....	41
Figura 3-7. Valores del ángulo de fase (grados) del 3° armónico de corriente frente al tiempo.....	42
Figura 3-8. Valores del ángulo de fase (grados) del 5° armónico de corriente frente al tiempo.....	43
Figura 3-9. Valores del ángulo de fase (grados) del 7° armónico de corriente frente al tiempo.....	44
Figura 3-10. Valores del ángulo de fase (grados) del 9° armónico de corriente frente al tiempo.....	45
Figura 3-11. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del máximo valor para cada escenario) para los diferentes estados.....	48
Figura 3-12. Valores de interarmónicos (porcentaje del valor máximo para cada escenario).....	50
Figura 3-13. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo para cada escenario).	51
Figura 3-14. 3° armónico de corriente en el plano complejo (mA).....	52
Figura 3-15. 5° armónico de corriente en el plano complejo (mA).....	53
Figura 3-16. 7° armónico de corriente en el plano complejo (mA).....	54
Figura 3-17. 9° armónico de corriente en el plano complejo (mA).....	55
Figura 4-1. Características de la lámpara y del balasto.	58

Figura 4-2. Tipos de balastos electromagnéticos para lámparas de baja frecuencia. Fuente [68].....	59
Figura 4-3. Esquema de conexiones en la luminaria.....	60
Figura 4-4. Representación temporal de la tensión y corriente a la entrada, corriente en el condensador, arrancador y lámpara.	60
Figura 4-5. Evolución de los armónicos impares (A y % FND) para la corriente de entrada, en el condensador, arrancador y lámpara.	61
Figura 4-6. Formas de onda de tensión y corriente durante 100 ms.	61
Figura 4-7. Evolución de la potencia activa frente al tiempo para las tres lámparas analizadas.	62
Figura 4-8. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas.	63
Figura 4-9. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas a partir del minuto 10.	64
Figura 4-10. Valores de los armónicos de corriente (A) para cada una de las lámparas estudiadas.	64
Figura 4-11. Espectro de los armónicos de corriente (A y %FND) para una lámpara con balasto electromagnético.	65
Figura 4-12. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta a la lámpara de sodio conectada a un balasto electromagnético en el rango 2-150 kHz.	66
Figura 4-13. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta a la lámpara de sodio conectada a un balasto electromagnético en el rango 2-9 kHz.	66
Figura 4-14. Valores de interarmónicos (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas.	67
Figura 4-15. Evolución de los interarmónicos de corriente (A) para cada una de las lámparas estudiadas.	68
Figura 4-16. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para una lámpara con balasto electromagnético.	68
Figura 4-17. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas.	69
Figura 4-18. Evolución de los armónicos de corriente (A y %FND) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.	71
Figura 4-19. Evolución de los armónicos de tensión (V y %FND) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.	72
Figura 4-20. Evolución de los interarmónicos de corriente (A) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.	72
Figura 4-21. Evolución en el plano complejo los armónicos de corriente (mA) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.	73
Figura 4-22. Evolución del valor eficaz de la tensión y corriente frente al tiempo con una, dos, y tres lámparas conectadas.	74
Figura 4-23. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para una, dos y tres lámparas conectadas a balastos electromagnéticos.	75
Figura 4-24. Evolución de los armónicos de corriente (A y %FND) para una, dos y tres lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.	75
Figura 4-25. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para una, dos y tres lámparas conectadas a balastos electromagnéticos.	76
Figura 4-26. Evolución los interarmónicos de corriente (A) para una, dos y tres lámparas conectadas a balastos electromagnéticos.	77
Figura 4-27. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo).	78

Figura 5-1. Bloques funcionales de un balasto electrónico. Fuente: [68].	80
Figura 5-2. Tensión y corriente a la entrada y a la salida del balasto electrónico con la lámpara al 100%.	82
Figura 5-3. Forma de onda de la corriente a la entrada y tensión a la salida del balasto para diferentes niveles de atenuación.	83
Figura 5-4. Espectro de los armónicos de corriente de una lámpara conectada a un balasto electrónico, alimentada con fuente puramente sinusoidal.	84
Figura 5-5. Espectro de los armónicos de tensión de una lámpara conectada a un balasto electrónico, alimentada con fuente puramente sinusoidal.	84
Figura 5-6. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco.	85
Figura 5-7. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco eliminando los 4 primeros minutos.	85
Figura 5-8. Valores de los armónicos de corriente para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco (porcentaje del máximo valor) eliminando los primeros 5 min.	86
Figura 5-9. Valores de los armónicos de corriente frente a la variación del nivel de potencia de arco para una lámpara con balasto electrónico.	87
Figura 5-10. Espectro de los armónicos de corriente (mA) y tensión (V) para una lámpara con balasto electrónico con diferente nivel de potencia de arco.	88
Figura 5-11. Espectro de los armónicos de corriente y tensión (%FND) para una lámpara con balasto electrónico con diferente nivel de potencia de arco.	88
Figura 5-12. Espectro en frecuencia frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 60%.	89
Figura 5-13. Espectro en frecuencia frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 76%.	90
Figura 5-14. Espectro en frecuencia frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 100%.	90
Figura 5-15. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta la lámpara en el rango 2-150 kHz para la lámpara al 60, 76 y 100%.	91
Figura 5-16. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta la lámpara al 100%- en el rango 2-9 kHz.	92
Figura 5-17. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco.	92
Figura 5-18. Valores de los interarmónicos de corriente frente a la variación del nivel de potencia de arco para una lámpara con balasto electrónico.	93
Figura 5-19. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para una lámpara con balasto electrónico con diferente nivel de potencia de arco.	93
Figura 5-20. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del máximo valor) para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco.	94
Figura 5-21. Valores de los armónicos de corriente no característicos frente a la variación del nivel de potencia de arco para una lámpara con balasto electrónico.	94
Figura 5-22. Espectro de los armónicos de corriente (mA) de todas las lámparas estudiadas.	95
Figura 5-23. Evolución de la forma de onda de la corriente (A) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electrónicos.	96
Figura 5-24. Evolución de los armónicos de corriente (mA y %FND) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electrónicos.	97
Figura 5-25. Espectro de los armónicos de corriente (mA) para diferentes combinaciones de lámparas.	98

Figura 5-26. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) de todas las lámparas estudiadas.....	99
Figura 5-27. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para diferente número de lámparas al 100% conectadas a balastos electrónicos.	99
Figura 5-28. Evolución en el plano complejo los armónicos de corriente (mA) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electrónicos.....	100
Figura 6-1. Formas de onda de tensión y corriente para la 1° lámpara LED.....	103
Figura 6-2. Evolución de la potencia activa para la 1° lámpara LED.....	104
Figura 6-3. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para la 1° lámpara LED.....	105
Figura 6-4. Espectro de los armónicos de corriente (mA y %FND) para la 1° lámpara LED.....	106
Figura 6-5. Espectro resultante de la corriente medida con agrupación en bandas de 200 Hz para la 1° lámpara LED. Intervalo de 2-150 kHz.	107
Figura 6-6. Espectro resultante de la corriente medida con agrupación en bandas de 200 Hz para la 1° lámpara LED. Intervalo de 2-9 kHz.	107
Figura 6-7. Corriente total en la lámpara LED (arriba) y versión filtrada de la misma (abajo) para la 1° lámpara LED.	108
Figura 6-8. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para la 1° lámpara LED.	108
Figura 6-9. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para la 1° lámpara LED.	109
Figura 6-10. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del máximo valor) para la 1° lámpara LED.....	109
Figura 6-11. Valores del plano complejo (mA) del 3°, 5°, 7° y 9° armónicos de corriente frente al tiempo para la 1° lámpara LED.	110
Figura 6-12. Formas de onda de tensión y corriente para la 2° lámpara LED.....	111
Figura 6-13. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para la 2° lámpara LED.....	111
Figura 6-14. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para la 2° lámpara LED.....	112
Figura 6-15. Evolución del orden armónico 17 (mA) para la 2° lámpara LED.....	112
Figura 6-16. Espectro de los armónicos de corriente (mA y %FND) para la 2° lámpara LED.....	113
Figura 6-17. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para la 2° lámpara LED.	114
Figura 6-18. Evolución de los interarmónicos de corriente (A) para la 2° lámpara LED.	114
Figura 6-19. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para la 2° lámpara LED.	115
Figura 6-20. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo) para la 2° lámpara LED.....	116
Figura 6-21. Valores del plano complejo (mA) del 3°, 5°, 7° y 9° armónicos de corriente frente al tiempo para la 2° lámpara LED.	116
Figura 6-22. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para dos lámparas LED.....	117
Figura 6-23. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.....	118
Figura 6-24. Espectro de los armónicos de corriente (mA y %FND) para cada LED individual y las dos simultáneas.	118

Figura 6-25. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.....	119
Figura 6-26. Evolución de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.....	120
Figura 6-27. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para dos lámparas LED.....	120
Figura 6-28. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.....	121
Figura 6-29. Valores del plano complejo (mA) del 3º, 5º, 7º y 9º armónicos de corriente para cada LED individual y las dos simultáneas.....	122
Figure 7-1. Comparison of harmonic current spectra.....	124
Figure 7-2. Comparison of interharmonic current spectra.....	124
Figure 7-3. Comparison of THDI among all the technologies within different frequency ranges.....	126

Índice de tablas

Tabla 2-1. Perturbaciones de la red.....	14
Tabla 2-2. Definición de armónicos.....	16
Tabla 2-3. Niveles individuales de compatibilidad para los armónicos de tensión en el sistema público de baja tensión según UNE-EN 61000-2-2 [66]......	27
Tabla 2-4. Límites para equipos de la clase C.	27
Tabla 2-5. Límites de armónicos de corriente según CEI 61000-3-4 [67].	28
Tabla 2-6. Exponentes suma para los armónicos.....	28
Tabla 3-1. Patrón de encendido/apagado de las cargas usadas en los experimentos.....	35
Tabla 3-2. Armónicos de corriente (A) ponderados sobre 3 minutos dependiendo del escenario y de las lámparas conectadas en ese instante	46
Tabla 3-3. Armónicos de corriente (A) ponderados sobre 3 minutos dependiendo del escenario y de las lámparas conectadas en ese instante	46
Table 7-1. Power quality parameter for the lamps.	123
Table 7-2. Total harmonic distortion for different frequency ranges.....	125

Índice de contenidos

Abstract	I
Resumen	II
Publicaciones derivadas directamente de esta tesis:.....	III
Agradecimientos	V
Abreviaturas	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XII
Índice de contenidos.....	XIII
1 Introducción.....	1
1.1. <i>Panorama de las redes eléctricas</i>	1
1.1.1. La importancia de la eficiencia energética	4
1.1.2. Consideraciones para la calidad en el suministro eléctrico	6
1.2. <i>Estado actual de la iluminación</i>	6
1.2.1. Infraestructura para una iluminación inteligente	10
1.3. <i>Motivación y resumen</i>	11
1.4. <i>Objetivos</i>	12
2 Materiales y métodos	13
2.1. <i>Introducción</i>	13
2.2. <i>La calidad de onda</i>	14
2.3. <i>Distorsión armónica, definiciones, interarmónicos y subarmónicos</i>	15
2.3.1. Distorsión armónica.....	17
2.3.2. Distorsión interarmónica.....	17
2.4. <i>Fuentes de armónicos</i>	18
2.5. <i>Impacto de los armónicos</i>	18
2.6. <i>Caracterización de la emisión armónica e interarmónica</i>	19
2.7. <i>Medida de armónicos e interarmónicos</i>	20
2.7.1. Medida del ángulo de fase de los armónicos	21
2.8. <i>Análisis de la forma de onda de los armónicos</i>	22
2.9. <i>Normativa</i>	26
2.10. <i>Caracterización de la agregación y su impacto</i>	29
2.11. <i>Representación de la evolución temporal</i>	31
3 Estudio en alumbrado de interior	35

3.1	<i>Descripción del experimento</i>	35
3.2	<i>Emisión individual de los dispositivos</i>	36
3.3	<i>Emisión de los estados probable y menos probable</i>	39
3.4	<i>Emisión en los diferentes estados</i>	41
3.4.1.	Evolución de la magnitud de los armónicos de corriente	41
3.4.2.	Evolución de los ángulos de fase de los armónicos de corriente	42
3.5	<i>Conexión y desconexión de equipos en los diferentes escenarios</i>	45
3.6	<i>Cambios en el espectro armónico</i>	47
3.7	<i>Cambios en el espectro interarmónico</i>	50
3.8	<i>Cambios en el espectro armónico no característico</i>	51
3.9	<i>Cambios en el plano complejo</i>	52
4	Estudio en alumbrado público con balastos electromagnéticos	57
4.1.	<i>Revisión histórica</i>	57
4.2.	<i>Principio de funcionamiento</i>	59
4.3.	<i>Experimento en laboratorio</i>	59
4.3.1.	Cambios en la potencia	62
4.3.2.	Cambios el espectro armónico	62
4.3.3.	Cambios en el espectro interarmónico	67
4.3.4.	Cambios en el espectro armónico no característico	69
4.3.5.	Agregación de lámparas	70
4.4.	<i>Experimento en Campus Universitario</i>	73
4.4.1.	Cambios en el espectro armónico	74
4.4.2.	Cambios en el espectro interarmónico	76
4.4.3.	Cambios en el espectro armónico no característico	77
5	Estudio en alumbrado público con balastos electrónicos	79
5.1.	<i>Revisión histórica</i>	79
5.2.	<i>Principio de funcionamiento</i>	80
5.3.	<i>Experimento en laboratorio</i>	81
5.3.1.	Cambios en la potencia	84
5.3.2.	Cambios en el espectro armónico	86
5.3.3.	Cambios en el espectro interarmónico	92
5.3.4.	Cambios en el espectro armónico no característico	94
5.3.5.	Agregación de lámparas	95
6	Estudio en alumbrado público con LED	101
6.1.	<i>Revisión histórica</i>	101

6.2.	<i>Principio de funcionamiento</i>	102
6.3.	<i>Experimento en laboratorio para un tipo de LED</i>	103
6.3.1.	Cambios en la potencia.....	103
6.3.2.	Cambios en el espectro armónico	104
6.3.3.	Cambios en el espectro interarmónico	108
6.3.4.	Cambios en el espectro armónico no característico	109
6.3.5.	Cambios en el plano complejo.....	110
6.4.	<i>Experimento en laboratorio para otro tipo de LED</i>	110
6.4.1.	Cambios en la potencia.....	111
6.4.2.	Cambios en el espectro armónico	112
6.4.3.	Cambios en el espectro interarmónico	113
6.4.4.	Cambios en el espectro armónico no característico	115
6.4.5.	Cambios en el plano complejo.....	116
6.5.	<i>Agregación de lámparas</i>	117
6.5.1.	Cambios en la potencia.....	117
6.5.2.	Cambios en el espectro armónico	117
6.5.3.	Cambios en el espectro interarmónico	119
6.5.4.	Cambios en el espectro armónico no característico	120
6.5.5.	Cambios en el plano complejo.....	121
7	Discussion	123
8	Conclusions and future work.....	127
8.1	<i>Conclusions</i>	127
8.2	<i>Future work</i>	129
9	Bibliografía	131
Anexo	137

1 Introducción

En este capítulo se analiza el estado actual de las redes eléctricas, haciendo mención expresa a Smart Grid, e incluyendo aspectos como la eficiencia y ahorro energéticos, así como el ámbito de la iluminación, con la infraestructura necesaria en la inteligencia de la misma. Además se incluye una introducción a la calidad de suministro eléctrico. Todos estos aspectos serán abordados en el desarrollo de la tesis.

1.1. Panorama de las redes eléctricas

En las próximas décadas, la incidencia de la electricidad en el consumo energético total en los países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) pasará a ser del 40% en 2020. En concreto, en el caso de España, este aumento de la demanda ha sido muy superior a las previsiones en los últimos años; de hecho, en algunas zonas se ha observado un incremento mucho mayor en la punta de verano que en la punta de invierno. Además, la actividad industrial y económica estará progresivamente gobernada por complejos y sensibles sistemas electrónicos e informáticos dependientes de una energía eléctrica con una alta fiabilidad y calidad de suministro. Por tanto, la red eléctrica deberá responder a todas estas futuras necesidades.

Las redes de transporte y de distribución se han construido para suministrar, de forma segura y eficaz, la energía generada en escasas y predecibles fuentes, situadas geoestratégicamente para dar servicio a millones de personas en todo el territorio. Sin embargo, este paradigma está cambiando debido a la incorporación de nuevas y diversas fuentes de energía en función de la fuente –y no de la demanda– y de nuevos requerimientos de demanda tanto en el sector industrial como en el sector residencial, derivados de la revolución digital actual. En todo el mundo se están produciendo dichos cambios, y España no es ajena a los mismos.

Hasta hace poco tiempo, las grandes centrales de generación producían energía eléctrica a costos mucho menores que los pequeños generadores. Sin embargo, el margen económico que existía entre ambas ha desaparecido, ya que las tecnologías de energías renovables han evolucionado notablemente, obteniéndose mejores rendimientos y abaratándose sus costes. Ello ha propiciado que puedan incorporarse pequeñas centrales de generación repartidas por la red de distribución, lo que reduce las pérdidas de energía en el transporte.

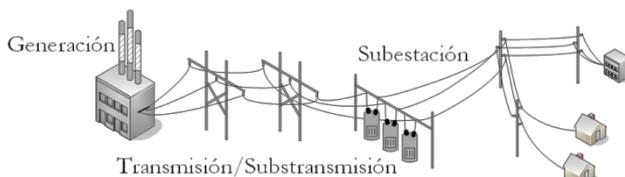


Figura 1-1. Esquema del flujo de energía.

La comisión europea [1] incide en el importante papel que deben desempeñar las TIC (tecnologías de la información y comunicación) no sólo en el aumento de la eficiencia energética, sino también en la gestión y el control de una red eléctrica cada vez más distribuida. Resulta además necesaria una potente red de comunicaciones paralela que permita el flujo bidireccional entre consumidor y el generador así como entre el agente distribuidor y el comercializador. Con esto se persigue garantizar la estabilidad y reforzar la seguridad, además de atender las nuevas demandas de los usuarios que exigen la aplicación de las tecnologías más avanzadas a los procesos de seguimiento y control.

Por lo tanto el camino a seguir se articula bajo un nuevo paradigma que podría ser denominado “Redes de Distribución Activas”. Redes inteligentes, *Intelligrids*, *Smart Grids* o *Wisegrids* son muestras de las diferentes iniciativas y enfoques que se están desarrollando alrededor del mundo. En España no hay que olvidar las iniciativas: *Denise* o *Futured*. Estos proyectos tratan de sentar las bases de las nuevas redes desde una perspectiva global. Por otra parte, una faceta de las nuevas redes que ya es una realidad es la teledistribución avanzada de los consumos, donde varias iniciativas están realizando despliegues masivos de medidores electrónicos (AMR, “*automated meter reading*”) con iniciativas como GAR o AVANDIS, en España, en la que ha participado la Universidad de Córdoba.

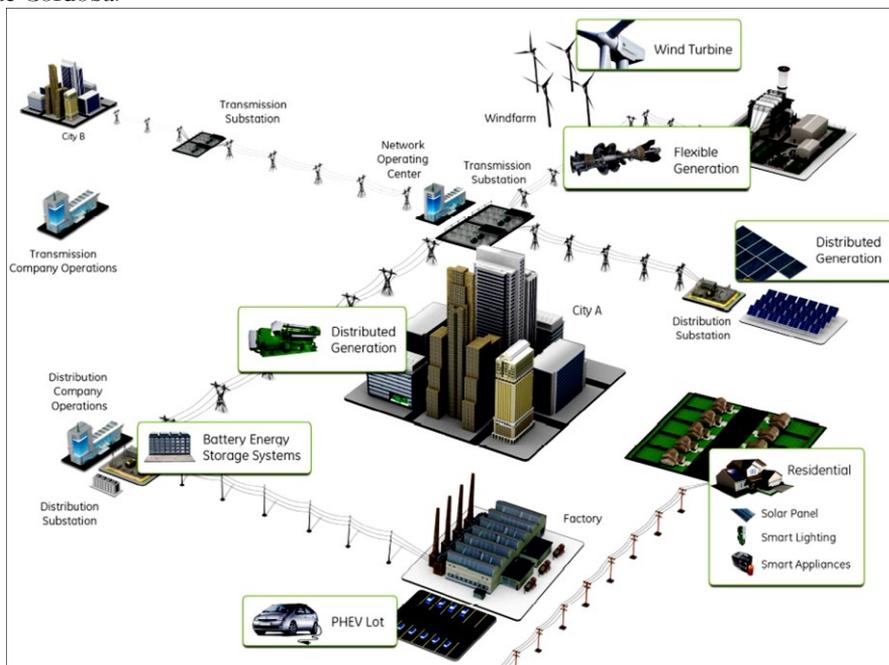


Figura 1-2. Representación de una Smart Grid. Fuente [2].

La voluntad de cambio de los diferentes colectivos que representan el mayor peso en cuanto a consumo de energía se refiere, el marco regulatorio y la evolución del progreso tecnológico configurarán la transformación del sector energético, siendo especialmente relevante el apoyo político y legislativo del Estado y de sus Autonomías, que incentive y priorice los fondos públicos de I+D+i, y facilite un marco regulatorio objetivo y estable para una implantación progresiva. Los principales factores que impulsan dicha transformación en el panorama actual se resumen en la Figura 1-3.

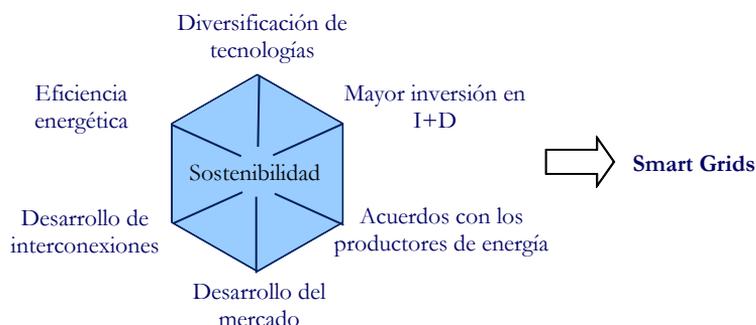


Figura 1-3. Factores que impulsan una transformación en el panorama actual.

En el sistema eléctrico tradicional, con grandes centrales, todas están interconectadas a través de la red de transporte. Es lo que se conoce como generación centralizada, es decir, un gran centro de producción de energía eléctrica que abastece grandes áreas, siendo la mayoría térmicas y consumiendo diferentes combustibles fósiles. Por otro lado se encuentra la generación distribuida (GD) correspondiéndose con pequeñas instalaciones situadas más cercanas a los puntos de consumo. Ésta incluye todo tipo de energías renovables así como otras instalaciones que, aun no siendo renovables, por sus dimensiones, pueden conectarse a la red de distribución. Dentro de este tipo de generación podemos distinguir entre diversas tipologías, dependiendo de su fin, y teniendo en cuenta el momento en el que se vierte la energía a la red de distribución: generación continua, que se utiliza para generar energía eléctrica continuamente, operando en paralelo con la red de distribución, tales como parques eólicos y centrales fotovoltaicas; generación gestionable, que aunque generalmente produce la energía de forma continua, tiene la posibilidad de suministrarla sólo en determinados periodos o cuando expresamente se le requiere; generación aislada, que aun no conectándose a la red general de distribución, sí puede alimentar sectores reducidos o microrredes; generación de apoyo a la red de distribución, dependiente de la empresa eléctrica, que utiliza de forma eventual o bien periódicamente cuando necesita reforzar su red, para lo que instala pequeñas plantas con conexión a red; merece mencionar las instalaciones de almacenamiento de energía, como por ejemplo los bombeos de agua a presa, que pueden dar lugar a la generación de apoyo antes señalada.

No existe una definición formal de la GD, aunque muchos autores han tratado de explicar el concepto. Así, podemos destacar las siguientes definiciones:

- Producción de electricidad con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico.
- Generación de energía eléctrica mediante instalaciones mucho más pequeñas que las centrales convencionales y situadas en las proximidades de las cargas.

- Producción de electricidad a través de instalaciones de potencia reducida, comúnmente por debajo de 1 MW.
- Sistemas de generación eléctrica o de almacenamiento, que están situados dentro o cerca de los centros de consumo.
- Producción de electricidad por generadores instalados, bien en el sistema eléctrico de la empresa, en el sitio del cliente, o en lugares aislados fuera del alcance de la red de distribución.
- Generación de energía eléctrica a pequeña escala cercana a la carga, mediante el empleo de tecnologías eficientes, destacando la cogeneración, con la cual se maximiza el uso de los combustibles utilizados.

Por lo tanto, podemos decir que la GD es la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de consumo, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética. En los últimos años, la GD basada en *Fuentes de Energía Renovables* (FER), lo que se ha venido a llamar *Energías Renovables Distribuidas* (ERD), han tomado mayor relevancia.

1.1.1. La importancia de la eficiencia energética

Es un hecho evidente que la temperatura de la Tierra está aumentando, y a finales de este siglo podría haber experimentado un aumento de temperatura de entre 1,4 °C y 5,8 °C. Las causas de este preocupante calentamiento son numerosas y se desconoce su efecto global, pero todos coinciden en que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que produce el ser humano son uno de los factores que más contribuyen al cambio climático. Las autoridades de todos los países están viéndose obligadas a tomar un papel protagonista en la reducción de estas emisiones y otros gases de efecto invernadero (GEI), para adaptarse a las exigencias del protocolo de Kyoto [3].

La eficiencia y el ahorro energéticos constituyen objetivos prioritarios para cualquier economía. Pueden conseguirse sin afectar al dinamismo de su actividad ya que mejoran la competitividad de sus procesos productivos y reducen tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como la factura energética. La elaboración de la estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4) [4] constituyó un nuevo eslabón que se unía a una larga cadena de actuaciones normativas, dirigidas todas ellas a la mejora del sistema energético español. Siguiendo esta línea, el 1 de abril de 2009 entró en vigor el reglamento de eficiencia energética en alumbrado exterior [5]. Según el Comité Español de Iluminación, el 60% de la factura municipal en energía eléctrica se corresponde al alumbrado público.

Para dar una idea orientativa en lo que se refiere a las repercusiones energéticas y ambientales, indicaremos como dato que se pueden cifrar entre 300 y 1.000 Kg de carbón mineral, los que todos los años dejarían de “quemarse” por cada kWh de energía eléctrica “ahorrada”. De esta forma se reducen proporcionalmente el consumo de las reservas energéticas del planeta, los residuos de transformación de la energía primaria, así como la saturación de redes y centrales evitando consecuentemente futuras ampliaciones. Además, por cada kWh evitado se estarían dejando de emitir a la atmósfera 600 toneladas de CO₂, por lo que también se contribuye a la reducción del efecto invernadero.

Se puede decir que son tres los factores que condicionan la sostenibilidad de nuestro modelo energético [6]: la disponibilidad de recursos para hacer frente a la demanda de energía; el impacto ambiental ocasionado por los medios utilizados para su suministro y consumo; y la enorme falta de equidad en el acceso a este elemento imprescindible para el desarrollo humano en la actualidad. Es esencial, por tanto, en primer lugar tener conocimiento del estado energético actual, y por otro la posibilidad de satisfacción de la demanda con ERD. Inicialmente este tipo de estudio energético se puede plantear con el exclusivo objetivo de conocer el consumo de una determinada zona, el estado de las infraestructuras, normativa y legislación relacionada, o el estado de las emisiones de GEI [7], [8], [9], [10] y [11].

Con una perspectiva más ambiciosa se sitúan los estudios que analizan la sostenibilidad de una determinada zona, y establecen unos “indicadores energéticos del desarrollo sostenible”. El esfuerzo internacional más importante desarrollado hasta la fecha ha quedado recogido en [12], en el que se definen un conjunto de los anteriores indicadores y las metodologías y directrices correspondientes.

En este sentido, también se han hecho estudios de análisis de sostenibilidad en grandes ciudades como es el caso de Londres [13], documento que usa el “*cherry-picking*” como técnica de agregación, realizando el análisis de decisión mediante multicriterio. También analiza la sostenibilidad desde el punto de vista del análisis del ciclo de vida, reuniendo para cada una de ellas un número diferente de indicadores. Es muy ilustrativo el trabajo realizado en la ciudad de Bangkok [14], donde tras establecer un número de indicadores, los analiza en base a técnicas de multicriterio tales como AHP (*Analytic Hierarchy Process*) o WSM (*Weighted Sum Model*). En [15] se analiza la sostenibilidad en Taiwán. Puede ser muy útil como referencia para extraer posibles indicadores de sostenibilidad. Otro de los informes más destacados se basa en la metodología de la Comisión para el Desarrollo Sostenible (CSD) [16]. Los resultados desprenden treinta y tres indicadores seleccionados, de los que trece son convenientes, doce parcialmente convenientes, tres requieren desarrollo y cinco son poco idóneos.

Destaca también [17] en el que se establecen tres áreas de indicadores, económica, social y ecológica, que definen la sostenibilidad. Para cada una de ellas da una serie de sub-indicadores hasta completar un total de doce. Plantea una serie de escenarios y con ayuda de MAED (Modelo para el análisis de la demanda de energía) predice el comportamiento futuro de la ciudad.

Por último, desde una tercera perspectiva se encuentran los estudios que realizan un análisis multicriterio basado en los indicadores anteriores para establecer, por ejemplo, en qué zona es más conveniente instalar una energía u otra. En [18] se analiza la sostenibilidad desde el punto de vista de la tecnología a implantar. Su objeto es el análisis de las diferentes vías de generación de energía, para lo que establece cinco indicadores de sostenibilidad y los aplica posteriormente a diez formas de generación energética. Plantea dos escenarios en base a la prioridad dada a cada indicador con respecto al resto. En [19] se explican las diferentes técnicas de multicriterio existentes para establecer qué método es más recomendable si el estudio es de planificación o de localización de energías renovables.

En la provincia de Córdoba se ha realizado un estudio [20] que engloba los tres anteriores enfoques. Dicho estudio es fruto de un convenio de colaboración entre la Universidad de Córdoba y la Agencia Provincial de la Energía de Córdoba. Los principales resultados se presentaron en [21], [22] y [23].

1.1.2. Consideraciones para la calidad en el suministro eléctrico

La calidad de servicio o calidad de suministro eléctrico engloba tanto la continuidad como la calidad de la prestación de este servicio. Hasta hace pocos años la principal preocupación de los consumidores de energía eléctrica era la continuidad del suministro o fiabilidad. Sin embargo, hoy en día, además de ésta, los usuarios demandan una calidad del producto. Un conjunto consistente de definiciones de calidad de onda se puede encontrar en [24].

De entre las perturbaciones en la red, las perturbaciones de forma permanente son las que especialmente se tratan en la presente tesis doctoral. Los armónicos son tensiones y corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (50 Hz en Europa, 60 Hz en América). A pesar de que el fenómeno de la presencia de armónicos en los sistemas de alimentación existe desde hace mucho, el problema se ha agravado recientemente debido principalmente al desarrollo de la electrónica y sus aplicaciones. La presencia de los armónicos se pone de manifiesto en la distorsión de la forma de onda, y fundamentalmente se debe a la existencia de cargas no lineales en el sistema.

En las redes eléctricas de las ciudades, los armónicos se producen por los rectificadores empleados en las fuentes de alimentación, accionamientos eléctricos y otras tecnologías ampliamente usadas en el ámbito de la eficiencia energética. Algunos de los efectos de la distorsión armónica en los equipos y elementos del sistema eléctrico son fallos de aislamiento de condensadores, sobrecalentamiento o envejecimiento del aislamiento. El resultado de una distorsión en la corriente es un factor de potencia (f.d.p.) menor de la unidad, lo que reduce la potencia máxima disponible e incrementa las pérdidas de distribución. Al igual que se han elaborado ciertos estudios sobre este tema [25], [26], la evaluación de las pérdidas de potencia en las condiciones de funcionamiento no sinusoidales se han analizado en [27]. Una baja calidad de onda es un problema porque gasta energía, reduce la capacidad eléctrica, y puede dañar el equipo y el sistema de distribución eléctrico en sí mismo.

El incremento en la cantidad de dispositivos electrónicos no ha ido acompañado, en la mayoría de los casos, por una mejora en la calidad de los diseños, de forma que muchos de ellos, además de ser extremadamente sensibles a las perturbaciones existentes en la red, se comportan como importantes generadores de las mismas. Como se debe reconocer, la calidad de onda es una responsabilidad compartida entre las autoridades competentes (Administración), el distribuidor, los fabricantes de aparatos y receptores, y finalmente el usuario.

1.2. Estado actual de la iluminación

La iluminación juega un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico contemporáneo. En concreto, en Europa representa en torno al 14% del consumo de electricidad. Aproximadamente dos tercios de los sistemas instalados utilizan tecnologías anticuadas e ineficientes, lo que significa que existe un enorme potencial para renovar el alumbrado y reducir significativamente el consumo de energía. Por otro lado, es de mencionar que la tecnología está evolucionando hacia sistemas de alumbrado cada vez más eficientes energéticamente. De entre los diferentes tipos de iluminación, el subsector del Alumbrado Público lo constituyen la iluminación de carreteras, viales, calles y el alumbrado ornamental, siendo ésta la de mayor peso con respecto al uso de

energía de una ciudad, y el mantenimiento y funcionamiento los mayores gastos para cada ciudad.

En el 2005 el consumo de energía eléctrica final fue de 35 TWh para los países de la Unión Europea, lo que representa casi el 1,3% del consumo de energía final de la electricidad en estos países. De hecho, según el plan de acción para la eficiencia energética [1], la quinta parte aproximadamente del consumo mundial de electricidad se dedica a la iluminación, por lo que el potencial de ahorro es muy elevado. La adopción de la tecnología de diodos emisores de luz (LED), muy eficiente y ya disponible en el mercado, podría reducir en un 30% el consumo actual de aquí a 2015 y hasta en un 50% para 2025.

Por su parte, la legislación medioambiental es cada vez más exigente, elevando los requisitos relativos a la eficiencia energética en la iluminación de edificios y el alumbrado urbano, además de potenciar la gradual eliminación de las lámparas que resulten más contaminantes. Las alternativas energéticamente eficientes pueden llegar a reducir el consumo de energía hasta un 60%, lo que supondría un ahorro de millones de euros en costes de funcionamiento para Europa y una reducción de las emisiones de CO₂ de hasta 3,5 millones de toneladas al año, lo que equivaldría al consumo de CO₂ de 175 millones de árboles, al consumo anual de 14 millones de barriles de petróleo o a la producción anual de dos centrales eléctricas. Todo esto ayudaría a Europa a dar un paso adelante a la hora de conseguir la reducción de emisiones de CO₂ acordadas en el protocolo de Kyoto [28], y que establecen como objetivo la reducción de las mismas en un 20% antes del año 2020.

Antes de presentar las principales propuestas para la mejora de la eficiencia en la iluminación, es necesario definir los principales componentes del punto de luz. Un punto de luz está constituido por luminaria, lámpara y equipo auxiliar de encendido. La definición de luminaria, aceptada internacionalmente y proporcionada por la norma UNE-EN 61000-3-2 [29], es la de un “aparato que distribuye, filtra o transforma la luz emitida por una o más lámparas, y que incluye todos los componentes necesarios para fijarlas y protegerlas y, donde proceda, los equipos auxiliares, así como los medios necesarios para la conexión eléctrica de alimentación”. Las luminarias son necesarias para aumentar la superficie aparente de emisión, evitando molestias visuales (deslumbramientos); y por otra parte, son imprescindibles para apantallar las lámparas y protegerlas de los agentes exteriores como la lluvia, polución, salinidad, temperaturas extremas o viento; así como para que dirijan el flujo en la forma más adecuada a la tarea visual.

El término lámpara viene definido en la norma UNE-EN 61000-3-2 [29] como “fuente que produce luz”, y existen varias formas de producir dicha luz obteniéndose las distintas fuentes de iluminación, bien calentando cuerpos sólidos hasta alcanzar su grado de incandescencia (fundamento de las lámparas incandescentes- convencional y halógena) bien provocando una descarga eléctrica en el seno de un gas (mercurio y sodio, ambas de baja y alta presión); o bien provocando una descarga en un cuerpo sólido (LED).

Las lámparas de descarga de alta corriente (HID) y las lámparas en estado sólido no pueden conectarse directamente a la red y necesitan a veces una ayuda al encendido. Por lo tanto, es necesario un equipo auxiliar asociado al punto de luz según el tipo de alumbrado de que se trate. Los componentes o accesorios de los equipos auxiliares para alumbrado pueden ser muy variados según su aplicación. Por lo general, el equipo

auxiliar de encendido se compone de balasto, condensador, y arrancador en caso de que sea necesario. Comúnmente al equipo auxiliar se le conoce como balasto, definiéndose éste en la norma UNE-EN 61000-3-2 [29], como “dispositivo conectado entre la alimentación y una o más lámparas de descarga y cuya función principal es limitar la corriente de la(s) lámpara(s) a los valores requeridos. Puede incluir medios de transformación de la tensión o frecuencia de la fuente, de corrección del factor de potencia y, sólo o en combinación con dispositivos de arranque, de proporcionar las condiciones necesarias para el encendido de la(s) lámpara(s).”

Una vez definidos los principales componentes, se pueden concretar los avances producidos en los últimos años encaminados a la obtención de una iluminación eficiente [30] como:

- Mejoras en la tecnología de la lámpara que han llevado a mayores eficiencias, mejor color y una vida más larga.
- Mejoras en los balastos electrónicos que han proporcionado a las lámparas fluorescentes un funcionamiento sin *flicker*, vida más larga, y un arranque más rápido.
- Avances en la suavidad del arranque y de funcionamiento con menor ruido.

Podrían conseguirse otras mejoras si a las lámparas eficientes se les añaden capacidades de detección y actuación, de manera que pudieran ajustarse automáticamente (p.ej., a la luz natural o a la presencia de personas): es la *iluminación inteligente*. Además, los diodos emisores de luz orgánicos (OLED) constituyen una tecnología prometedora desde el punto de vista energético y ambiental, ya que su disponibilidad para fabricarse con materiales flexibles crea una amplia gama de posibilidades creativas aunque aún en fase de desarrollo.

El coste que conllevan los sistemas de iluminación viene determinado por tres parámetros: inversión inicial, coste de la energía y coste de mantenimiento; por lo que actuando en cada uno de ellos podremos disminuir el enorme gasto vinculado a la iluminación. Tradicionalmente, los métodos utilizados para el ahorro de energía se reducían al *apagado total* de las instalaciones a una determinada hora o al apagado de uno de cada dos puntos del alumbrado (regulación a flujo nulo). En su momento se llevaron a cabo numerosos estudios [31], [32] que analizaban el estado de la iluminación vial y de las carreteras. Razones tan diversas como la seguridad ciudadana, la estética nocturna de nuestras ciudades y pueblos o alcanzar los niveles de uniformidad requeridos, hacen estas prácticas poco recomendables.

Otro planteamiento es el *apagado parcial*. Con éste lo que se consigue es reducir el consumo apagando parte de las luminarias durante un periodo de tiempo determinado, siendo el ahorro conseguido directamente proporcional al número de luminarias apagadas. Esto se llevaba a cabo instalando algunas veces dobles circuitos eléctricos de alimentación de los puntos de luz, otras efectuando el apagado manual mediante la retirada de fusibles, o instalando luminarias bi-lámpara y apagando una de ellas. Aunque el sistema es efectivo, su mayor inconveniente es la pérdida de uniformidad lumínica, se producen zonas oscuras que pueden afectar tanto a la visibilidad como a la seguridad, por lo que en la actualidad están prácticamente descartados. Además, en las situaciones donde siempre se apagan las mismas luminarias existe una disparidad en la vida de las lámparas. Por estos motivos se desarrollaron los interruptores horarios astronómicos con circuitos alternativos, de forma que cada día alternaba el circuito a apagar [28].



Figura 1-4. La figura de la izquierda muestra una iluminación completa, la figura central muestra el apagado parcial y la de la derecha muestra la iluminación atenuada. Fuente: [33]

Otro inconveniente de esta solución es que el Factor de Supervivencia de una Lámpara (FSL) de descarga se ve influenciado de manera negativa por el número de ciclos de apagado y encendido durante su vida útil, debido al pico de alta tensión que el arrancador genera al encender la lámpara; por lo que si se dobla el número de ciclos, en el caso de apagar a una elevada hora de la noche y encender al llegar la mañana, la vida útil normal de una lámpara de descarga se ve acortada en un 30%.

En el artículo [34] se propone otra medida de ahorro, reducir el nivel luz. Sin embargo, debido a la necesidad de mantener la uniformidad, sólo son aceptables dos métodos de control de la iluminación; por un lado luminarias con dos lámparas, una que se apague a altas horas de la noche y a primeras horas de la mañana en el caso de que sea aceptable la reducción en el nivel de iluminación; y luminarias con una única lámpara aplicada en combinación con un sistema de atenuación de flujo (*dimming* en inglés), con los cuales se consiguen importantes ahorros energéticos [35], presentando una inversión económicamente justificada. Este último método tiene dos opciones prácticas: el uso de balastos con atenuación paso a paso con el que se consigue una regulación punto a punto, y el uso de sistemas de control centralizados como es el caso de reguladores de tensión de línea.

Como una parte fundamental de *Smart Grid* encontramos el conocido como *Smart Lighting*, con lo que se podrán obtener importantes beneficios como menores costes de mantenimiento, una seguridad mejorada, menor contaminación lumínica, y un ambiente mejorado.

En resumen, la tendencia actual es la orientación hacia la telegestión. El sistema de telegestión es un producto destinado a realizar las funciones de analizador de medida y detección de averías punto a punto, así como la gestión a distancia de los mismos con la consecuente posibilidad de interactuar con las lámparas [28]. Por tanto, estamos ante la presencia de controles bidireccionales. Para un sistema de este tipo, el balasto envía y recibe información a/de un SCADA, donde se puede tratar posteriormente la información sobre el estado de la iluminación. Además, esta tecnología de red y automatización permite al sistema de iluminación reaccionar de forma inteligente a parámetros externos como pueden ser la densidad del tráfico, el nivel de iluminación que queda, la existencia de accidentes, el estado meteorológico, u otros parámetros locales (por ejemplo, distancia a los postes, flujo luminoso de las lámparas, reflejo de la carretera, posición de la luminaria instalada, sombras, etc.) con lo que se consigue compensar el factor de mantenimiento de la lámpara.

Su objetivo principal es conocer desde un puesto central y unidades móviles del servicio técnico los principales parámetros de los cuadros de alumbrado así como ciertas

situaciones que puedan requerir asistencia o conocimiento técnico inmediato, lo que redundaría en evitar consumos excesivos no deseados por averías y menor tiempo de reparación por lo que se abaratarían los costes de mantenimiento. Igualmente este conocimiento “*on line*” permite un mejor reajuste de los parámetros eléctricos, consiguiendo optimizar los consumos. También permite obtener estadísticas de consumos, vida de lámparas, componentes o anomalías; con la consecuente buena elección de una sustitución individual dentro de un grupo. Estos sistemas son idóneos para cualquier instalación de alumbrado exterior ya que el paulatino deterioro de dichas instalaciones solamente puede paliarse mediante un idóneo mantenimiento preventivo y correctivo. Se consigue además una reducción de la contaminación lumínica a través de la regulación de los niveles de iluminación.

Además del ahorro de energía derivado de la optimización del mantenimiento, se obtiene el derivado de la regulación del nivel luminoso; en concreto, con la utilización del balasto electrónico se consigue un ahorro de energía del 13%; con el nivel constante de iluminación un ahorro del 8% (independientemente de las horas de funcionamiento de la lámpara) y además se incrementa la vida de la lámpara en un 30%. Con todo, se estima un ahorro energético total del 50%.

1.2.1. Infraestructura para una iluminación inteligente

La comunicación con los controles de iluminación requiere el uso de protocolos. Normalmente, los protocolos de comunicaciones requieren un conjunto separado de cableado para las comunicaciones, lo que añade un cierto coste al sistema de control de la iluminación. Con la abundancia actual de protocolos de comunicaciones, es difícil desarrollar una propuesta de todo el sistema que sea compatible con todos los componentes. Los protocolos abiertos más comunes en la industria de la iluminación son BACNet [36], [37], DMX-512, LONWorks, X-10 y DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) [38], [39].

Desde los primeros usuarios que realizaban monitorización de la iluminación pública hasta los fabricantes de balastos de hoy día, han adoptado soluciones basadas en LONWorks ya que es una tecnología abierta, robusta, suficientemente probada, trabaja sobre la tensión de alimentación (por lo que elimina el problema del coste por cableado añadido), ofrece interoperabilidad y flexibilidad. Otra ventaja es que soporta un gran número de dispositivos lo que hace más fácil la integración con la gestión del tráfico y sistemas de información geográfica, lo que además permite aplicaciones de monitorización, control, medida y diagnóstico que pueden solventar la cuestión económica derivada del funcionamiento de los sistemas de iluminación pública.

La tecnología que poseen los balastos electrónicos destinados a alumbrado público usados en la tesis es DALI [40]. Entre las ventajas que ofrece encontramos la posibilidad de direccionamiento punto a punto, el conocimiento de datos de la lámpara porque se pueden mandar datos a/desde la lámpara. Además, el inconveniente que en principio posee DALI por la necesidad de añadir cableado a cada balasto se ha solventado utilizando un sistema inalámbrico [41], [42], [43], [44].

Entre los diversos ejemplos que encontramos de telegestión llevados a cabo en ciudades, encontramos el caso de Oslo [45], en la que se necesitaba una solución de iluminación pública que cumpliera las directivas europeas y mundiales de reducir tanto el uso de energía como las emisiones de CO₂. Se pretendía además disminuir los costes de funcionamiento, asegurar la seguridad de peatones y conductores, y permitir el control y

monitorización remotos. Entre las medidas que se llevaron a cabo se encontraba la sustitución de balastos mecánicos en sus 55.000 luminarias por electrónicos que comunicaban sobre la línea de tensión existente. El sistema servía para monitorizar y controlar las luces, atenuarlas en función del tráfico, tiempo y luz disponible, además de analizar el comportamiento de las lámparas e identificar fallos en las mismas. Entre otros, se consiguió reducir el consumo en un 62%.

Otro ejemplo lo encontramos en la ciudad de Milton Keynes [46] donde se actualizó el sistema de iluminación por uno monitorizado basado en la tecnología LONWorks. El nuevo sistema usaba lámparas con menos potencia, ofrecía luz de más calidad, y también comunicaba sobre la línea de alimentación existente. Mediante el Servidor de Internet iLON 100 se conseguía monitorizar y controlar las lámparas, atenuarlas de forma automática basadas en los mismos parámetros que en el caso de la ciudad de Oslo. En este caso los ahorros fueron del 40%.

1.3. Motivación y resumen

Dos aspectos principales como el hecho de que el consumo de energía mundial ha aumentado un 30% en los últimos 25 años, unido al continuo crecimiento en el coste de la energía, han llevado a considerar la iluminación como una gran área de ahorro económico y energético. Una oportunidad para ahorrar electricidad es mediante actualizaciones tecnológicas que suponen provechosos ahorros energéticos, reducción de emisiones, ahorros de coste de mantenimiento procedentes de la sustitución de los anteriores sistemas, así como altos niveles de iluminación para la mejora del confort. Además, en el caso del alumbrado público, se mejoran las anteriores ventajas con la implementación de sistemas inteligentes que ayudan a gestionar los sistemas de iluminación.

Por otro lado, la iluminación también afecta a la calidad de onda del sistema eléctrico de distribución. Actualizar y mejorar un sistema de iluminación desde la perspectiva de la calidad del suministro eléctrico puede mejorar la calidad global de la red de distribución. Además, esto contribuirá a mejorar la eficiencia de los equipos de iluminación, lo que supondrá una reducción del uso de la capacidad de energía eléctrica transportada.

En el primer capítulo se introducen los temas tratados en la presente tesis, analizando por un lado el estado actual de las redes eléctricas e incluyendo temas como la eficiencia y ahorro energéticos; así como el ámbito de la iluminación, con la infraestructura en la dotación de inteligencia de la misma. Además se incluye una introducción a la calidad de suministro eléctrico.

El capítulo 2, materiales y métodos, recoge las definiciones de los parámetros estudiados a lo largo de esta tesis, normativa, formas de medida, caracterización armónica e interarmónica, así como la agregación de cargas.

Los capítulos 3, 4, 5 y 6 reúnen los distintos experimentos realizados en alumbrado incluyendo de interior (en el capítulo 3), y de exterior (capítulos 4 y 5). En ellos se recoge la descripción de los experimentos así como los resultados de calidad de suministro obtenidos en los mismos incluyendo el estudio armónico e interarmónico a través de magnitudes y ángulos de fase. El estudio armónico se ha realizado hasta 150 kHz en el caso de las lámparas para alumbrado público. También se ha hecho uso de los valores complejos de los armónicos, así como el análisis de las variaciones temporales de

los anteriores parámetros. Finalmente también se recoge el estudio de la agregación armónica resultado de la conexión de diversas fuentes de iluminación.

El capítulo 7, recoge una discusión y comparación de los experimentos realizados e incluidos en los capítulos anteriores. Y las conclusiones se reflejan en el capítulo 8.

1.4. Objetivos

El principal objetivo de esta tesis es el estudio y caracterización de la calidad de suministro eléctrico en los sistemas de alumbrado, incluyendo de interior y exterior. Además, se listan a continuación otros objetivos secundarios:

- Realizar una comparación en el ámbito de la calidad de suministro entre las distintas tecnologías de iluminación. Se incluye el estudio armónico (hasta 150 kHz) e interarmónico.
- Analizar las ventajas y desventajas del uso de balastos electrónicos para sustitución de los magnéticos, y compararlo con los LED.
- Manifiestar el potencial existente de la estrategia de control dinámica en los ahorros energéticos de iluminación con respecto a otros métodos tradicionales, como se ha realizado en otras áreas de la iluminación. Asimismo evaluar el impacto que posee el control de la atenuación en la calidad de suministro de la red.
- Estudio experimental del efecto que puede tener la existencia de cargas agregadas en la calidad de suministro global de la red, particularmente el tema del impacto que produce una masificación de armónicos de múltiples lámparas de interior y exterior.
- Estudio y evaluación de los índices estadísticos de calidad de suministro más adecuados para su integración en alumbrado de interior y exterior, valorando las posibilidades de los sistemas de control para la integración de parámetros estadísticos cuantitativos y cualitativos de calidad de suministro del sistema.

2 Materiales y métodos

En este capítulo se tratan los conceptos que posteriormente se utilizarán en los siguientes capítulos, como es el caso de la calidad de onda y sus perturbaciones. Tal es el caso de la distorsión armónica e interarmónica, de las que además se identifican las fuentes y sus impactos. Se especifica la normativa que hace referencia a los límites de los anteriores conceptos, el método seguido para la medida de armónicos e interarmónicos, así como el concepto de la agregación armónica.

2.1. Introducción

El término anglo-norteamericano “*power quality*” se equipara indistintamente a calidad de potencia, calidad de energía o calidad de suministro y engloba un conjunto de requisitos y exigencias de carácter variado. En Estados Unidos el término más usado es el de calidad de potencia; mientras que en Europa y más concretamente en el caso de España, se usa el de calidad de servicio. Este viene configurado por el siguiente contenido [47]:

- Continuidad del suministro, relativa al número y duración de las interrupciones del suministro.
- Calidad del producto, relativa a las características de la onda de tensión.
- Calidad en la atención y relación con el cliente, relativa al conjunto de actuaciones de información asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación.

Por tanto, la calidad de servicio o calidad de suministro eléctrico engloba tanto la continuidad como la calidad de la prestación de este servicio. Hasta hace pocos años la principal preocupación de los consumidores de energía eléctrica era la continuidad del suministro o fiabilidad. Sin embargo, hoy en día, además de ésta, los usuarios demandan una calidad del producto que, en el caso de España, sigue los criterios establecidos en la norma UNE-EN 50160 [48].

La calidad del producto, o calidad de onda como a partir de ahora se usará en el texto, involucra a las empresas del sector eléctrico a diferentes niveles, generación, transmisión y distribución, así como a clientes finales y fabricantes de equipos. Muchos países industrializados han establecido normas que limitan el contenido de las perturbaciones en los sistemas eléctricos, dando especial importancia a algunos sectores y componentes involucrados. En las normas se han determinado responsabilidades de todas las partes afectadas, tanto suministradores como clientes.

En definitiva, una baja calidad de onda supone un problema porque conlleva un gasto de energía, una pérdida de rendimiento en la mayor parte de cargas convencionales, una sobrecarga de las redes de transporte y pérdidas económicas por falta de producción. Por tanto, con el fin de conservar las características esenciales de la

red, será necesario conservar la forma sinusoidal de la tensión, desde su producción hasta los receptores finales, pasando por la distribución.

2.2. La calidad de onda

La forma de onda ideal de la tensión de red es una función sinusoidal del tiempo con frecuencia y amplitud constantes, y en concreto, una red de alimentación industrial está formada por un sistema trifásico de conductores, alimentados por tensiones sinusoidales desfasadas 120°. De hecho, el comportamiento ideal de esta red debería ser como una fuente de tensión sin impedancia interna, con salida sinusoidal y tensión constante en todos los puntos del suministro.

En la actualidad existen diversos tipos de cargas conectadas a la red entre las que se encuentran las lineales y no lineales. En términos muy simples se puede decir que las cargas de tipo lineal originan corrientes también sinusoidales con igual frecuencia, aunque pueda existir un desfase entre tensión y corriente. Sin embargo, cada día es más común la existencia de productos electrónicos con elevada fiabilidad y bajo coste que pueden representar cargas distorsionantes, también conocidas como no lineales, desde un punto de vista del sistema eléctrico. Se caracterizan por producir en la red eléctrica corrientes distorsionadas que, cuando tienen una amplitud considerable, y en función de la impedancia de la red, modifican la forma de la onda sinusoidal de tensión.

La presencia de estos equipos en la red hace que se produzcan perturbaciones en la misma, por lo que este problema está directamente relacionado con la calidad de onda. En la Tabla 2-1 se muestran las principales perturbaciones de acuerdo al parámetro afectado. Dichas perturbaciones pueden verse afectadas de forma transitoria, es decir, sin ninguna cadencia de repetición determinada y entre las que destacan los picos y huecos entre otros, o de forma permanente como es el caso de los armónicos, *flicker*, sobretensiones y desequilibrio.

Tabla 2-1. Perturbaciones de la red.

Parámetro afectado	Tipo de perturbación
Amplitud	Ruidos en modo diferencial y modo común Impulsos en modo diferencial y modo común Variaciones lentas de tensión Variaciones rápidas de tensión <i>Flicker</i> Microcortes Cortes largos
Forma de onda permanente	Armónicos (distorsión)
Frecuencia	Variaciones de frecuencia
Simetría	Desequilibrios (asimetría)

Antes de tomar cualquier medio efectivo que corrija los problemas de calidad de onda, es necesario que primero se analicen y evalúen. Se hace, por tanto, necesario establecer una serie de definiciones, estándares y metodologías de evaluación de las perturbaciones eléctricas. Generalmente, los índices de calidad de onda, como otros índices en la ingeniería, son una integración de información; una compresión de información en un único parámetro; sin embargo, éstos pueden ocultar algo más allá de lo que muestran [49]. Se han definido así diversos tipos de índices de calidad de onda, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, dependiendo del propósito de la aplicación. En el dominio del tiempo se ha definido el valor de factor de pico;

mientras que en el dominio de la frecuencia se han definido índices como la distorsión armónica total y el factor K.

Con respecto a la calidad de onda en el alumbrado, la investigación realizada en [50] puso en evidencia que se produce un aumento gradual en la distorsión de la tensión al encender las luces de una ciudad, y al contrario, disminuye la distorsión de la misma al apagar las lámparas. Varios trabajos han valorado el impacto producido en las lámparas fluorescentes sobre la distorsión de la tensión, mientras que existen muy pocas referencias del impacto en las lámparas de descarga empleadas en alumbrado público [51].

Entre las soluciones propuestas a este problema se puede mencionar la renovación del equipo de iluminación por otro con mejor calidad de onda (alto f.d.p. y baja distorsión armónica), con lo que se puede mejorar la calidad de onda del sistema eléctrico general. Además, al renovar el equipo de iluminación por otro de menor potencia o mejor rendimiento se libera capacidad eléctrica, hecho que justificaría el coste de la renovación del sistema de iluminación.

2.3. Distorsión armónica, definiciones, interarmónicos y subarmónicos

En este apartado se define distorsión armónica, así como los armónicos de manera general. Posteriormente, en 2.3.1 y 2.3.2 se analizarán en detalle la distorsión armónica e interarmónica respectivamente.

La distorsión armónica no es un nuevo fenómeno, sino que en la bibliografía de los años 1930 y 1940, aparecen numerosos artículos sobre este tema. En esa fecha, las principales fuentes de armónicos eran los transformadores, pero pronto se añadieron los relativos a las lámparas de arco.

La fuente más común de distorsión armónica es la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico. Un dispositivo no lineal es aquel en el que la corriente no es proporcional a la tensión aplicada. La Figura 2-1 muestra este concepto. Mientras que la tensión aplicada es perfectamente sinusoidal, la corriente resultante está distorsionada, y un pequeño incremento de la tensión puede provocar que la corriente se duplique y adquiera una forma de onda diferente.

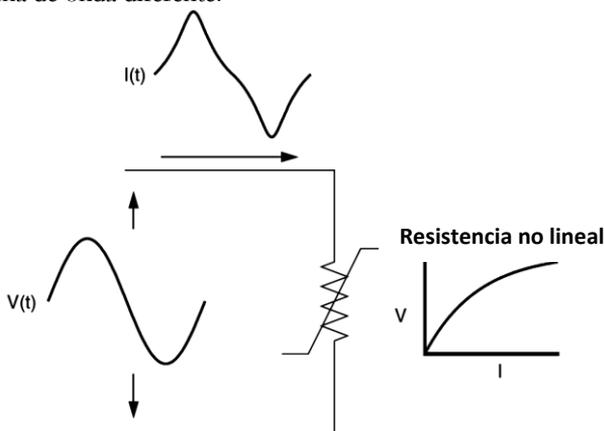


Figura 2-1. Distorsión de la corriente causada por una resistencia no lineal.

Además, estas mismas corriente armónicas, al atravesar la impedancia interna de los generadores, dan lugar a tensiones armónicas que se añaden a, o se restan de, las tensiones fundamentales generadas por la red de alimentación del distribuidor de energía eléctrica. La tensión deja de ser sinusoidal, siendo ésta común a los demás receptores de la red.

En muy pocos casos la distorsión es aleatoria, por contra, en la mayoría presenta una cierta periodicidad, o es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Esto significa que la forma de onda de la corriente es casi la misma después de cada ciclo, o a lo sumo, cambia muy lentamente.

Las propiedades típicas de las cargas no lineales son también válidas para los equipos de iluminación [52]: la corriente instantánea no es proporcional a la tensión instantánea; la impedancia de la carga no es constante y cambia con la tensión; en cada valor máximo de la tensión, tiene lugar un pulso de corriente; incluso si la forma de onda de la tensión es sinusoidal, la forma de onda de la corriente es no sinusoidal; difiere el cociente entre el valor máximo y el valor eficaz de la corriente; y la ecuación de carga se representa mediante una función no lineal.

Los armónicos e interarmónicos de una forma de onda se pueden definir en términos de sus componentes espectrales en el estado cuasi-estacionario sobre un rango de frecuencias. La Tabla 2-2 muestra una simple pero efectiva definición matemática (f_1 es la frecuencia fundamental):

Tabla 2-2. Definición de armónicos.

Armónico	$f=h*f_1$ donde h es un entero positivo
DC	$f=0$ Hz ($f=h*f_1$ donde $h=0$)
Interarmónico	$f\neq h*f_1$ donde h es un entero positivo
Subarmónico	$f>0$ Hz y $f<f_1$

El término subarmónico no tiene ninguna definición oficial, pero es simplemente un caso especial de interarmónico para componentes de frecuencia menores que la frecuencia del sistema.

En los sistemas eléctricos no todos los armónicos se presentan en la misma proporción. Por este motivo, entre los armónicos se distingue entre armónicos característicos y no característicos. En nuestro caso el grupo de los no característicos agrupa tanto los armónicos de orden par como los interarmónicos; y los característicos todos los demás.

A menudo se distingue entre las perturbaciones armónicas, llamadas perturbaciones de bajas frecuencias (hasta 9 kHz) y las perturbaciones electromagnéticas o perturbaciones de altas frecuencias (desde 9 kHz a 150 kHz). Existe, por tanto, diferente normativa tanto para la medida de los mismos, así como para los límites que pueden alcanzar como máximo [29].

Aunque los armónicos de orden más alto no suelen considerarse en el análisis de los sistemas de potencia, cada vez existe un mayor interés en el rango 2-150 kHz por la cantidad de dispositivos que contienen electrónica de potencia. Además, se está extendiendo por toda Europa la instalación de medidores inteligentes o teledidores, los cuáles envían lecturas de consumo a través de *Power Line Communication* (PLC), que usan frecuencias en el rango 3-148,5 kHz, lo que podría repercutir en un funcionamiento indebido de dicha tecnología. El estudio realizado en [53] manifiesta que el uso de PLC en las redes de baja tensión provocará la circulación de elevadas

corrientes hacia los dispositivos electrónicos debido a la baja impedancia de los mismos en el rango de frecuencias de trabajo del PLC. Por este motivo, en la presente tesis se ha estudiado el contenido armónico tanto a bajas como a altas frecuencias.

2.3.1. Distorsión armónica

Los armónicos se definen como tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia de suministro [54]:

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^H I_h \sqrt{2} \text{sen}(h\omega t - \beta_h) \quad (1-1)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^H V_h \sqrt{2} \text{sen}(h\omega t - \alpha_h) \quad (1-2)$$

siendo $\omega = 2\pi f_0$ la pulsación de la frecuencia de red, f_0 la frecuencia fundamental (50 Hz en España), I_0 y V_0 las componentes de continua, I_h y V_h el valor eficaz del armónico h de tensión o corriente, α y β los ángulos de los armónicos de tensión y corriente. El valor de H en el sumatorio es infinito para una señal continua, pero en el caso de una señal discreta éste viene determinado por la frecuencia de muestreo. La magnitud de los armónicos suele decrecer cuanto mayor es su orden, y en la mayoría de las ocasiones domina la frecuencia fundamental ($h=1$), especialmente en el caso de la tensión.

Dentro de la distorsión armónica, se puede hacer una distinción entre componentes continuas, distorsión de los armónicos de orden par y de orden impar. La componente continua se trata como armónico cero ($h=0$), sin embargo, el término armónico no incluye la componente continua ni la fundamental. Los armónicos de orden impar son los más habituales, y los de orden par suelen anularse debido a la simetría de la señal.

Los armónicos múltiplos de tres son los múltiplos impares del armónico tercero ($h=3, 9, 15, 21, \dots$). Requieren una especial consideración porque la respuesta del sistema es, en muchos casos, diferente para éstos que para el resto de los armónicos. Además merecen especial consideración en los sistemas conectados a tierra, ya que la corriente fluye por el neutro, presentando como consecuencias la sobrecarga del neutro e interferencias telefónicas.

2.3.2. Distorsión interarmónica

Tradicionalmente, a las distorsiones de la forma de onda se le consideraban como distorsiones armónicas, puesto que los armónicos eran los mayores componentes distorsionantes. Sin embargo, el aumento del contenido interarmónico ha generado la necesidad de darles una mayor importancia.

Cuando las formas de onda de la tensión y corriente no son múltiplos enteros de la frecuencia de red se denomina interarmónicos. La norma CEI 61000-2-1 [55] lo define como “entre los armónicos de tensión y corriente, se pueden observar frecuencias que no son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Pueden aparecer como frecuencias discretas o en una banda amplia del espectro”. En términos prácticos las frecuencias interarmónicas son frecuencias que se encuentran entre dos frecuencias armónicas adyacentes. Por ello, para su medida es necesario que el periodo sea superior a un ciclo, pudiéndose interpretar la presencia de interarmónicos en el dominio del tiempo como una señal periódica con periodo superior a un ciclo. No hay que olvidar, además, que debido a la no periodicidad de la onda, esta no cumple con el teorema de

Fourier. Si consideramos la tensión con una sola componente interarmónica, a la frecuencia ξf_0 , se puede escribir [54]:

$$v(t) = V_0(t) + \sum_{h=1}^H V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t - \alpha_h) + V_\xi \sqrt{2} \cos(\xi\omega t - \alpha_\xi) \quad (1-3)$$

Este tipo de onda es cada vez más común, incluyéndose entre algunas de las fuentes de interarmónicos ciclo-convertidores, convertidores estáticos, dispositivos de arco, soldadores, variadores de velocidad, PLC a baja frecuencia (control del rizado) y una variedad de cargas que funcionan con motores de inducción (debido a que la corriente en la carga cambia rápidamente). Por otro lado, entre los impactos encontramos incremento del calentamiento, *flicker*, sobrecarga, rizado, fluctuación de la tensión, e interferencias en las comunicaciones.

El método de agregación de los interarmónicos seguido en la presente tesis se recoge en el apartado 2.7 sobre medida de armónicos e interarmónicos.

2.4. Fuentes de armónicos

La distorsión armónica está presente en mayor o menor medida en todos los sistemas eléctricos. Como ejemplos más típicos de cargas no lineales podemos citar los convertidores estáticos (grupos rectificadores, reguladores de velocidad, arrancadores estáticos y cargadores de baterías), equipos electrónicos monofásicos que tienen a la entrada un rectificador porque trabajan internamente en CC (ordenadores, impresoras, autómatas, etc.), instalaciones de iluminación con lámparas de descarga, hornos de arco y equipos de soldadura y transformadores. En [56] se detalla con profundidad una amplia variedad de fuentes de armónicos.

El cada vez mayor uso de dispositivos de electrónica de potencia para controlar los sistemas ha sido el principal motivo de una creciente preocupación sobre la distorsión de la forma de onda. Los armónicos son subproductos de los equipos electrónicos modernos, como es el caso de las cargas no lineales. Éstas crean armónicos ya que dibujan corrientes en pulsos cortos y abruptos en lugar de con forma sinusoidal. Muchos de los dispositivos de la actualidad crean armónicos, especialmente todos los que emplean dispositivos semiconductores.

El rectificador monofásico se usa en la mayoría de los aparatos domésticos y en las oficinas; y aunque posee unos niveles armónicos individuales muy bajos, el efecto resultante de combinarlo con otras cargas puede ser una fuente importante de distorsión.

Las soluciones propuestas para el control de los armónicos son varias, entre las que destacan la reducción de los armónicos de corriente producidos por la carga; añadir filtros para así bloquear la corriente de entrada al sistema; o bien modificar la respuesta en frecuencia del sistema mediante filtros, bobinas o condensadores.

2.5. Impacto de los armónicos

Los armónicos no contribuyen a llevar la energía activa necesaria a los equipos conectados a la red; al contrario, las corrientes armónicas creadas circulan por los conductores y aparatos eléctricos dando lugar a:

- un aumento de las pérdidas por el efecto Joule y el efecto pelicular, así como pérdidas adicionales en alta frecuencia, con la consiguiente reducción en la eficiencia de la generación, transmisión y uso de la energía eléctrica;
- la degradación del factor de potencia de la instalación;
- y, en consecuencia, un aumento de la factura de la energía eléctrica;
- un envejecimiento prematuro de los equipos eléctricos con la consecuente disminución de su vida útil;
- un funcionamiento anormal, o fallo, debido a la distorsión de la tensión;
- la destrucción de determinados componentes como los condensadores.

Uno de los principales efectos de los armónicos es que al provocar una pérdida de la forma de onda sinusoidal, es necesaria una modificación de las definiciones tradicionales de potencias activas, reactivas, aparentes y de factor de potencia. Además, contribuyen a la degradación en el desarrollo de sistemas de comunicación y provocan excesivo ruido audible. También pueden provocar interferencias con las líneas de comunicación y ser un problema para los medidores de energía o teledímetros sobre todo en ciertos niveles de alta frecuencia.

2.6. Caracterización de la emisión armónica e interarmónica

A lo largo del texto aparece mención expresa a nivel de armónicos. Para poder saber si estamos por encima o por debajo de la emisión característica, es necesario resaltar algunos aspectos. En primer lugar, la norma UNE-EN 61000-3-2 [29] limita los niveles armónicos, tal y como se indicará en el apartado correspondiente sobre normativa.

En segundo lugar, en [57] se caracterizan en un 95% los niveles armónicos e interarmónicos que posee una vivienda. En dicho documento se realizó un experimento en el que se midió la distorsión antes y después de la sustitución del alumbrado de interior por lámparas de LED en varias viviendas. La principal conclusión obtenida es la elevada reducción en potencia activa (de 2300 W a 450 W), sin embargo, en cuanto a lo que nos ocupa en esta tesis, la distorsión, tras dicha sustitución no se observan cambios en la emisión en las viviendas ni en el transformador de distribución.

El experimento se desarrolló en Suecia, donde cada vivienda posee alimentación trifásica, estando las lámparas igualmente distribuidas por las tres fases. En el documento aparece el percentil 95 de los armónicos pares e impares hasta 2 kHz (orden 40) para cada una de las dos viviendas monitorizadas. Como ambas tienen un espectro similar, sólo se muestra una de ellas. Por tanto, se puede decir que este es el contenido armónico de una vivienda.

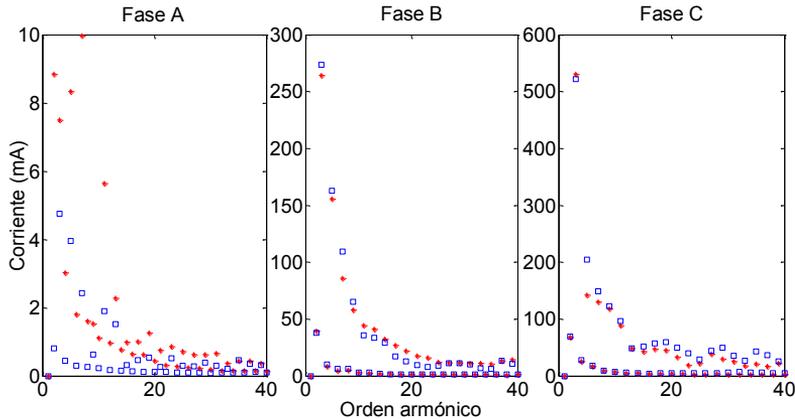


Figura 2-2. Cambio en el espectro armónico (percentil 95) antes y después del cambio a LED en una vivienda (Estrella roja=primeros 7 días, cuadrado azul= últimos siete días). Fuente [57].

El armónico de orden 3 oscila entre 250-470 mA, el de orden 5 entre 200 y 300 mA, el de orden 7 entre 100 y 180 mA, y así sucesivamente decreciendo hasta el orden 25 en el que prácticamente se mantiene un nivel constante de alrededor de 20 mA.

También se ha extraído el contenido interarmónico, caracterizando el mismo en una vivienda, antes y después de la sustitución de LEDs.

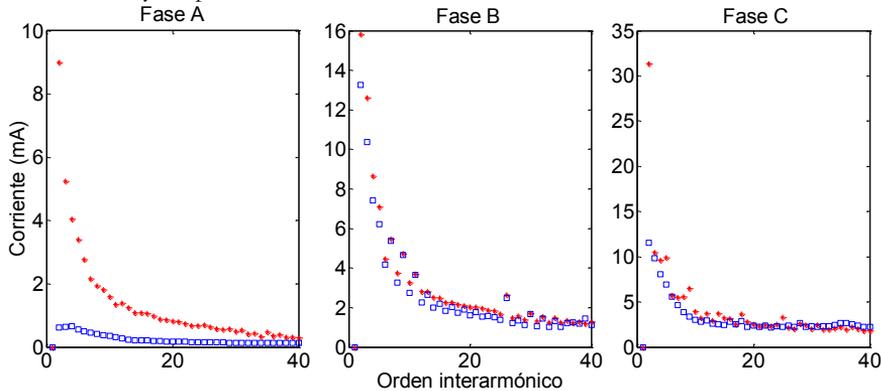


Figura 2-3. Cambio en el espectro interarmónico (percentil 95) antes y después del cambio a LED en una vivienda (Estrella roja=primeros 7 días, cuadrado azul= últimos siete días). Fuente [57].

En el caso de los interarmónicos, el orden 3 (150-200 Hz) oscila entre 9-30 mA, el orden 5 (250-300 Hz) entre 5-12 mA, el orden 7 (350-400 Hz) entre 4-8 mA, siendo prácticamente constante desde el orden 21 (1050-1100 Hz) a 2,5 mA como máximo.

2.7. Medida de armónicos e interarmónicos

La norma UNE-EN 61000-4-7 [58] establece las técnicas para medir la distorsión armónica. La clave es la utilización de una ventana con 10 o 12 ciclos (según sea 50 Hz o 60 Hz) para la realización de la transformada de Fourier. El resultado es un espectro con una resolución de 5 Hz tanto para sistemas de 50 Hz como para 60 Hz. Con el propósito de formular los requisitos para los instrumentos de medida, el estándar divide

los armónicos en tres categorías: cuasi-estacionarios (que varían lentamente); fluctuantes; y que cambian rápidamente (ráfagas muy cortas de armónicos), poseyendo cada categoría distintos requisitos en el diseño del instrumento de medida.

Se recomiendan medidas hasta el armónico 50, pero en algunos casos se puede incluir hasta el orden 100. Por este motivo la norma UNE-EN 61000-3-6 [59] considera intervalos de observación para comprimir los datos: intervalo muy corto (3 s); corto (10 min); largo (1 h); de un día (24 h); de una semana (7 d). En los experimentos realizados a lo largo de esta tesis, debido a las limitaciones de memoria del equipo de medida, el intervalo de muestreo es de 10 minutos, pero en determinados experimentos se ha conseguido hasta intervalos de 1 s, aunque la norma no lo requiera. En cada apartado, se indicará el intervalo de muestreo considerado.

La norma UNE-EN 61000-4-7 [58] también define la forma de combinarlos dando lugar a grupos y componentes para los que establece límites. No sólo contempla la agrupación de armónicos, sino que también contiene una pequeña subsección para los interarmónicos en la que incluye su agrupación. Tras el cálculo de la FFT (*Fast Fourier Transform*), en esta tesis se han agrupado los armónicos e interarmónicos con este tipo de agregación.

$$C_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad (1-4)$$

$$C_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^9 C_{k+i}^2 \quad (1-5)$$

donde el subíndice g hace referencia a los grupos de armónicos; e ig a los grupos de los interarmónicos. Además, $C_{g,1}$ (grupo armónico 1) es de frecuencia 50 Hz, $C_{g,2}$ (grupo armónico 2) es 100 Hz,... y con respecto a los interarmónicos, el $C_{ig,1}$ (grupo interarmónico 1) se encuentra entre los grupos armónicos 1 y 2 (frecuencias comprendidas entre 50 y 100 Hz); $C_{ig,2}$ (grupo interarmónico 2) se encuentra entre los grupos armónicos 2 y 3 (frecuencias comprendidas entre 100 y 150 Hz), y así sucesivamente.

Sin embargo, si el rango de frecuencias a estudiar se encuentra entre 2 y 9 kHz, el anexo B de la norma UNE-EN 61000-4-7 [58] propone otra ecuación para su agregación. En este caso, el resultado de la FFT agrupa los 5 Hz en bandas de frecuencia de 200 Hz, con lo que se consigue un espectro más suave y fácil de interpretar. Se ha usado una ventana rectangular tal y como indica la anterior norma.

$$G_b = \sqrt{\sum_{f=b-90}^{b+100} C_f^2} \quad (1-6)$$

Lo que deja, sin embargo, es varios temas sin resolver relativos a estos interarmónicos, y recomienda que temas como el rango de frecuencias a considerar y la frecuencia central sean seleccionados de acuerdo con el fenómeno estudiado.

2.7.1. Medida del ángulo de fase de los armónicos

Desde un punto de vista de calidad de onda, los ángulos de fase de los armónicos de la tensión o corriente no son importantes en sí mismos. Sin embargo, la medida de los ángulos de fase entre los armónicos de tensión y corriente, junto con sus amplitudes se usa a menudo para los siguientes propósitos:

- evaluar los armónicos que fluyen por el sistema,
- identificar fuentes de armónicos,
- calcular los factores de suma de los armónicos de corriente procedentes de las cargas distorsionantes en caso de que estén conectadas al mismo punto, y
- establecer circuitos equivalentes para calcular el impacto de las nuevas cargas distorsionantes, o la efectividad de las medidas para mitigarlos como es el caso de los filtros.

La dirección del flujo de potencia activa en el orden armónico de interés puede ayudar a identificar la fuente de la perturbación. Para poder evaluar la asociación entre frecuencias de cargas no lineales, es necesario medir el ángulo de fase entre el armónico fundamental de la tensión en el punto de conexión común y los armónicos de corriente (ángulo de fase absoluto). La medida de ángulos de fase absoluto, por ejemplo si los relacionamos con la componente fundamental, necesita una sincronización, preferiblemente con el paso por cero de la componente fundamental de la tensión.

En la actualidad, la normativa referente a la obtención del ángulo de fase de los armónicos se encuentra en UNE-EN 61000-3-12 [60]; en concreto, para el armónico 5 se define el ángulo como el existente entre los pasos por cero de la corriente del 5º armónico y de la fundamental de la tensión. En la presente tesis esta definición se extrapola a los órdenes armónicos más significativos. Además, es necesario añadir que no es posible comparar los ángulos de fase entre los diferentes armónicos ya que poseen diferentes frecuencias.

Entre otras ventajas derivadas del conocimiento de dicho ángulo de fase tenemos:

- Se pueden comparar medidas en diferentes puntos procedentes de similares o distintos sistemas.
- Es posible deducir si la conexión o el ordenamiento de los diferentes sistemas, incrementará o disminuirá el nivel armónico en el sistema. Aquellas distorsiones que tengan ángulos de fase similares se superpondrán por lo que incrementará el nivel armónico, mientras que aquellas con ángulo opuestos se compensarán una a la otra, disminuyendo por tanto el nivel armónico.
- Es posible observar los ángulos de fase de las cargas distorsionantes, especialmente de aquellas procedentes de circuitos rectificadores sin control del disparo, para la evaluación y solución de su efecto distorsionante.

2.8. Análisis de la forma de onda de los armónicos

El **factor de pico** es la técnica más simple de estimación armónica. Es una medida que relaciona el valor de pico de la forma de onda con el verdadero valor eficaz. Una onda sinusoidal perfecta, por definición, tendrá un factor de pico de 1,414. La definición matemática del factor de pico viene dada por el cociente entre el máximo de la señal y el verdadero valor eficaz [61]. Cuando la corriente se distorsiona, el factor de pico alcanza valores superiores o inferiores a $\sqrt{2}$ y se traduce en la no linealidad del circuito en cuestión.

$$\text{Factor de pico (F}_p\text{)} = \frac{\text{Valor de pico}}{\text{Valor eficaz}} \quad (1-7)$$

Por tanto, de esta ecuación se desprende que cualquier desviación de 1,414 se traduce en una onda distorsionada. Sin embargo, esta técnica no es muy rigurosa porque no considera las frecuencias armónicas ni en fase ni en magnitud. Algunos valores de factores de pico habituales son: $\sqrt{2}$ para cargas lineales (ausencia de armónicos); entre 2 y 3 para equipos informáticos (presencia de armónicos); 2 para reguladores de velocidad (presencia de armónicos).

La **distorsión armónica total** (THD) se refiere a la distorsión armónica presente en la totalidad del equipo eléctrico, por lo que es una medida de la desviación con respecto a la onda sinusoidal. Se puede referir a la distorsión de la tensión (THDV) o de la corriente (THDI). Las cargas puramente resistivas como las lámparas incandescentes no tienen THDI (THDI = 0); sin embargo, los equipos que contienen bobinas y condensadores junto con otros componentes electrónicos, como motores, lámparas fluorescentes y las HID, presentan THDI. Este factor es igual a la relación entre el valor eficaz del conjunto de las componentes armónicas (de tensión o corriente) y el valor eficaz de la componente fundamental (de tensión o corriente); aunque también se puede definir con respecto al valor eficaz de la señal.

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (M_h)^2}}{M_1} \quad (1-8)$$

donde b denota el orden armónico, 1 denota el fundamental, y M hará referencia a la tensión o a la corriente. Para la mayoría de las aplicaciones es suficiente considerar el rango armónico 2-25, pero la mayoría de los estándares especifican hasta el orden 50. Cuanto más distorsionada esté la señal, mayor será el factor de distorsión armónica, lo que significa que, en consecuencia, el nivel de riqueza de la señal en armónicos es también mayor. Además, un elevado valor del mismo reduce el f.d.p. y puede provocar interferencia con el funcionamiento del equipo electrónico, un inadecuado funcionamiento de los dispositivos que protegen la red eléctrica (fusibles, diferenciales y relés), interferencia con circuitos cercanos de comunicación, y calentamiento de motores, transformadores y condensadores.

Generalmente, la instalación de balastos electrónicos reducirá la carga en el circuito ya que se reduce la demanda de energía. Si el THD coincide con los niveles de algún armónico, se puede decir que la distorsión de la tensión o corriente se debe principalmente a dicho armónico. Si el valor de un armónico es $<2\%$, se puede decir que es despreciable [51], pero el efecto combinado con otras cargas puede elevar dicho valor.

En el estudio llevado a cabo en [62] se encontró que el valor del THDI está fuertemente ligado con el factor de grado de atenuación (DDF *Dimming Degree Factor*). Dicha atenuación se consigue mediante el ajuste del ángulo de conducción del SCR (*semiconductor-controlled rectifier*). Cuanto mayor es el DDF, más elevado es el THDI. Sin embargo, las componentes armónicas exhiben diferentes patrones, siendo algunas proporcionales al DDF y otras no. En el citado estudio se modela el comportamiento armónico mediante una red neuronal.

El THD sólo se basa en el valor eficaz de los armónicos presentes en la forma de onda, por lo que no expresa ninguna información sobre los ángulos de fase de estos armónicos. Además, al calcular el THD todos los armónicos se ponderan por igual, por lo que se pierde información relativa al orden y magnitud de cada uno en particular. Dado que los equipos son afectados de distinta manera según el orden del armónico, la

ponderación debe depender del tipo de equipo afectado. El THD no produce una medida que distinga entre dos señales que tengan el mismo número de armónicos con igual magnitud pero distinto orden. Dos señales completamente diferentes desde el punto de vista del contenido armónico y/o desde el punto de vista del ángulo de fase pueden tener el mismo THD [50].

Estos inconvenientes se pueden solventar si se hace uso de un nuevo índice que usa unos coeficientes para las diferentes bandas de frecuencia existentes en la señal. La magnitud de los coeficientes depende del nivel de descomposición de la frecuencia, asignando diferentes pesos a los coeficientes de cada nivel. Así, cuanto mayor es el nivel, mayor es el peso. El índice se define como la raíz cuadrada del cociente de la suma de los cuadrados de todos los coeficientes ponderados dividido por la suma de los cuadrados de los coeficientes de la menor banda de frecuencia, de la forma [49]:

$$THD' = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=1}^{N_j} 2^{j-1} d_j^2(k)}{\sum_k 2^{m-1} a_m^2(k)}} \quad (1-9)$$

donde k es el número de coeficiente a un determinado nivel j . THD' introduce una medida del contenido en alta frecuencia de una señal en comparación con su fundamental.

De manera similar, los índices de distorsión también se pueden definir para los interarmónicos de igual manera que con los armónicos. El correspondiente factor de **Distorsión Interarmónica Total** es (TIHD) [63]:

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i)^2}}{V_1} \quad (1-10)$$

donde i es el número total de grupos de interarmónicos considerados y n el número total de grupos de frecuencia que incluyan interarmónicos (por ejemplo, frecuencias interarmónicas que sean menores que la frecuencia fundamental). Es necesario mencionar que este cálculo se hace con grupos, siendo $C_{ig,1}$ (grupo interarmónico 1) aquel comprendido entre el grupo armónico 1 y 2 (entre las frecuencias 50 y 100 Hz), $C_{ig,2}$ (grupo interarmónico 2) aquel comprendido entre el grupo armónico 2 y 3 (entre las frecuencias 100 y 150 Hz), y así sucesivamente.

Si se desea calcular sobre los subarmónicos, existe el índice **Distorsión Subarmónica Total** (TSHD):

$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^S (V_s)^2}}{V_1} \quad (1-11)$$

donde S es el número total de intervalos de frecuencia presentes por debajo de la frecuencia fundamental.

Los niveles de distorsión de la corriente pueden caracterizarse por un determinado valor del THDI pero puede inducir a error si la componente fundamental no es muy elevada. Un valor elevado del THDI puede no suponer un problema importante al sistema eléctrico si la carga conectada es luminosa, puesto que la magnitud de la

corriente armónica es baja, aunque su distorsión relativa a la frecuencia fundamental es elevada. Para evitar tal ambigüedad se usa en su lugar el factor de **Distorsión Total de la Demanda** (TDD), definido como [64]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \quad (1-12)$$

Este término es similar al THDI salvo porque la distorsión se expresa como porcentaje de la corriente de carga (I_L) máxima demandada. Como los sistemas de suministro eléctrico están diseñados para soportar la máxima I_L , el impacto de la distorsión de la corriente sobre el sistema será más realista si el cálculo se basa en los valores de diseño, más que en una referencia que fluctúa con los niveles de carga [63]. Una de las formas de calcular este I_L , es con una carga presente en el sistema, calculándolo como la media de la corriente máxima en la demanda durante los 12 meses anteriores.

El **factor K** permite calcular cual es la carga admisible en un transformador en presencia de armónicos. Los armónicos de alta frecuencia influyen sobre el factor K más que los de bajas frecuencias. Por lo tanto, es la única técnica disponible de estimación del contenido armónico que tiene en cuenta la frecuencia armónica, considerando el efecto importante que la frecuencia tiene en las pérdidas del transformador. Éste se define como la suma de los cuadrados de los armónicos de corriente multiplicados por los cuadrados de los órdenes armónicos, dividido por el cuadrado del valor eficaz de la corriente [49]. El factor K es un indicador de no linealidad y es siempre superior a la unidad.

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1-13)$$

donde h es el orden del armónico, I_h es el valor eficaz del armónico h . Mientras que para el cálculo del factor K son necesarios las componentes armónicas de la corriente, es difícil obtener el contenido armónico con precisión porque, por lo general, varía la carga. El factor K debe ser adaptado para explicar las condiciones de carga, proponiéndose en [61] una suma ponderada para cumplir este fin. Al considerar cada tipo de carga de forma separada, puede considerarse cada componente no lineal de forma individual y agregada para constituir un agregado armónico. Sin embargo, debido a la FFT, [49] propone otra aproximación:

$$K' = \frac{\sum_{j=1}^m h_j^2 \sum_{k=1}^{N_j} d_j^2(k) + \sum_{m=1}^{N_m} \alpha_m^2(k)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{N_j} d_j^2(k) + \sum_{m=1}^{N_m} \alpha_m^2(k)} \quad (1-14)$$

donde m es el mayor nivel de descomposición que incluye la frecuencia fundamental, N_j es el número de coeficientes al nivel j , y h_j es el orden de la frecuencia central de la muestra j .

En [65] se define el **Índice de Inclusividad Armónica** (HII) para comprobar si los armónicos medidos justifican el valor del THD. Este índice se define como el mínimo de cada fase (considerando un sistema trifásico) de entre los valores semanales registrados durante el periodo muestreado. El valor de cada semana se calcula mediante el Valor de Inclusividad Armónica (HIV):

$$HIV = \frac{95\%V_s}{95\%THD} \quad (1-15)$$

donde V_s indica el valor armónico a estudiar. Un valor pequeño del HII indica que los armónicos medidos son demasiado pequeños para explicar el valor THD, y que el causante del THD es otro orden armónico. Si se asume que el HII obtenido es adecuado, se puede calcular un Índice Armónico basado en el percentil 95 del THD. Brevemente, el algoritmo usado para calcular el Índice Armónico para un determinado orden se basa en el máximo del percentil 95 diario del THD.

Con el fin de eliminar la ambigüedad entre el $\cos \varphi$, en el caso de señales sinusoidales, y el factor de potencia, en el caso de señales distorsionadas, se utiliza el **factor de potencia de desplazamiento** (DPF *displacement power factor*). Éste representa el coseno del desfase entre las componentes fundamentales de la tensión y corriente, por lo que constituye la verdadera representación del desfase entre la tensión y la corriente.

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{V_{1_{rms}} \cdot I_{1_{rms}}} \quad (1-16)$$

2.9. Normativa

Cada país ha establecido sus propios estándares de armónicos, así como sus propios límites de emisión según sus requisitos y condiciones individuales de funcionamiento. Sin embargo, el aumento del comercio libre ha hecho que las normativas de armónicos e interarmónicos sean aplicables internacionalmente. Principalmente las normas limitan las emisiones armónicas de las cargas no lineales, y por otra establecen niveles de referencia para que las compañías eléctricas puedan vigilar el nivel de distorsión en sus redes.

La normalización se recoge en normas IEEE Norteamericanas y CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) Europeas. Las normas CEI han sido en su mayoría adoptadas por la Comunidad Europea (CENELEC), enmarcándose en las siguientes seis categorías que van desde la parte 1 (Generalidades) hasta la 6 (Varios). En concreto, la normativa relativa a armónicos se encuentra fundamentalmente en las categorías 2 (Ambiente – CEI 61000-2-xx) y 3 (Límites de emisión – CEI 61000-3-xx). En la categoría 4 (Técnicas de ensayo y de medida – CEI 61000-4-xx) aparece tanto armónicos como interarmónicos.

La UNE-EN 61000-2-2 [66] define los niveles de compatibilidad para perturbaciones conducidas en baja frecuencia y señal en los sistemas públicos de baja tensión como sistemas de 50 o 60 Hz monofásicos o trifásicos con tensiones nominales de hasta 240 y 415 V respectivamente. Los niveles de compatibilidad se definen empíricamente de forma que reducen el número de quejas por malfuncionamiento hasta un nivel aceptable. Estos niveles no son rígidos y pueden ser excedidos en algunas condiciones excepcionales. Los niveles de compatibilidad para los armónicos de tensión individuales en la red de baja tensión se muestran en la Tabla 2-3, y vienen dados en porcentaje de la tensión fundamental.

Tabla 2-3. Niveles individuales de compatibilidad para los armónicos de tensión en el sistema público de baja tensión según UNE-EN 61000-2-2 [66].

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden h	Tensión armónica (%)	Orden h	Tensión armónica (%)	Orden par h	Tensión armónica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,2
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
25	0,2+1,3x25/h				

Nota. El THDV incluyendo todos los armónicos hasta el 40 deberá ser menor del 8%.

Tanto la norma UNE-EN 61000-3-2 [29] como la CEI 61000-3-4 [67] definen límites para la emisión de corriente armónica de equipos que tienen corrientes de entrada menor o igual a 16 A por fase, y mayor de 16 A por fase, respectivamente. El propósito de estos estándares es limitar las emisiones armónicas de equipos conectados a la red pública de baja tensión de manera que, cumpliendo con los mismos, se asegure que la tensión de la red pública satisface los niveles de compatibilidad definidos en UNE-EN 61000-2-2 [66].

La norma UNE-EN 61000-3-2 [29] clasifica estos aparatos en cuatro clases, de la A a la D, y establece los límites de órdenes de armónicos hasta el 39. Las diferentes clases incluyen los siguientes tipos: clase A (dispositivos trifásicos), clase B (dispositivos portátiles), clase C (dispositivos para alumbrado, incluyendo sistemas con atenuación), y clase D (dispositivos cuya corriente de entrada posee una ‘forma de onda especial’ y una potencia activa de entrada menor o igual a 600 W medida según el método ilustrado en el Estándar).

En el caso que nos ocupa, los aparatos de iluminación poseen límites indicados en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Límites para equipos de la clase C.

Orden armónico	Corriente armónica máxima permisible expresada como porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (%)
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (sólo armónicos impares)	3

Nota: λ es el factor de potencia del circuito.

Como se dijo anteriormente, la norma CEI 61000-3-4 [67], establece los límites sobre corriente armónica inyectada por cargas no lineales con corriente de entrada mayor a 16 A y hasta 75 A a las redes públicas de distribución. Las conexiones de este tipo de equipos no requieren acceso a la red. Los límites de corriente armónica basadas en este estándar se muestran en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5. Límites de armónicos de corriente según CEI 61000-3-4 [67].

Orden armónico h	Armónico de corriente (%) máx. permisible	Orden armónico h	Armónico de corriente (%) máx. permisible
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

Nota. Los valores anteriores están expresados en porcentaje de la corriente fundamental de entrada.

La UNE-EN 61000-3-6 [59], establece los límites de emisión de corriente armónica para equipos conectados a sistemas de media (entre 1 y 35 kV) y alta tensión (entre 35 y 230 kV). El estándar señala que los límites de emisión de equipos individuales conectados a dichos sistemas deberían evaluarse en base a la distorsión de la tensión. De esta forma se aseguran que las inyecciones de corriente armónica procedente de equipos que producen armónicos no resultan en un exceso de los niveles de distorsión de la tensión. El estándar también proporciona los niveles de compatibilidad para los armónicos de tensión en los sistemas de baja y media tensión.

El exponente suma α (*Summation exponent*) usado en la UNE-EN 61000-3-6 [59], establece que la tensión o corriente armónica en cualquier punto de un sistema es el resultado de la suma vectorial de los componentes individuales de cada fuente. Se aplica a cada orden armónico de interés y tanto con la tensión como con la corriente.

$$U_h = \sqrt[\alpha]{\sum_i U_{hi}^\alpha} \quad (1-17)$$

donde U_h es la magnitud de la tensión armónica resultante (orden h) para la considerada agregación de cargas; U_{hi} es la magnitud de varios niveles de emisión individual (orden h) que se van a combinar; y α es un exponente que depende principalmente de dos factores, el valor escogido de la probabilidad para el valor actual no debería excederse; y el grado al que las tensiones/corriente armónicas individuales varían aleatoriamente en términos de magnitud.

La norma UNE-EN 61000-3-6 [59] establece que los siguientes valores de α no deben exceder el 95% de los valores de probabilidad.

Tabla 2-6. Exponentes suma para los armónicos.

α	Orden armónico
1	$h < 5$
1.4	$5 < h < 10$
2	$h > 10$

Nota – cuando se sabe de antemano que los armónicos estarán en fase (por ejemplo, la diferencia del ángulo de fase es menor de 90°), el exponente $\alpha = 1$ se debería usar desde el 5° orden en adelante.

La norma IEEE Std 519-1992 [64] tiene como objetivo principal el establecimiento de prácticas y requisitos para el control armónico en los sistemas de potencia. Los valores límite que establece son en estado estacionario, no considerando el régimen transitorio. El contenido de esta normativa se divide en 14 secciones, describiendo en

primer lugar el fenómeno armónico, las causas de su crecimiento, y los peores efectos que puede provocar.

Se describen las características de respuesta en frecuencia de un sistema, el fenómeno de la resonancia (serie y paralelo), que es el factor más importante que afecta a los niveles de armónicos del sistema, describiendo los circuitos básicos que dan lugar a la misma.

Se establece que el grado en que los armónicos son tolerados viene determinado por la susceptibilidad de las cargas (o de la fuente) a los mismos. Por ello se enumeran los equipos y cargas más susceptibles, resumiendo los efectos perjudiciales que los armónicos generan en las mismas; y describiendo además los métodos tradicionales para eliminar o al menos reducir estos efectos.

Se define y estudia el f.d.p., describe cómo se generan los armónicos de corriente, y recomienda una serie de métodos para la compensación de dichos armónicos, donde destaca la inyección de armónicos de corriente en oposición de fase, de forma que cancelen las originales. Da una serie de pautas y ecuaciones, que sirven de gran ayuda a la hora de construir el esquema equivalente de las instalaciones. Se justifica la importancia que tienen unas medidas bien realizadas para un correcto análisis del sistema en estudio. Además recomienda los equipos de medida necesarios, y enumera los requerimientos que deben tener dichos equipos. Asimismo, describe los métodos de medida más recomendables.

Finalmente, la norma recomienda un procedimiento general de análisis armónico para ser adoptado como parte del proceso de planificación del sistema.

La norma UNE-EN 50160 [48] es la norma europea básica en calidad de la energía eléctrica. Esta norma describe las características principales que debe tener la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y en media tensión en condiciones normales de explotación y en el punto de entrega al cliente. Como dice en su primer apartado: “Esta norma da los límites o los valores de las características de la tensión que todo cliente tiene derecho a esperar, y no da los valores típicos en la red general de distribución”.

El estándar define los límites para la frecuencia nominal de la tensión suministrada, la amplitud de la tensión, las variaciones de la tensión suministrada, las variaciones rápidas de la tensión (amplitud de las variaciones y severidad del parpadeo), los huecos de tensión, las interrupciones breves y las interrupciones largas del suministro, las sobretensiones temporales y transitorias, el desequilibrio de la tensión suministrada, los armónicos e interarmónicos de tensión y la transmisión de señales de información por la red, así como los protocolos de medida.

En cambio, el estándar no fija la responsabilidad del cumplimiento de esos límites en ninguna de las partes. También es importante destacar que la norma sólo es aplicable en condiciones normales de operación e incluye una lista de operaciones en las que esos límites no son aplicables, como las operaciones realizadas después de un fallo, acciones industriales o cortes de suministro debidos a eventos externos.

2.10. Caracterización de la agregación y su impacto

Para la estimación del cambio en la emisión debido a la conexión de una nueva carga o debido a un grupo de dispositivos, se pueden usar tres métodos:

- Añadir la magnitud del espectro. Esta es la forma más sencilla y origina el límite superior para la magnitud armónica del total. A esto se le conocería como el caso trivial.
- Sumar las formas de onda (o sumar los armónicos complejos). Para esto es necesario el conocimiento de las formas de onda o armónicos complejos de la instalación existente y del nuevo dispositivo a añadir.
- Finalmente, construir la instalación, añadir el dispositivo, y hacer las correspondientes medidas. Esta última es la más precisa, pero no siempre es posible.

Se ha decidido hacer un estudio real de estos tres enfoques. Para ello se ha usado del experimento de alumbrado de interior que se detallará en el capítulo 3, un intervalo temporal en el que el grupo de lámparas 1 (6 CFL+6 LED) estaba conectado al mismo tiempo que el conjunto ordenador/TV.

La Figura 2-4 muestra que sumar las magnitudes armónicas de cada una de las cargas conectadas (enfoque trivial - color azul) origina una sobreestimación para la mayoría de los armónicos (para los elevados órdenes armónicos el error absoluto puede ser pequeño, pero normalmente es doble de lo que es en la realidad).

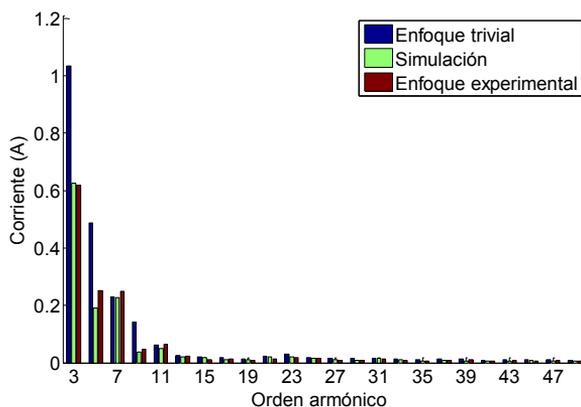


Figura 2-4. Evolución del espectro armónico para la caracterización de la agregación.

La figura también muestra que los enfoques simulación (sumar las formas de onda-color verde) y experimental son muy similares hasta el orden 13. Desde el armónico 15 las desviaciones se hacen mayores. Con algunas pequeñas excepciones (órdenes 7 y 11, aun siendo pequeñas las diferencias) el enfoque simulación origina una mejor estimación que el trivial, pero como se dijo anteriormente, no siempre es posible.

Con la anterior figura se demuestra que al considerar un gran número de cargas que producen armónicos, el vector resultante no es una simple suma aritmética de los armónicos individuales de cada carga. Existen dos efectos que influyen en el armónico resultante de un gran grupo de cargas.

El primer factor que afecta a la agregación de la corriente es el efecto de atenuación. Éste se define como una disminución de la distorsión de la corriente en la carga provocado por un cierto incremento de la distorsión en la tensión. Si se conecta un número elevado de aparatos similares generadores de armónicos, el conjunto puede ser significativo con respecto a la impedancia del sistema visto desde el PCC (punto de

conexión común), distorsionan la tensión a la entrada y en muchos casos esto reduce su contribución armónica individual. Los aparatos distorsionan la forma de onda de la tensión de tal manera que esto produce más armónicos, presentando una mayor atenuación los armónicos de mayor orden.

El segundo factor que afecta a la agregación es el efecto de la diversidad. Esta puede ser tanto temporal como diversidad de fase. La primera es idéntica en el concepto y en la aplicación a la coincidencia o diversidad aplicada a la demanda máxima: diferentes usuarios producen su pico de armónicos que salen de sus instalaciones a diferentes horas. Como la carga, los picos de armónicos tienen períodos de unos cuantos minutos a una determinada hora siguiendo el ciclo de encendido y apagado de los diferentes aparatos eléctricos. El nivel máximo de armónicos para un grupo de usuarios ocurre cuando la suma de sus demandas es un máximo, y como en el caso de usuarios domésticos no tienen su demanda máxima al mismo tiempo, esto puede ser mucho menor que la suma de los picos de armónicos de cada usuario. Sin embargo, esto puede no ocurrir en ambientes industriales, donde existe una amplia variedad de cargas distorsionantes.

En cuanto a la diversidad de fase, las diferentes topologías en los distintos aparatos provocan una diversidad de los ángulos de fase de los armónicos de corriente generados por los aparatos. Esto lleva a que cuando se conectan diferentes aparatos se produzca un vector suma menor que la suma aritmética. Por ejemplo, supongamos que dos aparatos eléctricos idénticos se conectan al mismo tiempo y que ambos producen igual cantidad de armónicos de tercer orden, pero debido a la diferencia en sus circuitos, la polaridad de uno con respecto al otro es inversa (180° de diferencia de fase), su salida de armónicos se cancelará completamente. Este factor denominado factor de diversidad se define como el cociente entre el vector suma y la suma aritmética de los armónicos.

Como resultado de estos tres fenómenos, la contribución armónica disminuye a medida que se conectan más cargas. En general, el factor de diversidad y la diversidad de fase, son las razones más importantes de por qué los armónicos de menor orden disminuyen cuando se incrementa el tamaño del grupo, y la atenuación es el mayor fenómeno que reduce la magnitud de los armónicos de mayor nivel.

Los fenómenos de diversidad y atenuación nos llevan a definir dos estados cuando hablamos de las conexiones de cada cliente, que podríamos llamar ‘estado probable’ y ‘estado menos probable’. Al estudiar la emisión de una instalación doméstica, esta distinción es poco relevante ya que lo realmente importante es la máxima emisión. Pero desde el punto de vista de la red de distribución, donde lo que importa es la emisión combinada de varias instalaciones domésticas (en este caso omitiremos el importante papel que juegan los entornos comerciales e industriales), este estado probable es el que tiene un mayor interés.

2.11. Representación de la evolución temporal

En el desarrollo de la tesis aparece un tipo de gráfica usada para la visualización de los armónicos e interarmónicos cuya representación merece la pena explicar en un apartado de este capítulo.

Cuando se pretende visualizar las variaciones temporales (hasta 3600 muestras dependiendo del tiempo de registro) de una gran cantidad de datos (como es el caso de los órdenes armónicos impares hasta el 50) son posibles varias representaciones. Si se

escoge la representación en 2D, debido a que los bajos órdenes armónicos poseen una mayor magnitud que los de elevado orden, no sería posible apreciar bien las variaciones entre ellos. Si se escoge en 3D, se da el inconveniente de que es difícil ver las evoluciones existentes en los 3 ejes, o resulta necesaria la inclusión de tres figuras que definan las 3 perspectivas.

Resulta imprescindible, por tanto, que el método elegido permita apreciar variaciones sin repercutir en otros aspectos. La escogida ha sido del tipo tiempo (eje x), orden armónico (eje y) y magnitud (colores). Dicha magnitud se escala a todo el rango de colores. El escalado elegido ha sido una normalización con respecto al máximo de cada orden armónico en el tiempo.

La representación temporal de los armónicos se hace como tanto por ciento del valor máximo de cada armónico para todos los intervalos de tiempo (por filas). Con este tipo de representación se resaltan las variaciones entre instantes de tiempo, con lo que se visualizan los incrementos temporales de cada orden. Además, como las tendencias suelen ir de la mano en todos los armónicos, con un solo vistazo se puede observar la propagación de dicha tendencia y así saber si el máximo en un armónico aparece en los órdenes adyacentes.

Sin embargo es necesario advertir de que, al estar normalizado cada armónico en el tiempo, los órdenes no son magnitudes cuantitativamente comparables. También, señalar que el color rojo no indica ninguna interferencia importante ni una superación de umbral durante la emisión; sino sólo el mayor nivel durante las medidas.

Cada color representa cuánta es la diferencia entre este valor y el máximo de todas las medidas en cada escenario. Varía desde el 0% (azul), el que más dista del máximo, hasta el 100% (rojo), que simboliza el máximo alcanzado por un determinado orden armónico en todo el intervalo muestreado.

A modo de ejemplo del método elegido se plantea una matriz de datos, que trasladando al caso real, cada fila es un orden armónico, y cada columna una muestra cada cierto intervalo de tiempo:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 10 & 20 & 30 & 40 \\ 2 & 2 & 8 & 2 \\ 8 & 8 & 2 & 8 \end{bmatrix}$$

Si esta matriz la visualizamos con una imagen en 3D resultan apreciables los inconvenientes comentados en los primeros párrafos de este apartado.

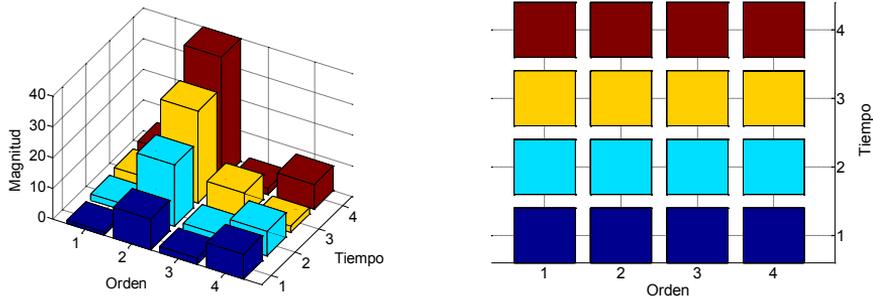


Figura 2-5. Representación en 3D de una serie de datos.

Con la representación según el método elegido, pero sin la normalización resulta lo siguiente:

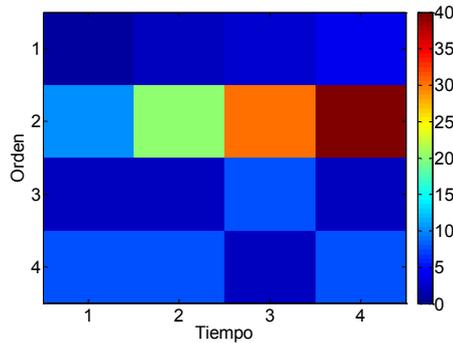


Figura 2-6. Evolución temporal (en magnitud) de una serie de datos.

Por lo que resulta evidente la dificultad de distinción de los cambios en magnitudes pequeñas. Por ello es por lo que se eligió la normalización con el máximo de cada orden en toda la medida. La matriz (en tanto por ciento) derivada de la ponderación con el máximo de todo el intervalo para cada orden armónico (por filas) resulta en la siguiente matriz:

$$A = \begin{bmatrix} 25 & 50 & 75 & 100 \\ 25 & 50 & 75 & 100 \\ 25 & 25 & 100 & 25 \\ 100 & 100 & 25 & 100 \end{bmatrix}$$

Dando lugar a la siguiente figura.

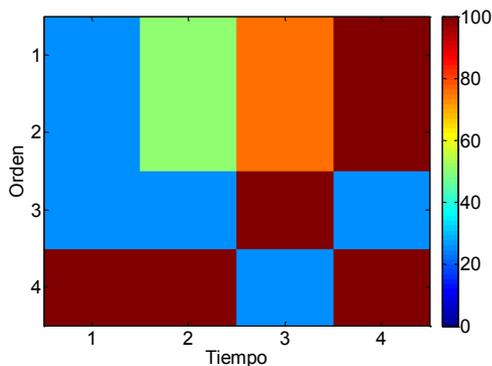


Figura 2-7. Evolución temporal (en tanto por ciento) de una serie de datos.

El 100% se visualiza con el mismo color para todos los armónicos, lo que justifica que no son comparables cuantitativamente unos órdenes con otros. El ejemplo más claro son las dos primeras columnas de datos. Ambas representan distintas magnitudes, pero los mismos porcentajes.

La muestra 3 representa el caso de un máximo en el intervalo, estando toda la fila en tonos azules (mínimos), y sólo una en rojo (100%-máximo). El caso opuesto aparece en la muestra 4, la cual tiene un mínimo en el intervalo. Toda la fila está en rojo (100%-máximo), excepto una en azul (mínimo).

3 Estudio en alumbrado de interior

Este capítulo recoge una serie de medidas realizadas sobre cargas típicas presentes en el interior de una vivienda, frente a lámparas de diferentes tecnologías. Se pretende caracterizar el impacto que supone el cambio a LED cuando éstas están conectadas junto con equipos domésticos (microondas, televisión y ordenador entre otros). Para ello se ha estudiado el contenido armónico e interarmónico del conjunto, así como el plano complejo.

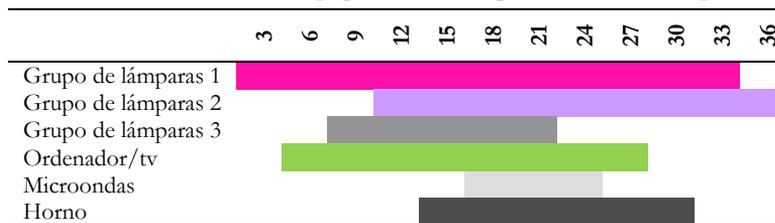
Para la realización de este estudio fueron necesarias una serie de medidas con este tipo de dispositivos encontrados en los hogares. Éste se desarrolló en el laboratorio de Pehr Högström en la Universidad Técnica de Luleå (Skellefteå, Suecia). En él se encuentra construido un modelo eléctrico de una casa a gran escala, con longitudes reales de cable (alrededor de 200 m), alimentado por un transformador de 800 kVA, del que se alimentan dos edificios del Campus.

3.1 Descripción del experimento

El patrón usado para representar las variaciones en consumo se muestra en la

Tabla 3-1, donde cada columna representa un periodo de tres minutos y cada fila cada una de las cargas que se encendieron progresivamente. Los tiempos marcados en la primera fila indican el final del periodo, en minutos desde el comienzo del experimento.

Tabla 3-1. Patrón de encendido/apagado de las cargas usadas en los experimentos.



Nota: GL1 designará a grupo de lámparas 1; GL2 grupo de lámparas 2; GL3 grupo de lámparas 3.

El microondas y el horno poseen un cierto ciclo de funcionamiento que no pudo ser controlado, por lo que el consumo y emisión armónicos de estos equipos pueden no ser idénticos entre los diferentes escenarios. GL1, GL2 y GL3 difieren en el número de lámparas, siendo 12, 18 y 2 respectivamente. Las dos lámparas en GL3 están equipadas con un atenuador al 50%. Todas las lámparas LED eran de 7 W y las CFL son de una amplia variedad de marcas y potencias, oscilando entre 11 W y 15 W. Todas las CFL y LED poseen una forma de onda de la corriente muy distorsionada, con un factor de

potencia del 0,6. El horno se conectó en el nivel 7 (640 W) con un factor de potencia de 0,9521 y THDI de 6,3%. El microondas se conectó en el modo de máxima potencia (900 W) con un THDI de 23%. El conjunto ordenador/TV consta de un PC, un monitor CRT y una televisión de LED. La potencia del conjunto es de 235 W, con un factor de potencia de 0,9981 y THDI de 72%.

El experimento consistió en la medida de cuatro escenarios. Cada uno de los cuáles da igual salida de luz en lúmenes, y que los nombramos como: ‘pasado’, ‘presente’, ‘futuro’ y ‘futuro lejano’.

- En el escenario llamado ‘pasado’ todas las lámparas eran incandescentes.
- En el escenario llamado ‘presente’ mitad de las lámparas se han sustituido por CFL.
- En el escenario llamado ‘futuro’ todas las incandescentes que quedaban se sustituyen por lámparas de LED de 7 W, y las CFL permanecen como en el escenario anterior.
- En el escenario llamado ‘futuro lejano’ todas las lámparas eran LED de 7 W.

La carga se cambió en intervalos de 3 min con un patrón total de 36 min. Éste se ha elegido de forma que pueda ilustrar el efecto de conectar una a una algunas de las cargas presentes normalmente en una vivienda.

La corriente absorbida por toda la instalación (PCC) se midió usando dos instrumentos diferentes: Power Xplorer PX5 de Dranetz y Hioki Memory Recorder 8855. El primero de los equipos se usó para la obtención cada segundo de todos los parámetros típicos de calidad de suministro además de la forma de onda de la corriente con ventana de duración 200 ms y una frecuencia de muestreo de 12,8 KS/s. En lugar de usar intervalos de muestreo de 10 o 15 min, se usó un menor intervalo (1 s) para detectar cualquier cambio en el estado funcional de cada uno de los dispositivos. El segundo de los equipos, Hioki, se usó para obtener ventanas de 200 ms de la corriente muestreadas cada minuto. En este caso la frecuencia de muestreo es de 10 MS/s. Para el análisis realizado en este capítulo sólo se han usado las formas de onda obtenidas del equipo Dranetz, ya que el objetivo es la agregación de cargas y es más conveniente tener un bajo intervalo de muestreo y no tanto una elevada resolución en el muestreo.

Puesto que será necesario establecer si la emisión en cada uno de los escenarios es alta o baja, es imprescindible comparar con un espectro armónico de base. Este espectro característico se puede hacer, bien en función de la norma, bien en función del espectro de un hogar. Tal y como se comentó en el apartado 2.6 sobre caracterización de la emisión armónica e interarmónica, en [57] se midieron varios hogares, con lo que se determina el espectro de un hogar. En base a estas cantidades, podremos saber si la emisión de nuestros dispositivos y escenarios, es alta o baja en relación con lo anterior.

3.2 Emisión individual de los dispositivos

Es necesario primero señalar las características de la tensión de alimentación empleada. Para ello se midió con un equipo de medición de impedancias, el valor de la misma, dando $Z=1,58+j0,01 \Omega @ 50 \text{ Hz}$. Con lo que se verifica que la red es prácticamente resistiva. Procede de un transformador cercano al laboratorio del que usamos un cable dedicado de 200 m sólo para realizar las medidas. Además, a continuación se muestran

los armónicos de tensión cuando no hay ninguna carga conectada, con un THDV del 1,54% (la norma UNE-EN 50160 [48] establece como límite el 8% para esta misma magnitud).

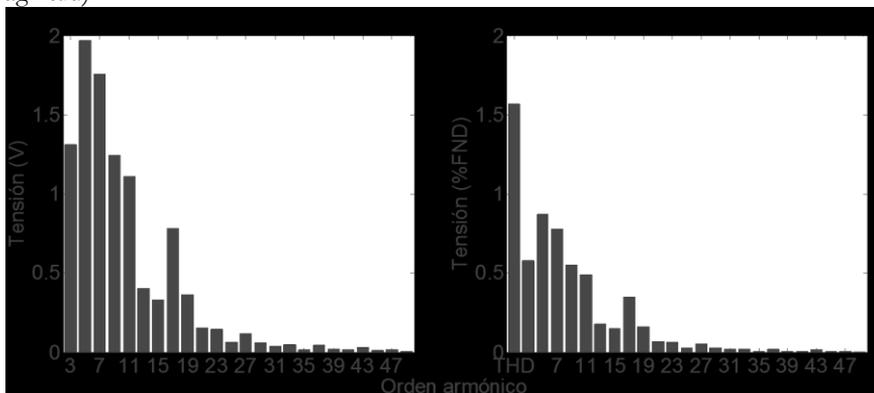


Figura 3-1. Espectro de los armónicos de tensión en el punto de medida.

A continuación estudiaremos cada uno de los dispositivos de manera individual. Primero la magnitud de los armónicos de corriente, y posteriormente el ángulo de fase (tanto de manera independiente como a través del número complejo).

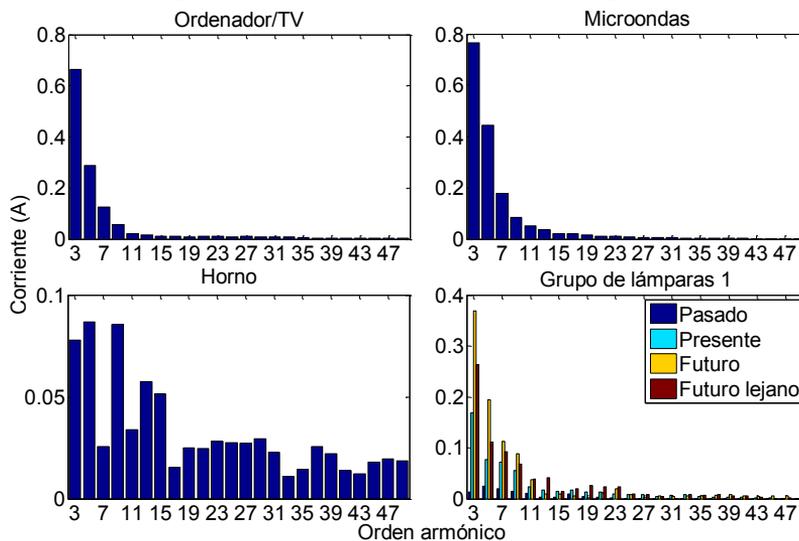


Figura 3-2. Espectro de los armónicos de corriente de los dispositivos utilizados en el experimento.

La primera conclusión que puede extraerse de la figura es que el ordenador/TV y el microondas poseen un espectro muy similar, en el que el 3º armónico es el predominante, y los niveles se reducen al incrementar la frecuencia. Por encima del armónico 11 la emisión del ordenador/TV decrece lentamente con el aumento de frecuencia; mientras que esta disminución es más continua en el caso del microondas.

La emisión en valor absoluto (A) en el microondas y ordenador/TV es prácticamente igual; pero si se expresa como porcentaje de la corriente fundamental, la

emisión del ordenador/TV es tres veces mayor (los armónicos 3, 5 y 7 son el 65%, 30% y 12% en el caso del ordenador/TV; y alrededor del 20%, 10% y 5% en el microondas).

En el lado opuesto se encuentra el horno, con un espectro totalmente diferente. De hecho, la emisión es mucho menor (menor de 0,1 A o 4% de la fundamental) y permanece prácticamente constante al incrementar la frecuencia. Para mayores órdenes armónicos, la emisión del horno es mayor que en el caso del microondas o del ordenador/TV.

También se muestra la emisión de las lámparas para los cuatro escenarios. En todos los casos había 12 lámparas conectadas, lo que varía es la tecnología de las mismas. En el caso del escenario pasado (sólo incandescentes), la emisión es muy baja. Los bajos órdenes armónicos (del orden 3 al 9) la emisión es mayor en el futuro cuando coexisten CFL y LED. Por tanto, se puede concluir que, para la misma cantidad de lúmenes, CFL tienen mayor impacto que las LED. Lo mismo sucede con los elevados órdenes (del orden 39 al 49). En el rango de frecuencias entre el orden 13 al 37, las lámparas LED tienen mayor emisión que las CFL, principalmente debido al amplio espectro de las LED. Esto no supone un gran inconveniente ya que estos órdenes no impactan en el contenido total.

Una mayor información acerca del contenido armónico en CFL lo encontramos en [54], donde se recogen datos de varios estudios acerca de este tipo de lámparas. Las lámparas con baja distorsión eran todas lámparas CFL con balastos externos, mientras que las que poseen más distorsión eran lámparas con balastos electrónicos integrados. La siguiente figura muestra los resultados de las diferentes lámparas fluorescentes.

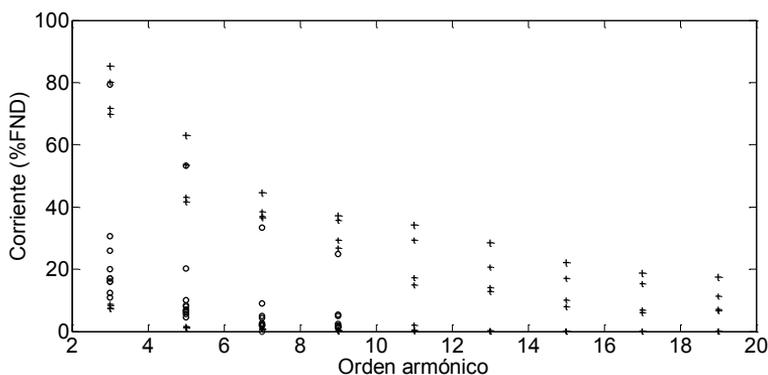


Figura 3-3. Espectro de corriente tomado de diferentes tipos de lámparas fluorescentes.

Fuente: [54].

Una vez analizada la magnitud de cada equipo, a continuación estudiamos el ángulo de fase. La presentación de los armónicos de corriente en el plano complejo proporciona una forma útil de análisis gráfico del efecto suma para los armónicos individuales. Por este motivo es necesario estudiar de esta forma cada armónico de manera independiente, para posteriormente en el apartado 3.9 poder estudiar todo el conjunto. La magnitud del armónico complejo es la magnitud obtenida tras la aplicación de la FFT, el argumento es el ángulo de fase calculado según se ha descrito en el apartado 2.7.1. En la Figura 3-4 se muestran los armónicos de corriente 3°, 5°, 7°, y 9° de cada dispositivo mediante representación en el plano complejo. En concreto, es esta figura la que nos ayudará a entender cómo cada dispositivo contribuye a la emisión armónica total y se usará para explicar las cargas agregadas.

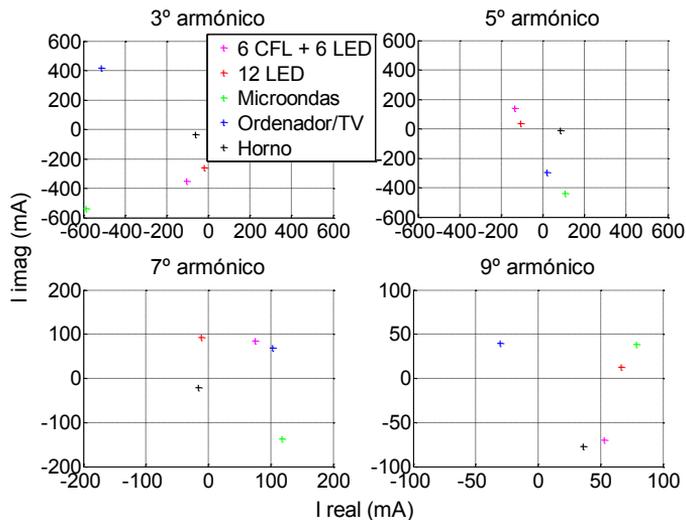


Figura 3-4. Armónicos de corriente en el plano complejo (mA) de los dispositivos utilizados en el experimento.

Al realizarse las siguientes medidas no se encontraba conectado ningún otro equipo; por lo que el espectro muestra la emisión de un único dispositivo. El espectro se midió durante 3 minutos (en 180 intervalos consecutivos de 1 s), pero al observarse la estabilización de la corriente tras el primer minuto, éste se ha eliminado, con lo que sólo consideramos corrientes estabilizadas. Por tanto, habría que mostrar 120 muestras, pero como la emisión es prácticamente constante, se ha escogido el valor medio de cada armónico para cada carga. Es muy importante volver a decir que no es posible comparar ángulos de diferentes armónicos ya que tienen diferentes frecuencias. También hay que tener en cuenta que cada armónico tiene distinta escala.

El aspecto más significativo es que el 5° armónico en los tres dispositivos (microondas, ordenador/TV y horno) está localizado en el 4° cuadrante, mientras que las lámparas se encuentran en el segundo. Por tanto en este orden armónico se podría dar una cancelación entre algunos de los equipos y las lámparas. Además, el ordenador/TV y microondas alcanzan el mayor valor absoluto con el 3° armónico (en torno a 400 mA). Estos últimos equipos tienen similar valor absoluto, pero diferente ángulo de fase.

El microondas alcanza el mayor valor absoluto en los armónicos 3°, 5° y 7°, ocurriendo justo lo contrario en el horno. Sin embargo, el mínimo valor se alcanza con las lámparas. En el caso del 9° armónico, los dispositivos tienen parecido valor absoluto.

Si ahora nos fijamos en el ángulo, todos los equipos excepto el ordenador/TV tienen el 3° armónico situado en el 3° cuadrante; sin embargo el ordenador/TV se encuentra en el segundo cuadrante. El 7° y 9° armónicos están más expandidos por los cuatro cuadrantes que el 3° y 5°. En este caso por tanto, se espera una mayor cancelación.

3.3 Emisión de los estados probable y menos probable

Tras la realización del experimento y evaluación de los resultados se pueden distinguir dos estados, uno que llamaremos probable y otro menos probable. Al estudiar la

emisión de una instalación doméstica, esta distinción es menos relevante ya que lo que más importa es la mayor emisión. Pero desde el punto de vista de las redes de distribución, donde importa la emisión combinada de diferentes instalaciones domésticas, lo más importante es este estado probable. En el experimento se asumió que para un cliente doméstico típico las lámparas y el ordenador/TV se usarían hasta varias horas al día, mayoritariamente por la tarde/noche. En este estado se espera un alto factor de coincidencia. El estado de mayor consumo, cuando todos los equipos estarían conectados, es probable que ocurra durante un corto periodo de tiempo, por lo que se espera un bajo factor de coincidencia.

El estado probable, para el que su espectro se muestra en el gráfico de la izquierda de la Figura 3-5, ocurre cuando están conectadas todas las lámparas junto con el ordenador/TV (9-12 min). Para la mayoría de los armónicos, la emisión con CFL es mayor que con LED. Las excepciones son los armónicos 13, 17, 19, 21, 23 y 25. La distribución armónica de este estado sigue una tendencia decreciente cuanto mayor es el orden armónico, variando entre aproximadamente 0,8 A (3º armónico en futuro) a 0,07 A (9º armónico en el escenario presente). Desde el 13 en adelante, los valores son prácticamente los mismos (0,02 A para todos los escenarios).

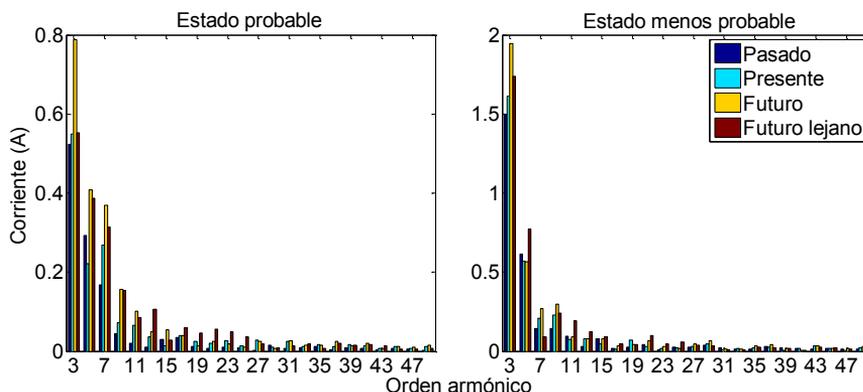


Figura 3-5. Espectro armónico de corriente (A) de los estados probable y menos probable, para todos los escenarios.

El armónico 3º incrementa significativamente del presente al futuro, pero una mayor sustitución de lámparas resultaría en un nivel de emisión muy similar al del escenario presente. Algo parecido sucede en el 5º armónico, donde el mayor incremento se produce del presente al futuro; aunque futuro y futuro lejano ahora poseen un nivel similar. El 7º armónico muestra un incremento en todos los escenarios en los que no están presentes las incandescentes. Lo que podría ser un problema con el 7º armónico es el hecho de que se doble el valor de la emisión, pero es probable que sea una consecuencia de la baja emisión de dicho armónico en el escenario pasado. Lo que también merece la pena destacar son los armónicos 11 y 13. En el 11º las CFLs originan un importante incremento pero los LED no tan elevado, y el 13º en el futuro lejano (con sólo LED) posee un alto nivel.

El espectro del estado menos probable (15-21 min) con todas las cargas conectadas, se muestra en el gráfico de la derecha de la Figura 3-5. La mayor diferencia entre dos órdenes armónicos consecutivos tiene lugar entre el 3º (1,9 A en el escenario futuro) y el 5º (0,6 A también en el futuro). Tras esta gran diferencia, los valores armónicos fluctúan en torno a 0,3 A (desde el 7º al 15º), y se estabilizan en alrededor de 0,05 A.

El 3º armónico muestra un incremento hasta el futuro y algún decremento en el futuro lejano. Sin embargo, el 5º muestra un menor decremento hasta el futuro, pero un incremento en el futuro lejano. Finalmente, el 7º muestra un gran incremento hasta el futuro, pero en el futuro lejano la emisión es menor que en el pasado. Como se ha dicho anteriormente, es un estado poco probable, pero su emisión es elevada en el 3º y 5º armónicos, lo que podría tener alguna influencia.

3.4 Emisión en los diferentes estados

No solo es importante estudiar los cambios en el consumo (potencia activa) tras la sustitución, sino también los cambios resultantes en la emisión armónica tanto de manera independiente (cada hogar individual) como colectivamente. Esta emisión se debería estudiar a través tanto de la magnitud como del ángulo de fase. Normalmente se cuantifica en términos de magnitud de los armónicos de corriente, pero el ángulo es también importante ya que nos permite estudiar cualquier efecto de cancelación entre dispositivos y clientes. Además, los armónicos de corriente producidos por cargas agregadas son ligeramente inferiores a la suma algebraica de los armónicos de corriente producidos por cada una de ellas independientemente.

3.4.1. Evolución de la magnitud de los armónicos de corriente

En la Figura 3-6 se muestra la evolución de los armónicos 3º, 5º, 7º y 9º de corriente en los cuatro escenarios. Se puede apreciar que la sustitución de las lámparas incandescentes resulta en un incremento generalizado de la distorsión armónica. Sin embargo este incremento es diferente entre los diferentes estados (lo que equivale a decir entre diferente cantidad de equipos conectados) y para diferentes órdenes armónicos. La mayor emisión se obtiene en la mayoría de los casos en el escenario futuro, con CFL y LED, pero también algunas veces en el escenario futuro lejano, e incluso, en casos aislados en los escenarios presente y pasado.

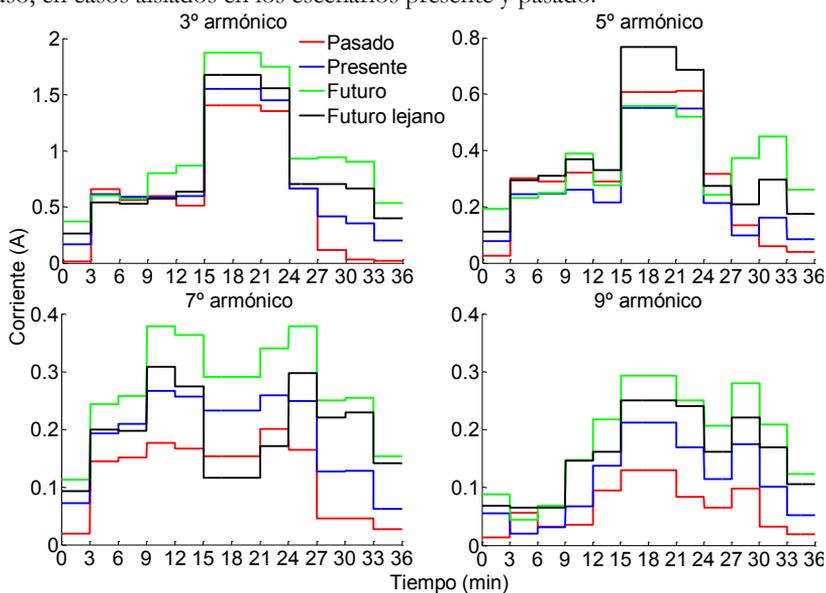


Figura 3-6. Valores de los armónicos de corriente 3º, 5º, 7º y 9º (A) frente al tiempo.

El incremento relativo es mayor para los armónicos 7° y 9° que para los 3° y 5°. Lo que no está claro es si es una tendencia general o se debe a los valores iniciales bajos de los armónicos 7° y 9°.

3.4.2. Evolución de los ángulos de fase de los armónicos de corriente

El ángulo de fase no es una información importante por sí sola, como puede ser el caso de la magnitud de los armónicos. Sin embargo, es necesario considerarlo desde el punto de vista tal que si consideramos el experimento como lo ocurrido con un cliente doméstico, en la realidad hay muchos de ellos conectados a la red de distribución. Los distintos clientes usan sus cargas en distintos momentos en el tiempo, por lo que su emisión armónica es diferente en distintos instantes de tiempo.

En el intervalo de la Figura 3-7 a la Figura 3-10 se ha representado usando gráficas de barras los ángulos de fase (grados) con respecto a la fundamental de la tensión durante todo el experimento (36 min) para cada uno de los cuatro escenarios. Al igual que con la magnitud, se ha estudiado en detalle hasta el 9° armónico. Cada barra representa el ángulo de fase para ese segundo, por lo que podemos estudiar la tendencia del ángulo tras cada conexión/desconexión.

El ángulo del 3° armónico en el escenario pasado tiene cuatro niveles diferentes, 260°, 140°, 180° y 210°. En los otros tres escenarios hay también cuatro niveles alrededor de 250°, 150°, 175° y 190°. Cuando están presentes los LED (en el futuro y futuro lejano) no hay grandes cambios en el ángulo antes y después de la conexión del microondas. Existen diversos aspectos independientemente de las lámparas conectadas en ese instante, como la disminución en el ángulo de fase al conectar el ordenador/TV; el incremento en el ángulo al desconectar esa misma carga; el apenas impacto con la conexión y desconexión del horno ni de GL3; ni la conexión de GL2 (salvo en el pasado porque son incandescentes).

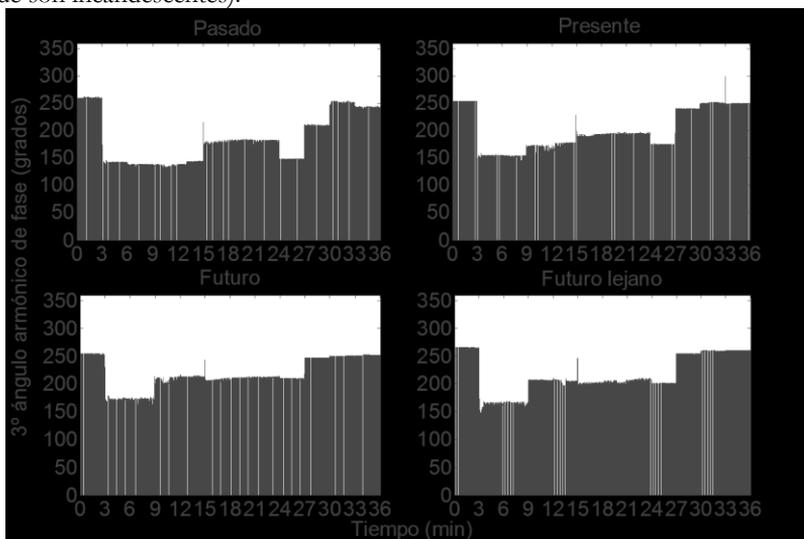


Figura 3-7. Valores del ángulo de fase (grados) del 3° armónico de corriente frente al tiempo.

Si a continuación estudiamos el ángulo del 5º armónico, encontramos que en todos los escenarios la conexión del ordenador/TV incrementa dicho ángulo, independientemente de las lámparas conectadas. Justo lo contrario de lo ocurrido con el 3º armónico, ya que dichos órdenes armónicos poseen signos opuestos. Lo mismo ocurre con el microondas, siempre aumenta el ángulo. El escenario pasado es muy estable durante todo el experimento, principalmente debido al hecho de que todas las cargas tienen ese orden armónico en el mismo ángulo. Esto conllevaría a que en el escenario pasado la emisión de diferentes clientes simplemente se sumaría aritméticamente. Por el contrario esto no sucede en los otros escenarios cuando se conectan otras lámparas. En los escenarios presente y futuro se puede ver cada cambio resultado de la conexión de las cargas, por lo que se puede decir que cuando las CFL están presentes el ángulo del 5º armónico varía mucho más. Se debe principalmente al ángulo de disparo fijado en UNE-EN 61000-3-2 [29], que debería ser diferente al de la TV. Por tanto, en todos los escenarios excepto en el pasado, hay una fuerte variación en los ángulos durante el experimento, y llevaría a una cancelación de la emisión entre diferentes clientes.

Sin embargo, ya que las lámparas tienen poca potencia en el futuro lejano, no hay cambios al conectar GL3. Pero sí puede verse la conexión de GL2 (disminución del ángulo en el minuto 9). En el futuro no se puede ver la conexión del horno, pero es posible verlo en los otros escenarios, incluso en el futuro lejano.

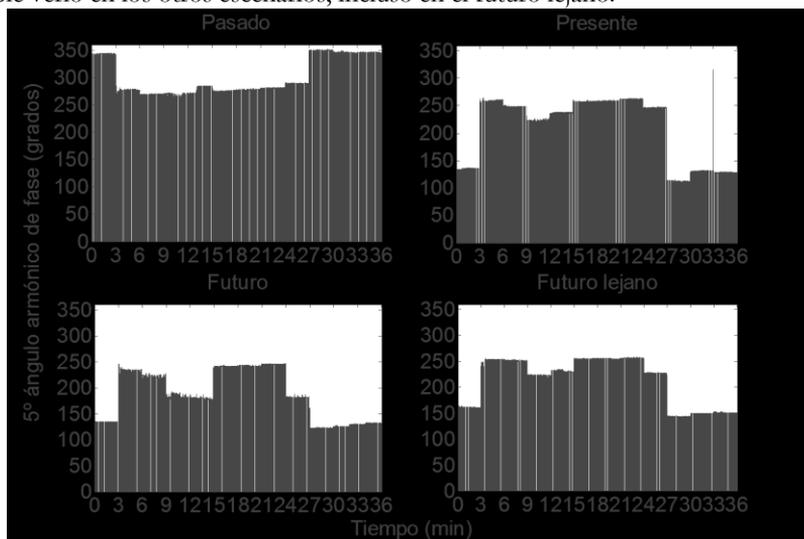


Figura 3-8. Valores del ángulo de fase (grados) del 5º armónico de corriente frente al tiempo.

A continuación se estudia el ángulo del 7º armónico para todos los escenarios. En el escenario pasado el ángulo del 7º varía mucho más con la conexión del microondas que el 5º. Sin embargo, en el caso del escenario presente, el ángulo es más constante salvo por la conexión del microondas. Parece ser que la compensación del 7º armónico sucede a expensas de un incremento en el 7º. Es apreciable en todos los escenarios el cambio en el ángulo con la conexión del ordenador/TV, pero mientras que el cambio en el 3º y 5º ángulos es el mismo en todos los escenarios, el cambio en el 7º es más importante para el futuro y futuro lejano que para los otros escenarios.

El microondas es otra carga importante dentro del experimento. Apenas puede apreciarse en el 5º armónico, pero en el caso del 7º es posible ver su conexión. Tanto en los escenarios pasado como presente el ángulo del 7º armónico debido al microondas parece ser 90º diferente de ese mismo armónico de otro equipo. Incluso en el caso del futuro y futuro lejano el ángulo tiene un gran cambio al conectar el microondas, lo que también puede explicar el comportamiento de este orden armónico. Como resultado, se puede decir que el microondas afecta mucho al ángulo del 7º armónico independientemente de las lámparas que estén conectadas en ese momento.

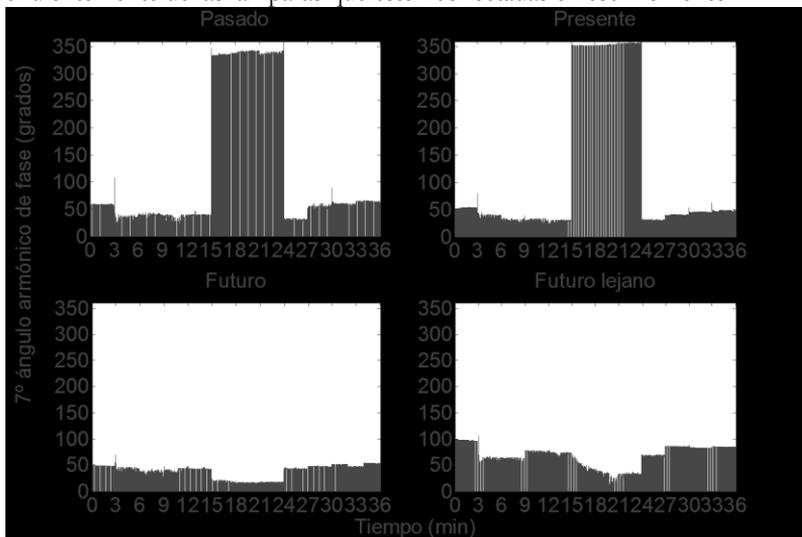


Figura 3-9. Valores del ángulo de fase (grados) del 7º armónico de corriente frente al tiempo.

Y finalmente, en la Figura 3-10 se muestra el 9º armónico. Este es mucho menos estable entre conexiones que el ángulo de otros armónicos. Es difícil, por ejemplo, apreciar la conexión de GL2 o GL3 en el escenario futuro. El ángulo del presente y futuro es prácticamente el mismo (alrededor de 300º). Sin embargo, cuanto mayor es el número de lámparas de LED, menor es el ángulo. Por ejemplo, la conexión de GL2 empieza decreciendo el ángulo en el escenario lejano futuro, y cuando todas las cargas están conectadas (entre los minutos 15-18) se alcanza el máximo valor, y es el mismo valor que cuando sólo los LED están conectadas (30-36).

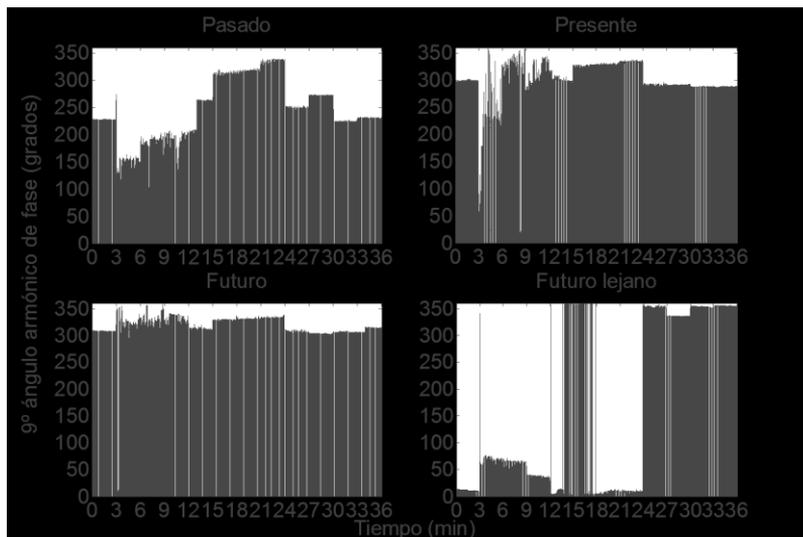


Figura 3-10. Valores del ángulo de fase (grados) del 9º armónico de corriente frente al tiempo.

3.5 Conexión y desconexión de equipos en los diferentes escenarios

Existen varios aspectos comunes entre los cuatro escenarios, independientemente de las lámparas conectadas. La conexión del microondas (en el minuto 15) ocasiona siempre un incremento en los armónicos 3º, 5º y 9º, y una disminución en el 7º. La conexión de GL3 (con atenuador, en el minuto 6) siempre conlleva una disminución del 3º armónico, mientras que es menor el impacto del 5º y 7º en todos los escenarios. La conexión del ordenador/TV (en el minuto 3) siempre aumenta los armónicos 3º, 5º y 7º, pero el 9º decrece en todos los escenarios excepto en el pasado. La desconexión del horno (en el minuto 30) disminuye el 3º y 9º, incrementa el 5º y mantiene el 7º en todos los escenarios salvo en el pasado. En el pasado, presente y futuro, la desconexión del microondas disminuye los armónicos 3º y 5º; sin embargo el 7º aumenta. Por otro lado, en el pasado y presente, la desconexión del ordenador/TV disminuye el 3º; y no provoca apenas variación en el futuro y futuro lejano.

A continuación se tratarán con más detalle los diferentes escenarios y las acciones de conexión/desconexión. En Tabla 3-2 y

Tabla 3-3 se hace referencia a los valores numéricos de los armónicos en cada instante de conexión.

Tabla 3-2. Armónicos de corriente (A) ponderados sobre 3 minutos dependiendo del escenario y de las lámparas conectadas en ese instante

Desconexión:	<i>Ordenador/TV</i>			<i>GL3</i>			<i>GL2</i>			<i>Horno</i>			<i>Microondas</i>					
	<i>GL1</i>			<i>GL1 + ordenador/TV</i>			<i>GL1+ GL3 +ordenador/TV</i>			<i>GL1+ GL2+ GL3+ordenador/TV</i>			<i>GL1+ GL2+ GL3+ordenador/TV+</i>					
	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7
Desconexión:	0.01	0.03	0.02	0.66	0.3	0.14	0.55	0.29	0.15	0.57	0.31	0.18	0.5	0.29	0.17	1.4	0.61	0.15
Presente	0.17	0.08	0.07	0.62	0.25	0.19	0.58	0.24	0.21	0.58	0.25	0.27	0.61	0.23	0.26	1.56	0.55	0.23
Futuro	0.38	0.19	0.12	0.61	0.24	0.24	0.58	0.25	0.26	0.8	0.38	0.38	0.9	0.28	0.36	1.88	0.56	0.29
Futuro lejano	0.26	0.11	0.09	0.54	0.3	0.2	0.52	0.31	0.2	0.57	0.37	0.3	0.64	0.33	0.28	1.68	0.77	0.11

Tabla 3-3. Armónicos de corriente (A) ponderados sobre 3 minutos dependiendo del escenario y de las lámparas conectadas en ese instante

Desconexión:	<i>GL3</i>			<i>Microondas</i>			<i>Ordenador/TV</i>			<i>Horno</i>			<i>GL1</i>		
De fondo:	<i>GL1+ GL2 + ordenador/TV+ horno+microondas</i>			<i>GL1+ GL2 +ordenador/TV+ horno</i>			<i>GL1+ GL2 +horno</i>			<i>GL1+ GL2</i>			<i>GL2</i>		
	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7	H3	H5	H7
Pasado	1.3	0.61	0.2	0.67	0.3	0.16	0.12	0.13	0.04	0.03	0.06	0.05	0.02	0.039	0.03
Presente	1.44	0.54	0.26	0.66	0.21	0.25	0.42	0.1	0.13	0.35	0.16	0.13	0.2	0.08	0.06
Futuro	1.74	0.52	0.34	0.93	0.24	0.38	0.94	0.37	0.25	0.9	0.45	0.25	0.63	0.31	0.18
Futuro lejano	1.54	0.68	0.17	0.7	0.27	0.3	0.7	0.21	0.22	0.65	0.29	0.23	0.4	0.17	0.14

Las medidas del escenario pasado muestran que aunque las lámparas son incandescentes, provocan un impacto en la emisión del total de la instalación. La conexión de las lámparas con el atenuador (en el minuto 6) origina una pequeña reducción en la emisión total y la desconexión de las mismas (en el minuto 21) provoca un pequeño incremento en la emisión total. La caída en la desconexión del ordenador en el 3º armónico es prácticamente igual que el aumento en el encendido del mismo. Esto no es sorprendente ya que tanto GL1 como GL2 son incandescentes en el escenario pasado.

En este experimento se puede ver que el 7º armónico de corriente es el que más incrementa derivado de la sustitución de las lámparas incandescentes, y este incremento podría ocasionar algún inconveniente (en el escenario pasado tiene un valor medio de 0,1 A, y en los otros escenarios la media está por encima de 0,2 A). El hecho de que el 7º armónico sea tan bajo en el escenario pasado es una de las razones por las que muestra un gran incremento relativo. Este armónico es el menos impactado debido a la conexión y desconexión de equipos. Incluso la emisión del microondas se ve reducida de alguna forma para este orden armónico.

Posteriormente se analiza el escenario presente. Si estudiamos el ordenador/TV, la conexión aumenta los armónicos 3º, 5º y 7º, y la desconexión reduce los mismos (lo mismo que ocurría en el pasado), sin embargo la disminución debido a la desconexión es menor que el aumento en la conexión. Por otro lado, el 9º armónico presenta el comportamiento opuesto. La conexión de GL3 frente al ordenador/TV provoca una pequeña disminución en el 3º armónico y un ligero aumento en el 7º. La conexión de GL2 incrementa más este último orden. La desconexión del microondas origina una disminución del 3º y 5º como en el escenario pasado, pero el 7º no cambia.

En el escenario futuro, la conexión del ordenador/TV incrementa el 3º y 7º. La conexión de GL3 no afecta a la emisión armónica, la de GL2 incrementa el 3º, 5º y 7º; y la del horno provoca siempre un incremento en el 3º, pero una disminución en el 5º y 7º. Lo mismo ocurre en el escenario futuro lejano. En el caso de la desconexión del microondas, al igual que en los dos anteriores escenarios, el 3º y 5º disminuyen; sin embargo el 7º aumenta. Más destacable es el comportamiento tras la desconexión del ordenador/TV, en el que el 3º armónico no cambia, el 5º aumenta y el 7º disminuye. En este escenario se alcanza el mayor valor tras la conexión del microondas (2 A).

Finalmente se puede ver de nuevo el incremento en el contenido armónico debido a la conexión del ordenador/TV en el escenario futuro lejano. La conexión del horno y del microondas y la desconexión del horno tienen el mismo comportamiento que el escenario futuro. Lo que es nuevo de este escenario es que la desconexión del ordenador/TV mantiene el 3º (como en el futuro), pero disminuye tanto el 5º como el 7º.

3.6 Cambios en el espectro armónico

En las secciones anteriores se han estudiado principalmente los armónicos 3º, 5º, 7º y 9º. Por la facilidad de análisis de los elevados órdenes armónicos (hasta el orden 50) se ha elegido una forma diferente de visualización de resultados que se explica en el apartado 2.11 sobre representación de la evolución temporal. El máximo se calcula sobre cada armónico para cada escenario de manera independiente, por lo tanto, no es posible

compararlos. La Figura 3-11 muestra la emisión para los cuatro escenarios en los diferentes estados.

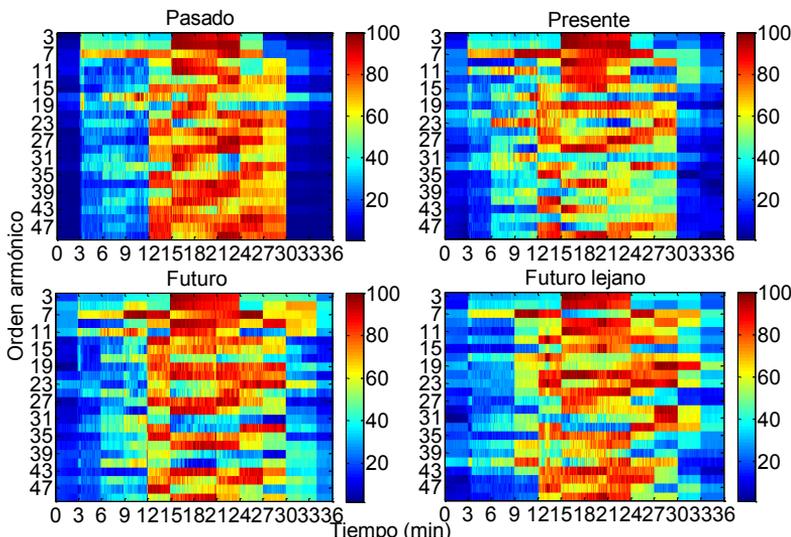


Figura 3-11. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del máximo valor para cada escenario) para los diferentes estados.

De esta figura se puede llegar a la conclusión de que los valores más altos (indicados por el color rojo) los alcanzan los armónicos 3 y 5 entre los minutos 15 y 24, para cualquiera de los escenarios. Sin embargo, otros armónicos como el 15° alcanzan su máximo valor entre los minutos 18 y 21 en los escenarios presente y futuro lejano. El armónico 39 posee altos valores solo en el escenario pasado.

Mientras que los armónicos dominantes (3° y 5°) y varios de los otros armónicos alcanzan sus valores más altos entre los minutos 15 y 24 (cuando está conectado el microondas), esto no se hace extensivo al resto de órdenes. Varios de los armónicos (por ejemplo el 7°, 15°, 35° y 47°) tienen sus mayores valores entre los minutos 12 y 15 (todas las cargas excepto el microondas). Pero esto varía incluso entre los diferentes escenarios. El comportamiento más destacable tiene lugar con el 7° armónico, donde su máximo valor ocurre entre los minutos 9 y 12 (todas las lámparas más ordenador/TV) para todos los escenarios. Ninguno de los otros armónicos muestra este mismo comportamiento y en general en ninguno de los escenarios hay demasiados armónicos que muestren un elevado nivel durante este estado.

Otra observación importante implica los cambios en el minuto 12 cuando se conecta el horno. La emisión del horno es baja a bajas frecuencias; sin embargo, al conectarse, varios de los elevados órdenes (13 y mayores) presentan un elevado incremento (el color se cambia a rojo) en todos los escenarios. De hecho se alcanza el máximo, al igual que cuando se conecta el microondas. Por el contrario, no hay ninguna coincidencia relacionada con el orden que más incrementa, y solo los armónicos 35 y 47 muestran un gran incremento en los cuatro escenarios.

Cuando sólo hay lámparas conectadas (en los minutos 0 al 3 y del 30 al 36) la emisión es baja en la mayoría de los casos. Esto revela que las lámparas por sí mismas no son una fuente de emisión dominante. Sin embargo existen algunas excepciones. El periodo más representativo es del minuto 30 al 33, cuando todas las lámparas no

atenuadas (30 lámparas en total) están conectadas. En este periodo y en el escenario futuro lejano el armónico 19 alcanza un alto nivel. También se producen altos niveles (superiores al 50%) en los armónicos 5, 7, 9, 11 y 23 en el escenario futuro y en los armónicos 7, 9, 17, 23, 29 y 31 en el escenario futuro lejano. La emisión procedente de las lámparas solo parece desplazarse hacia altas frecuencias cuando los CFL son reemplazados por lámparas LED.

Otro estado que merece especial atención es el que se produce del minuto 9 al 12, y que se corresponde con el estado más probable que se discutió con anterioridad. El armónico 7 posee alto nivel en todos los escenarios; así como el 17^o en el pasado, el 11, 17, 23 y 31 en el presente, el 11 en el futuro, y el 41 en el futuro lejano. El cambio de futuro a futuro lejano muestra de nuevo un desplazamiento hacia elevados órdenes armónicos.

En todos los escenarios el microondas es la principal fuente armónica, no sólo en los órdenes bajos, sino también en los altos (29, 37 y 43). En el escenario pasado esta carga provoca elevados valores del 3, 5, 9, 11, 19, 31 y 41. Tras la desconexión de GL3 (en el minuto 21) se produce una reducción en el 9, 11, 19 y 31, pero un incremento en 13, 27 y 49. La conexión del horno resulta en un gran incremento en 35, 41, 43 y 47. En el presente, la desconexión de GL3 no solo reduce algunos de los bajos órdenes armónicos (11, 15, 29) como en el pasado escenario, sino también de los elevados órdenes (37 y 43).

En el escenario futuro la conexión de GL2 resulta en un incremento del armónico 31. La conexión del horno provoca un aumento en muchos armónicos, algunos de ellos como los del presente (35 y 47), pero lo que es nuevo es el incremento de los armónicos de bajo orden (13 y 17). La conexión del microondas provoca un aumento del 3, 5 y 29 (algunos de ellos comunes a los escenarios anteriores), pero en general el incremento es menor que en los otros escenarios. De nuevo, la desconexión de GL3 reduce los mismos armónicos (9, 11 y 29) y aumenta otros (25 y 27). La desconexión del microondas resulta en un aumento del 23 y 33.

Finalmente, el escenario futuro lejano muestra que prácticamente hasta la conexión del microondas, el contenido armónico es bajo. Al conectar el horno (en el minuto 12), los armónicos 7 y 47 son el único valor que permanece elevado (como sucede en los otros tres escenarios). La desconexión de GL3 hace que el armónico 15 permanezca constante, en lugar de disminuir como sucede en los otros escenarios. Sin embargo, el 27 se ve reducido. Después de la desconexión del microondas (en el minuto 24), muchos armónicos disminuyen sus valores, pero tras la desconexión del ordenador/TV (en el minuto 27; aunque GL1, GL2 y el horno siguen conectados) los armónicos 29 y 31 incrementan.

Por tanto, como resumen de los cambios en el espectro armónico podemos destacar que el microondas es el causante de un elevado contenido armónico tanto en las altas como en las bajas frecuencias, independiente de la tecnología de lámpara conectada. Además, se muestra que las lámparas por sí mismas no son una fuente dominante. Sin embargo, la emisión procedente de las lámparas parece desplazarse a las altas frecuencias derivado de la introducción de los LED.

3.7 Cambios en el espectro interarmónico

Se ha considerado también el análisis de los interarmónicos. Se han dibujado en la Figura 3-12, de la misma forma que en la Figura 3-11 para los armónicos impares, en tanto por ciento del valor máximo de cada orden para todos los intervalos, en cada escenario de manera independiente. Tal y como se describió en el apartado 2.7 sobre medida de armónicos e interarmónicos, el orden interarmónico 3 engloba las frecuencias 150 y 200 Hz (órdenes armónicos 3 y 4), el orden interarmónico 5 engloba las frecuencias 250 y 300 Hz (órdenes armónicos 5 y 6), y así sucesivamente.

Analizando ahora la figura, primero es necesario señalar que los elevados valores que aparecen en el pasado (en el intervalo 17-19) y en el futuro lejano (12-15) no corresponde a ningún dispositivo del experimento, sino que proceden de la red. Esto se conoce tras el estudio de la impedancia en esos intervalos. Lo mismo ocurre probablemente con los elevados valores en el escenario presente entre los minutos 32 y 35. A partir de esto se puede concluir que, al menos para esta instalación, los mayores interarmónicos no son debido a la emisión de los equipos sino que proceden de eventos que tienen lugar en algún otro lugar de la red.

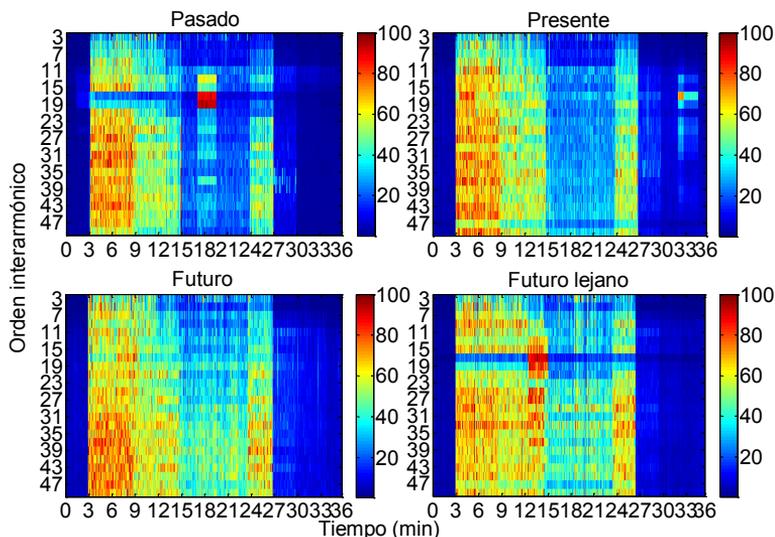


Figura 3-12. Valores de interarmónicos (porcentaje del valor máximo para cada escenario).

A continuación, si analizamos la figura, en general los interarmónicos tienen altos valores cuando el ordenador/TV está conectado (entre los minutos 3-7). Esto se cumple en los cuatro escenarios, por lo que podemos concluir que esta carga es una fuente interarmónica. La figura muestra también que el microondas (encendido entre los minutos 15-24) provoca una disminución en los interarmónicos. El nivel de reducción depende de las lámparas conectadas en el mismo instante. Por ejemplo, en los escenarios pasado y presente, los interarmónicos reducen los valores; sin embargo, en el futuro y futuro lejano esta reducción sólo tiene lugar en los elevados órdenes.

Otro resultado importante se puede ver en los escenarios pasado y presente, donde las lámparas incandescentes (la mitad de las cuáles están conectadas en el minuto 9) reducen el nivel de los interarmónicos de orden más alto. Cuanto mayor es la frecuencia, menor es la impedancia de la lámpara (resistiva, por lo tanto, constante con la

frecuencia) comparada con la impedancia de la fuente (inductiva, por lo que incrementa con la frecuencia).

Se puede decir generalmente que la sustitución de las lámparas no produce impacto en la emisión de interarmónicos. Pero la presencia de CFL y LED, a diferencia de las incandescentes, provoca una menor disminución de interarmónicos frente a otros equipos. Otra importante conclusión de este estudio interarmónico es que el ordenador es una importante fuente de interarmónicos, ocurriendo lo contrario con el microondas, el cual provoca una reducción de los mismos. El valor de reducción armónica debido al microondas depende de la tecnología de lámpara conectada.

3.8 Cambios en el espectro armónico no característico

En la Figura 3-13 el espectro de los interarmónicos y de los armónicos pares se ha unido formando el espectro no característico. Como en las Figura 3-11 y Figura 3-12 los valores se han mostrado en tanto por ciento del valor máximo de cada escenario y cada orden. Se puede ver que los armónicos pares bajos (2, 4, 6) son los que tienen mayores valores cuando el microondas está conectado (entre los minutos 15 y 24). Si comparamos las Figura 3-12 y Figura 3-13, la elevada emisión de armónicos no característicos es claramente visible cuando el ordenador/TV está encendido (entre los minutos 3 y 27). Cuando el microondas está encendido hay menos emisión no característica, por lo que el microondas provoca una disminución de los armónicos no característicos, que depende de las lámparas conectadas en ese instante. Dicha atenuación también se da en los armónicos impares, pero a esas frecuencias está más compensado por la emisión del microondas. Los elevados valores de los mayores órdenes no característicos en los escenarios futuro y futuro lejano tienen carácter aleatorio debido a la presencia de lámparas LED.

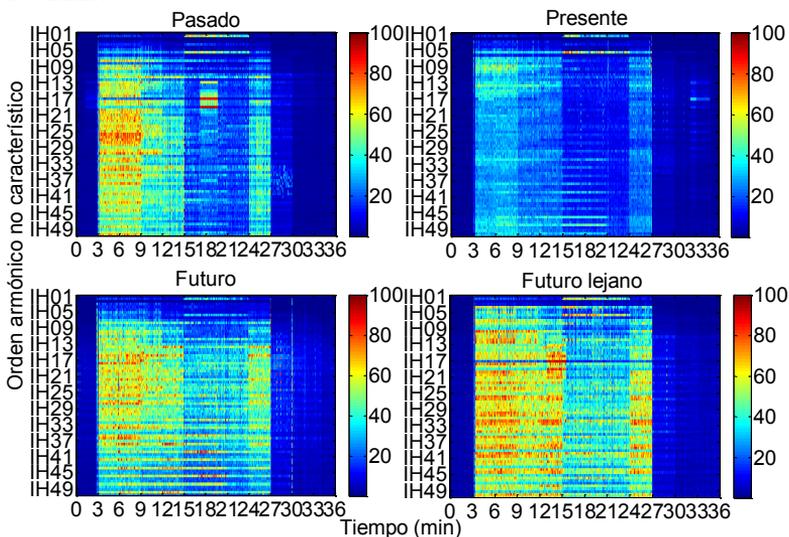


Figura 3-13. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo para cada escenario).

3.9 Cambios en el plano complejo

La presentación en el plano complejo proporciona una forma adecuada de análisis del efecto de suma o cancelación para armónicos individuales. En el eje horizontal hemos representado la corriente real, y en el vertical el valor imaginario, ambas magnitudes en mA. Se han eliminado los valores de la corriente tras la conexión, de forma que se representen corrientes estables. Se representan 120 muestras para cada color, que son los símbolos '+' para cada orden armónico y cada escenario. Se ha hecho uso de diferentes colores para mostrar la conexión de las diferentes cargas:

- magenta: GL1;
- rojo: GL1 + ordenador/TV;
- verde: GL1 + ordenador/TV + GL3;
- amarillo: GL1 + ordenador/TV + GL3 + GL2;
- negro: GL1 + ordenador/TV + GL3 + GL2 + horno;
- azul: GL1 + ordenador/TV + GL3 + GL2 + horno + microondas.

A su vez, el color azul representa el estado menos probable, y el amarillo el más probable. Con estas figuras somos capaces de ver los cambios derivados de añadir cargas, y de predecir el impacto derivado de su conexión.

En la Figura 3-14 se ha mostrado el 3º armónico de corriente tras cada conexión (hasta que todas las cargas están conectadas) para todos los escenarios. Varios aspectos deben ser destacados. Por ejemplo, el primero de ellos es que la emisión de GL1 en el escenario pasado, con sólo lámparas incandescentes, es pequeño pero no nulo, debido a que la forma de onda de la tensión está ligeramente distorsionada (THDV del 1,54%). Si analizamos el valor absoluto de la corriente, por un lado los escenarios presente y futuro muestran un aumento en la emisión debido a la cantidad de CFL y LED conectadas; y por otro, el escenario futuro lejano tiene menos emisión debido a que la corriente fundamental de las lámparas de LED es menor que las CFL.

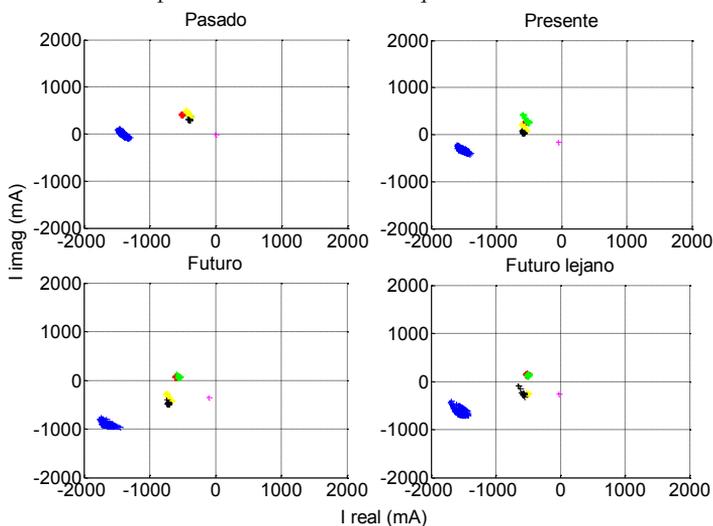


Figura 3-14. 3º armónico de corriente en el plano complejo (mA).

Si nos fijamos en el ángulo de fase de GL1 (magenta), hay algunas diferencias entre los tres escenarios presente, futuro y futuro lejano, pero no suficiente como para una importante cancelación. De hecho, la emisión es más bien constante, lo que significa que tampoco habrá mucha cancelación entre diferentes consumidores. Sin embargo, cuantos más dispositivos se conectan, mayor es la desestabilización en la emisión, lo que dará como resultado que haya alguna cancelación entre diferentes consumidores.

Podemos seguir el cambio en el ángulo de fase tras la conexión de los diferentes dispositivos. El cambio de magenta a rojo (añadir ordenador/TV a GL1) tiene el mismo ángulo (165°) en todos los escenarios. En el futuro se produce un pequeño incremento en la parte imaginaria de la corriente en comparación con otros escenarios. Si seguimos analizando la conexión de las distintas cargas, no hay ningún cambio tras conectar GL3 (de rojo a verde). La conexión de GL2 (de verde a amarillo) produce un cambio de 270°, pero varía según el tipo de lámpara conectada. Por ejemplo, en el escenario futuro lejano es exactamente 270°, pero en el futuro, debido a las CFL, es mayor de 270°. Además, el estado probable (color amarillo) presenta una nube de puntos más expandida cuando las CFL se encuentran conectadas. Después, la conexión del horno (de amarillo a negro) varía muy poco debido a su configuración. Finalmente, la conexión del microondas (de negro a azul) también tiene el mismo ángulo. La única diferencia es la mayor dispersión en la nube de puntos en el escenario futuro lejano.

Si ahora estudiamos el 5° armónico, la principal diferencia con respecto al 3° es que mientras que el vector en el último tiene casi la misma magnitud, en el caso del 5° éste varía en todos los escenarios. El futuro tiene el mayor ángulo de fase, y el futuro lejano el mayor valor absoluto.

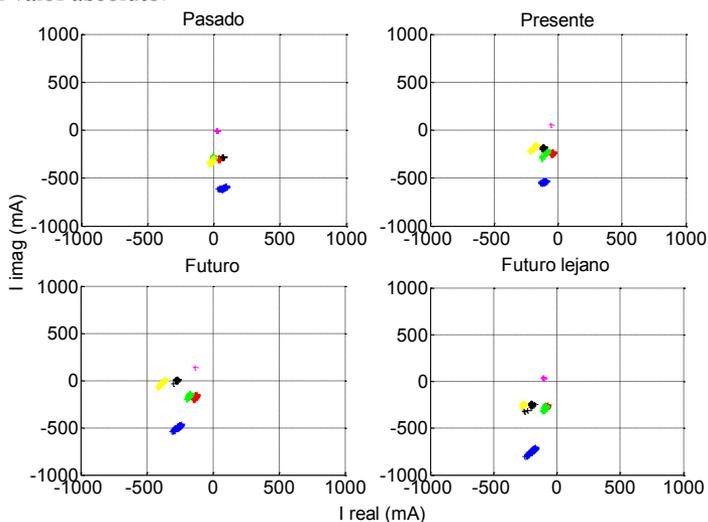


Figura 3-15. 5° armónico de corriente en el plano complejo (mA).

A continuación se procederá a su análisis tal y como se hizo con el 3° armónico. Tras añadir el ordenador/TV (de magenta a rojo) hay un cambio de 270°, lo que significa que este cambio no altera la parte real sino la imaginaria. A continuación añadimos GL3 (de rojo a verde), y el cambio es 180°. En el escenario futuro lejano el ángulo es menor que en el resto de los escenarios debido a la menor potencia de las LED. Después se procedió a la conexión de GL2 (de verde a amarillo), y se puede ver que el ángulo es

menor de 180° cuando están conectadas las CFL, y es exactamente ese valor en el caso de las LED. Por lo que se puede decir que la conexión de esta lámpara compensa parte de la emisión del ordenador/TV. De hecho, esta compensación es mayor en el escenario futuro y menor en el futuro lejano. Se puede también ver lo establecido en el UNE-EN 61000-3-2 [29] sobre el ángulo de disparo en las CFL menores de 25 W. Tras esto se conectó el horno (de amarillo a negro), y el ángulo es 0° . Lo mismo que con el ordenador, el cambio tras añadir el microondas es 270° (de negro a azul).

A continuación, se estudia el 7º armónico. Cuando sólo hay lámparas conectadas (GL1), el escenario futuro lejano es el único que está en el segundo cuadrante, los otros tres están en el primero. Esto provoca que cuando se conectan las otras cargas, la corriente máxima real se encuentre cercana a 100 mA, mientras que en el caso del escenario futuro el máximo valor es 300 mA. El cambio tras la conexión del ordenador/TV (de magenta a rojo) es casi el mismo, y el ángulo es de 50° . Tras añadir GL3 (de rojo a verde) el ángulo varía dependiendo de la carga. Cuando están implicadas las LED, apenas hay variación. Al conectar GL2 (de verde a amarillo), el ángulo en el caso del escenario futuro es 50° , mientras que en el futuro lejano es 90° . La conexión del horno también varía de un escenario a otro (de amarillo a negro). En el futuro lejano el cambio es de 270° , mientras que en los otros escenarios es de 180° . Finalmente, tras añadir el microondas (de negro a azul) el ángulo es de 270° , independientemente de las cargas conectadas en ese instante.

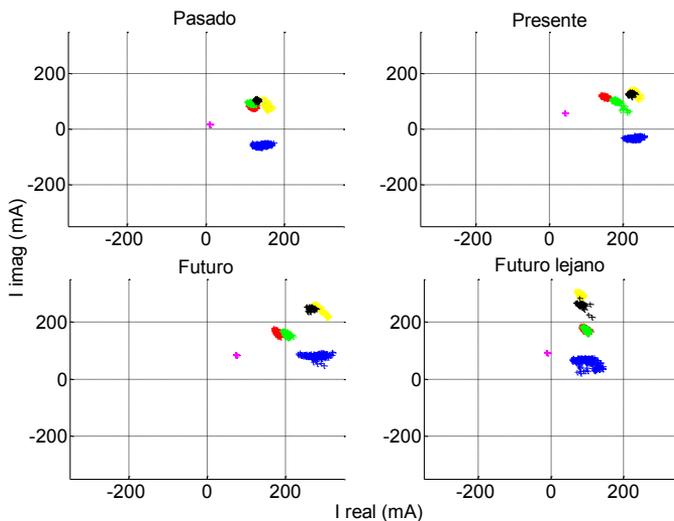


Figura 3-16. 7º armónico de corriente en el plano complejo (mA).

Finalmente, el caso del 9º armónico de corriente. Lo primero a resaltar es la disposición del mismo para los diferentes escenarios. El presente y futuro (con CFL implicadas) poseen este armónico en el cuarto cuadrante, mientras que cuando sólo hay LED, este armónico se sitúa en el primero. Cuando sólo hay lámparas (GL1) los escenarios presente y futuro se encuentran en el cuarto, mientras que en el futuro lejano está en el primero. Independientemente de las cargas conectadas en ese instante, este armónico se localiza siempre en el mismo cuadrante. Por tanto, se espera poca cancelación del mismo ya que no hay variación en ángulos para los distintos dispositivos analizados.

Estudiamos ahora el cambio debido a la conexión de las diferentes cargas. Tras la conexión del ordenador (de magenta a rojo) el ángulo es siempre 135° para cualquiera de los escenarios. Tras añadir GL3 (de rojo a verde) el ángulo es cercano a -45° ; pero apenas hay variación, al igual que con los otros armónicos, en el futuro lejano. Después conectamos GL2 (de verde a amarillo) y el ángulo es menor de 0° cuando están presentes las CFL, y superior a 0° con sólo LED. Tras la conexión del horno (de amarillo a negro) hay un cambio de 270° , y tras añadir el microondas (de negro a azul) es de 0° .

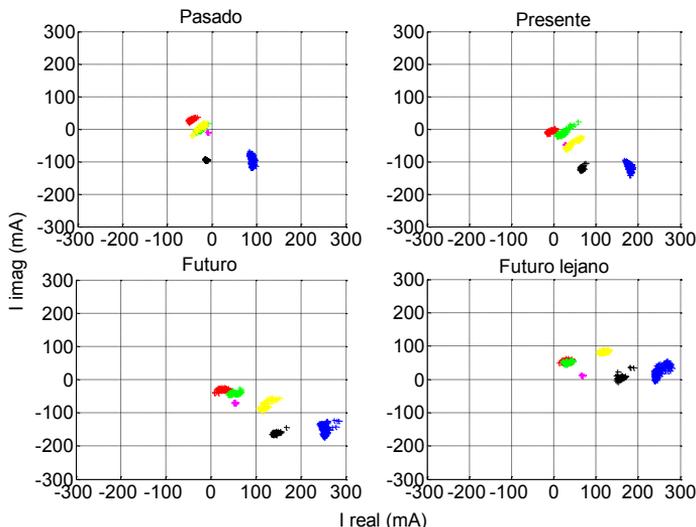


Figura 3-17. 9º armónico de corriente en el plano complejo (mA).

A lo largo de este capítulo se ha hecho uso de las magnitudes y ángulos de fase de los armónicos de corriente para analizar la distorsión sobre alumbrado de interior. Como resumen de las conclusiones obtenidas de este experimento, se desprende que a pesar de la elevada distorsión que presentan las lámparas energéticamente eficientes, no suponen una gran contribución a la emisión armónica total dentro de un entorno doméstico ya que absorben muy poca corriente. De hecho, se ha observado que el impacto depende en gran medida de los otros equipos que se encuentren conectados en ese instante y que otros equipos como la televisión, ordenador, o microondas tienen un mayor impacto que las lámparas.

Además, se ha observado que el impacto de las LED es, para la mayoría de los armónicos, menor que el de las CFL para la misma cantidad de lúmenes, debido principalmente a que las LED poseen menor magnitud en el armónico fundamental de la corriente.

En los escenarios pasado (sólo incandescentes) y presente (incandescentes más CFL), el conjunto ordenador/TV es la principal fuente de armónicos para los elevados órdenes; sin embargo, cuando intervienen los LED, las contribuciones armónicas del anterior conjunto son menos visibles. Además, el microondas es la principal fuente de armónicos en todos los escenarios, tanto en los bajos como elevados órdenes.

Por otro lado, las observaciones muestran un cambio de la emisión a las elevadas frecuencias tras la introducción de los LED, así como los interarmónicos y armónicos

pares parecen incrementar con los mismos. Sin embargo, aunque no parece ocurrir ningún impacto severo, se necesitan más estudios en este tema.

Del estudio en el plano complejo se extrae que cuantos más dispositivos se conecten, mayor es la dispersión en la emisión, lo que ocasionará una mayor cancelación entre diferentes clientes. Además, con ayuda del plano complejo es posible predecir el contenido armónico derivado de añadir cargas.

4 Estudio en alumbrado público con balastos electromagnéticos

En este apartado se incluye primero una revisión histórica de los balastos electromagnéticos. A continuación, como aplicación de dichos equipos se han realizado dos experimentos, y se puede decir que uno es teórico, y el otro práctico. Esta distinción se hace en cuanto a que uno de estos experimentos se ha llevado a cabo en el laboratorio (por lo que son condiciones ideales), y el otro en un Campus Universitario (que sería la aplicación práctica).

El primero de los experimentos se desarrolló en el laboratorio de Pehr Högström en la Universidad Técnica de Luleå (Skellefteå, Suecia). En él se encuentra construido un modelo eléctrico de una casa a gran escala, con longitudes reales de cable (alrededor de 200 m), alimentado por un transformador de 800 kVA, del que se alimentan dos edificios del Campus. Por tanto, los resultados no están influenciados por dispositivos conectados al mismo tiempo.

El segundo de ellos se llevó a cabo en el Campus Universitario de Rabanales (Córdoba, España). En este caso, se monitorizó el punto de alimentación del alumbrado exterior de la residencia universitaria, estando este punto compartido por las cargas conectadas en el interior de la residencia. Por tanto, en este caso los resultados si están influenciados por el resto de cargas. Sin embargo, esto es lo que sucede en la realidad, por lo que son también interesantes los resultados obtenidos en el mismo.

4.1. Revisión histórica

Los balastos electromagnéticos se usan normalmente para estabilizar la lámpara al punto de funcionamiento requerido, mediante limitación de la corriente de descarga. Dicho punto viene dado por la intersección de la característica de la lámpara (variación de la potencia de la lámpara en función de la tensión para diferentes tensiones de alimentación) y del balasto (variación de la potencia de la lámpara frente a la tensión para una tensión de alimentación constante).

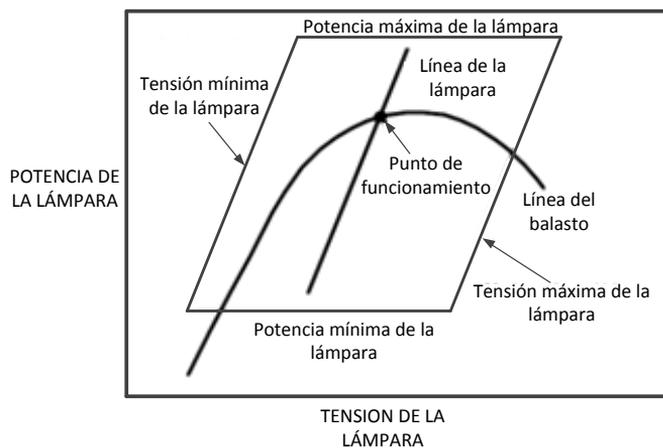


Figura 4-1. Características de la lámpara y del balasto.

Las ventajas que ofrece este tipo de balastos son [68], [69]:

- Bajo coste de instalación y mantenimiento.
- Elevada vida útil aun en entornos atmosféricos extremos (más de 30 años a 105 °C).
- Componentes fácilmente reciclables.
- Tecnología robusta y segura.
- Capacidad de volverse a encender de forma autónoma tras una perturbación eléctrica.

Por el contrario, además del peso, presenta otras desventajas como:

- Bajo rendimiento, en especial en la regulación de la potencia de la lámpara mediante variación de la tensión de red.
- Problemas en el arranque y re-arranque si existen perturbaciones en la alimentación.
- Difícil regulación de flujo luminoso.
- El punto de trabajo se ve modificado por el envejecimiento de la lámpara, lo que redundaría en una aceleración del mismo.
- Valores bajos del f.d.p. y elevados del THDI lo que conlleva al empleo de grandes cargas reactivas en cabecera de línea a fin de mejorar el f.d.p.
- Riesgo de sobrecorrientes por saturación del balasto, provocado por lámparas envejecidas.
- Efecto estroboscópico y *flicker* debidos a la baja frecuencia de funcionamiento.
- No se pueden emplear en sistemas alimentados con CC.
- No suelen presentar sistemas de ahorro energético.

- No poseen una salida luminosa constante (depende de la tensión de alimentación).

4.2. Principio de funcionamiento

Inicialmente el arrancador (que es simplemente un interruptor) está cerrado y la corriente fluye a través del circuito, calentando los electrodos. Una fracción de segundo después, el arrancador se abre y la energía almacenada en el balasto electromagnético provoca un pico de tensión entre los electrodos de la lámpara (alrededor de 800 V) lo que origina la descarga en la lámpara. Una vez encendida, su tensión es menor que la tensión de red, y el arrancador queda abierto. Se usa también un condensador externo de aproximadamente 10 nF para mejorar el funcionamiento del arrancador y también para reducir las radio interferencias en el encendido de la lámpara. Finalmente, en este tipo de balastos inductivos es obligatoria la colocación de un condensador a la entrada para alcanzar un valor razonable del f.d.p. de entrada.

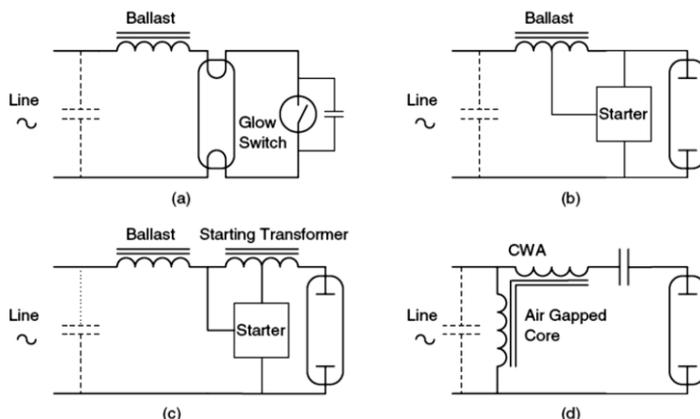


Figura 4-2. Tipos de balastos electromagnéticos para lámparas de baja frecuencia. Fuente [68].

4.3. Experimento en laboratorio

En el laboratorio se disponía de tres luminarias de los fabricantes Thorn y Mistral formadas por lámparas de sodio de alta presión de 50 W de Philips y balastos electromagnéticos. Más concretamente, los equipos auxiliares de cada una de dichas luminarias son, para la de la marca Thorn, un balasto electromagnético Tridonic Atco Z603W, un arrancador VOSSLOH SCHWABE Z 400 MS A1 y un condensador CCL 10nF. La segunda luminaria está formada por un balasto electromagnético NK 70/50 LU 230/240V—HELVAR, un condensador Cambridge de 10 μ F, un arrancador BAG TURGI MZN 70 S-T01. La tercera, de marca Mistral, está formada por un balasto electromagnético STRIHL, un condensador STRIHL CBB60 12 μ F, y un arrancador electrónico BAG Electronics NI 70 S 4K-TU.

Para el análisis armónico se han hecho una serie de medidas en los puntos indicados en el esquema de la Figura 4-3 sobre una de las lámparas puesto que las tres estudiadas poseen los mismos componentes. En la Figura 4-4 se muestran las formas de onda de la tensión a la entrada del conjunto (denominado como V_1), corriente a la entrada del conjunto (denominado como I_1), corriente a la entrada del condensador, corriente a la

entrada del arrancador y a la entrada también de la lámpara (se refiere al bulbo en sí mismo).

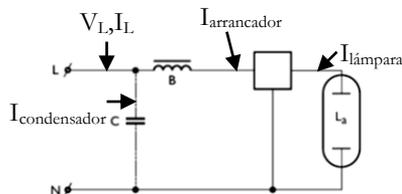


Figura 4-3. Esquema de conexiones en la luminaria.

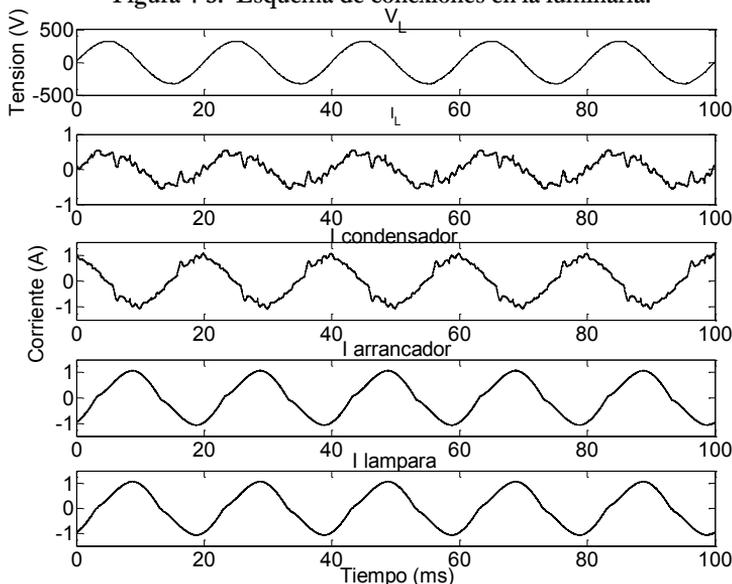


Figura 4-4. Representación temporal de la tensión y corriente a la entrada, corriente en el condensador, arrancador y lámpara.

De esta figura se puede ver cómo la amplitud de la corriente de entrada es menor que la corriente en el condensador. Esto se debe a la diferencia en el ángulo de fase producido por el condensador y el balasto. La forma de onda de la corriente es similar a la mostrada en [51], donde se analizaban diferentes lámparas de sodio y mercurio, y se apreciaba que la conexión del condensador, además de mejorar el f.d.p., aumentaba la distorsión armónica de la corriente. Aquí también se observa el elevado contenido armónico derivado de la conexión del condensador.

También coincide con lo mostrado en [70], donde se muestrean lámparas de sodio de alta presión funcionando con balastos electrónicos y electromagnéticos. En concreto el experimento implicó la utilización de 273 lámparas de 150 W durante un mes y medio. Además, se contemplan los ahorros derivados del apagado con fotocélula y reloj astronómico.

Si nos fijamos en la distribución armónica de estos elementos, en la Figura 4-5 se aprecia la disminución del tercer armónico de la corriente a la entrada del conjunto (I_L), en comparación con la corriente en la lámpara. Sin embargo, en el resto de componentes

armónicos esto no ocurre, y a la entrada del conjunto encontramos un valor mucho mayor que en la lámpara (bulbo).

Por tanto, lo que importa frente a conexiones de dichas lámparas en combinación con otras es el contenido armónico de la corriente I_L .

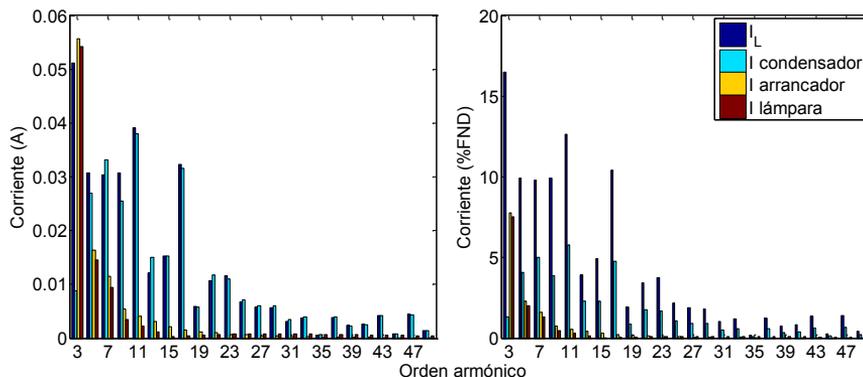


Figura 4-5. Evolución de los armónicos impares (A y % FND) para la corriente de entrada, en el condensador, arrancador y lámpara.

Para poder valorar la distorsión total analizamos el THD de la corriente I_L , el cuál alcanza el 35,5%. Este valor es semejante al encontrado en [51], donde para potencias de lámparas de sodio comprendidas entre 150 y 400 W, el THDI oscilaba entre 41% y 46%. En esa misma referencia, se observó la dependencia del THDI con la potencia. También coincide con los resultados de [70], donde una lámpara de sodio de 150 W posee un THDI de 34%.

Analizando cada armónico de corriente de I_L por separado, los órdenes 5, 7 y 9 tienen valores relativamente altos, en torno a 30 mA (10% de la fundamental). Además, el armónico 11 es especialmente alto (aproximado a 40 mA o 12,6% de la fundamental) si lo comparamos con sus armónicos adyacentes (30 mA y 12 mA en los órdenes 9 y 13 respectivamente). Esto no se observa en [70], donde el 11 posee una magnitud de 4,7% de la FND. Los armónicos de orden más alto se encuentran en torno a 4 mA (1% de la fundamental).

Para analizar en más detalle la tensión y corriente en la entrada del conjunto, en la siguiente figura se representan ambas formas de onda en una ventana de 100 ms.

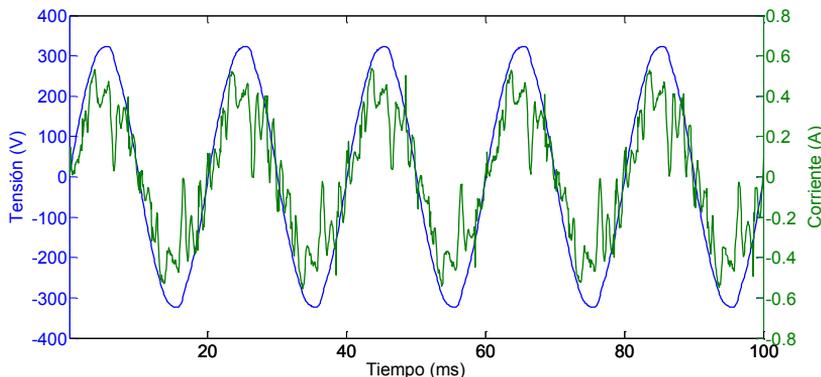


Figura 4-6. Formas de onda de tensión y corriente durante 100 ms.

4.3.1. Cambios en la potencia

Antes de estudiar el contenido armónico frente al tiempo, es necesario conocer el tiempo de estabilización de estas lámparas. Para ello se han monitorizado cada una de las lámparas por separado durante 45 min con el equipo Power Xplorer PX5 de Dranetz. Este se configuró con intervalos de muestreo de 30 s.

En la Figura 4-7 se ha representado la evolución temporal de la potencia activa para cada una de las lámparas estudiadas conectándolas de manera independiente al PCC. Se aprecia cómo hasta pasados los 10 minutos desde su encendido, las tres lámparas no están estabilizadas. Además, ésta pasa por unos picos máximos que llegan hasta 5 W por encima de la potencia que posee la lámpara en régimen permanente.

La utilidad de este estudio de la potencia activa es la interpretación de los armónicos, ya que durante los 10 primeros minutos, tiene sentido hablar de porcentaje de la fundamental, pero después de este punto ya no porque la fundamental no varía.

Además, es también importante señalar las pérdidas de este balasto, en el que la lámpara es de 50 W, y la potencia del conjunto, dependiendo del balasto, oscila entre 60, 65 y 70 W, con lo que la potencia del balasto se encuentra en torno a 15 W. Las pérdidas, por tanto, oscilan en torno al 30%.

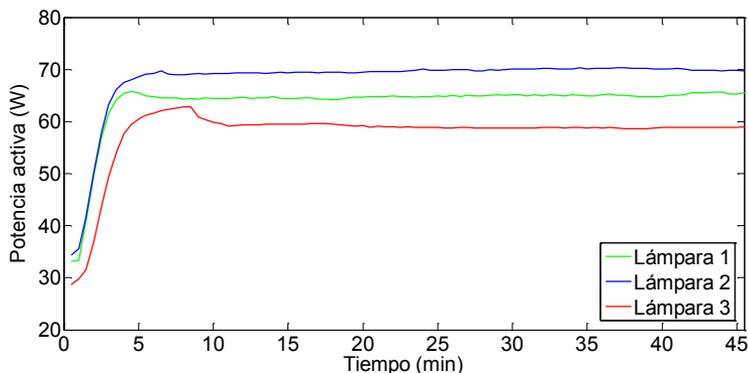


Figura 4-7. Evolución de la potencia activa frente al tiempo para las tres lámparas analizadas.

4.3.2. Cambios el espectro armónico

4.3.2.1. Baja frecuencia

A continuación se evalúa el contenido armónico frente al tiempo, también de manera independiente, para cada una de las lámparas que se han estudiado dentro de este conjunto de luminarias con balastos electromagnéticos. La frecuencia de muestreo del equipo de medida es de 12,8 kS/s, por lo que según el criterio de Nyquist, podemos extraer frecuencias de hasta 6 kHz.

Al igual que con el experimento de lámparas de interior de la sección anterior, la representación temporal de los armónicos se hace como tanto por ciento del valor máximo de cada armónico para todos los instantes de tiempo. Este método se explica con más detalle en el apartado 2.11 sobre representación de la evolución temporal.

En la Figura 4-8 se representan los armónicos impares hasta el orden 50 durante los 45 min muestreados. Como puede verse, tras la estabilización de la lámpara, las frecuencias en el rango 150-550 Hz se mantienen prácticamente constantes en magnitud para las tres lámparas, pero a partir de 1300 Hz, las dos últimas lámparas poseen variaciones en magnitud que parecen no corresponder con ningún patrón de comportamiento, son aleatorios. Sin embargo, en el caso de la primera lámpara los órdenes 35, 41 y 43 guardan la misma estabilidad que los armónicos de menor orden.

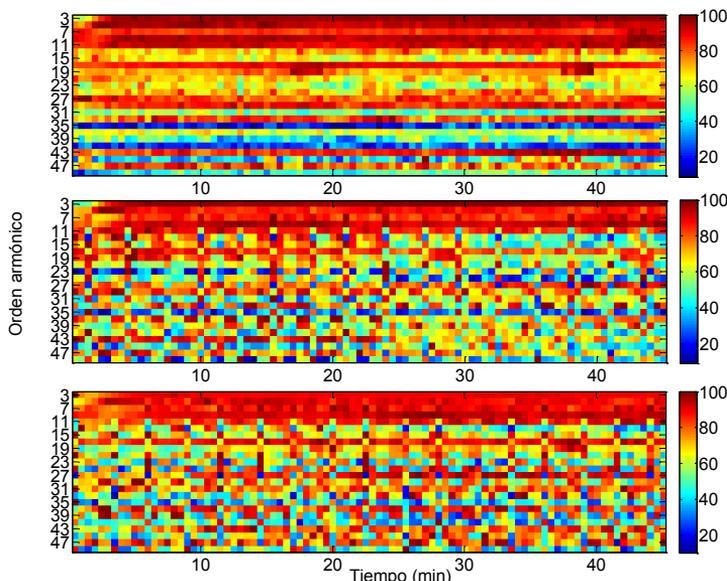


Figura 4-8. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas.

Es conveniente repetir la figura anterior pero ponderando el contenido armónico a partir del minuto 10, que es a partir de cuándo se produce la estabilización de las lámparas. Se aprecia que hasta el armónico de orden 9, el contenido armónico permanece constante a partir del minuto 10; sin embargo, a partir de ese orden, como veíamos en la Figura 4-8, el contenido armónico sigue un patrón que se repite cada aproximadamente 3 minutos.

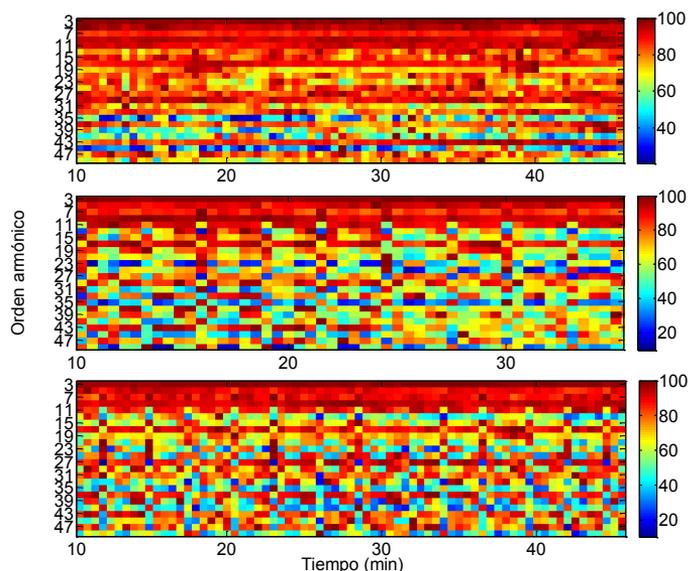


Figura 4-9. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas a partir del minuto 10.

Una vez analizadas las anteriores figuras, como lo que permiten es analizar la estabilidad de los armónicos frente al tiempo, para poder ver en realidad cuánta es la variación en magnitud desde que la lámpara está estabilizada (10 min) hasta el final del experimento (45 min), representamos la evolución con diagrama de barras, de nuevo, para todos los órdenes armónicos impares hasta el orden 50. Esto se muestra en la Figura 4-10, donde cada uno de los colores de las barras corresponde a cada una de las muestras tomadas durante los 45 min (un color por cada 30 s), representándose desde el minuto 10 al 45.

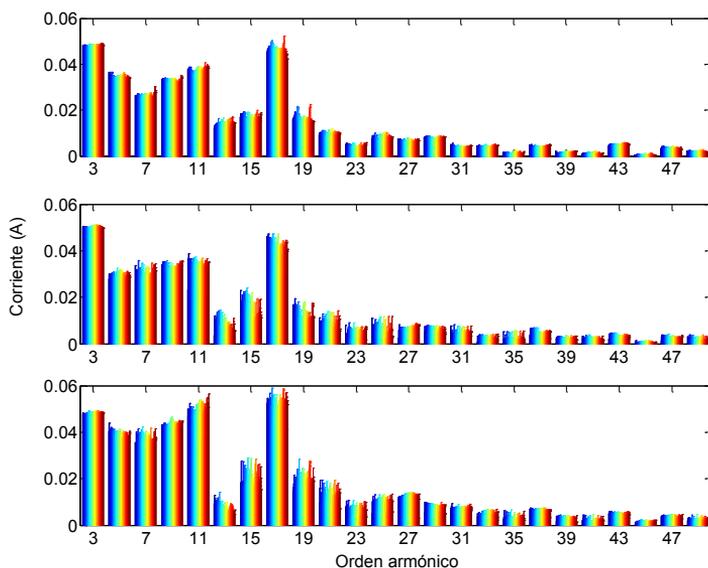


Figura 4-10. Valores de los armónicos de corriente (A) para cada una de las lámparas estudiadas.

Al examinar en detalle cada orden armónico, se observa que entre el orden 15 y el 25 la variación en magnitud es más representativa que en los demás órdenes. Sin embargo no hay que olvidar que las magnitudes a las que nos referimos varían entre 16,6 mA y 3 mA (6,4 mA de variación).

Las variaciones en las crestas de las barras son las variaciones en los colores de las Figura 4-8 y Figura 4-9. Por lo general, se aprecia que no es tan significativa como se desprendía de aquellas.

Por tanto, como salvo por el comportamiento de algunos órdenes, los demás siguen prácticamente una magnitud constante en el periodo muestreado; de la figura anterior se puede extraer una media de la evolución temporal de los armónicos de corriente, de forma que tengamos unos valores promedio de los mismos en este tipo de tecnología. El THDI es del 35% como también se observó de Figura 4-5. La fundamental alcanza 0,28 A. Como vemos no existe una cierta tendencia en dicha evolución, el armónico 11 es superior al 5. El mayor valor lo posee el armónico 3° (47,8 mA o 17% de la fundamental). También es apreciable que las altas frecuencias no poseen un excesivo bajo valor (4,7 mA o 1,7% de la fundamental), cuando lo normal es que debieran tenerlo. Incluso el armónico 17 (46 mA) es mayor que el 11 (37 mA).

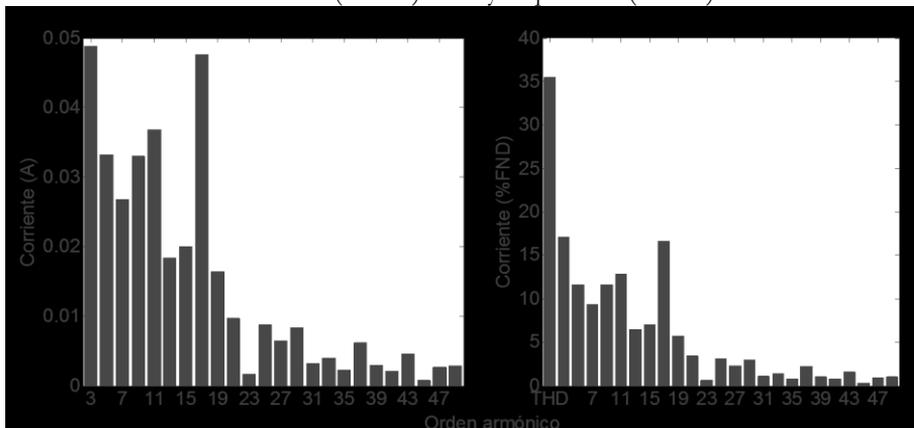


Figura 4-11. Espectro de los armónicos de corriente (A y %FND) para una lámpara con balasto electromagnético.

4.3.2.2. Alta frecuencia

Para poder extraer y analizar el contenido armónico en alta frecuencia, y deduciendo de las figuras anteriores que tras la desestabilización inicial, transcurridos 10 min la lámpara se estabiliza; se ha repetido la medida de la forma de onda de la corriente a la entrada del conjunto con otro instrumento de medida que posee más resolución. Más concretamente se ha usado un equipo DL850V SCOPECORDER de la empresa Yokogawa configurado con una frecuencia de muestreo de 10 MS/s, analizándose una ventana de 200 ms. Con esa frecuencia se cumple el criterio de Nyquist para la obtención del espectro en frecuencias de hasta 150 kHz.

Primero se ha visualizado el rango de frecuencias entre 2 y 150 kHz. Para ello, una vez extraída la forma de onda de la corriente, y aplicada la FFT sobre la corriente, se ha hecho la agregación indicada en el anexo B de la norma UNE-EN 61000-4-7 [58] y

recogido en el apartado 2.7 sobre medida de armónicos e interarmónicos. Aunque dicho anexo se refiera al rango de frecuencias 2-9 kHz, el método se ha hecho extensivo hasta 150 kHz.

Si analizamos la Figura 4-12, se observa que la corriente disminuye al aumentar la frecuencia, y no existe ningún pico en todo el intervalo. Esto refleja que no existe en el circuito ningún componente que posea conmutación, de otra forma, aparecerían en determinadas frecuencias, valores elevados de la corriente.

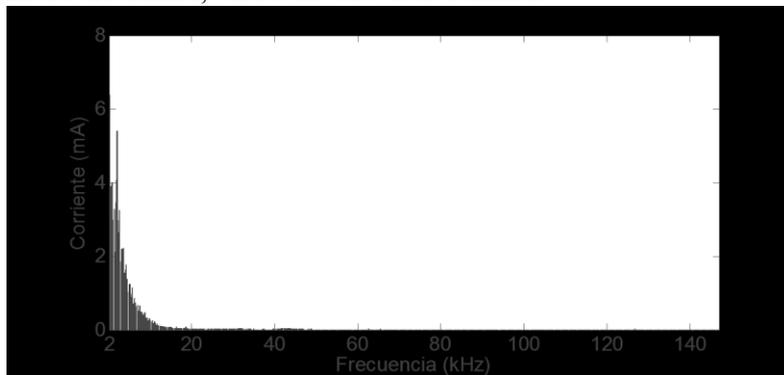


Figura 4-12. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta a la lámpara de sodio conectada a un balasto electromagnético en el rango 2-150 kHz.

Para ver en más detalle el rango 2-9 kHz que es el que se indica en el anexo B de la mencionada norma, en la Figura 4-13 se muestra dicho intervalo. La agregación ha seguido el mismo criterio que anteriormente se ha indicado. Se aprecia, al igual que con la anterior figura, cómo el mayor valor de la corriente sobrepasa los 6 mA y tiene lugar a una frecuencia de 2,1 kHz. A partir de esa frecuencia, el valor de la corriente decae, y sólo aumenta en la frecuencia 3,9 kHz.

Además, ese máximo alcanzado a los 2,1 kHz (6 mA) corresponde a un 2% de la fundamental, y los menores valores alcanzados por las frecuencias cercanas a 9 kHz representan un 0,25% de la fundamental (menor de 1 mA).

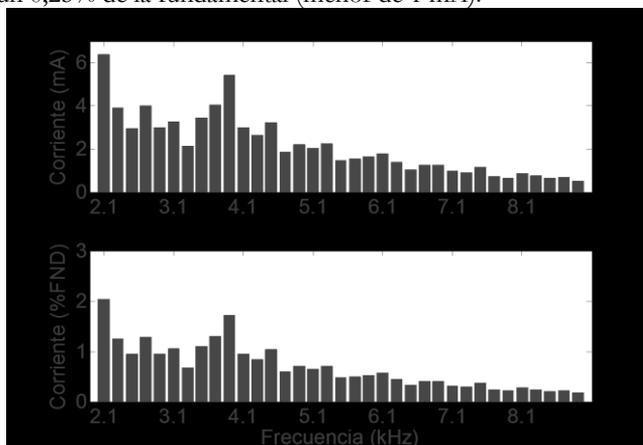


Figura 4-13. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta a la lámpara de sodio conectada a un balasto electromagnético en el rango 2-9 kHz.

4.3.3. Cambios en el espectro interarmónico

A continuación, y tal como se hizo con el espectro armónico, estudiamos la evolución de los interarmónicos. Estos han sido agrupados según indica el anexo A de la norma UNE-EN 61000-4-7 [58]. La representación corresponde como en la Figura 4-8, a una ponderación con el máximo alcanzado por cada armónico en todo el periodo. En este caso se ha considerado directamente la representación desde el minuto 10 al 30, es decir, sólo con la lámpara estabilizada; en lugar de hacer ambas representaciones como en el caso del apartado anterior.

Del examen de la Figura 4-14 se aprecian dos franjas de elevado contenido interarmónico en las tres lámparas estudiadas. Parece no corresponder con el funcionamiento de las lámparas porque aparece tras distintos instantes de tiempo. No hay que olvidar que las lámparas han estado funcionando durante 45 min, por lo que se encuentran totalmente estabilizadas; es más, en la primera y tercera lámparas, esta ráfaga de interarmónicos aparece en torno a los 20 min de funcionamiento; mientras que en el caso de la segunda lámpara, aparece a los 5 min. Se requiere un análisis más exhaustivo para conocer la causa de esto.

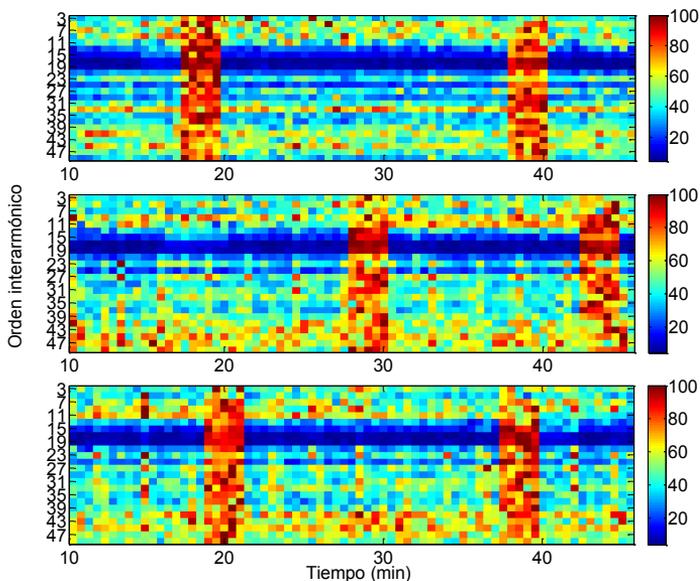


Figura 4-14. Valores de interarmónicos (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas.

A continuación, para ver la magnitud de esas ráfagas de interarmónicos, representamos en un diagrama de barras los interarmónicos para todos los órdenes impares hasta el orden 50. Cada uno de los colores corresponde a cada una de las muestras tomadas durante los 45 min (un color por cada 30 s), representándose desde el minuto 10 al 45 (de nuevo, sólo lámparas estabilizadas). Se aprecia el elevado valor que adquieren los interarmónicos en los instantes que habíamos señalado anteriormente, en concreto, superior a un 90%.

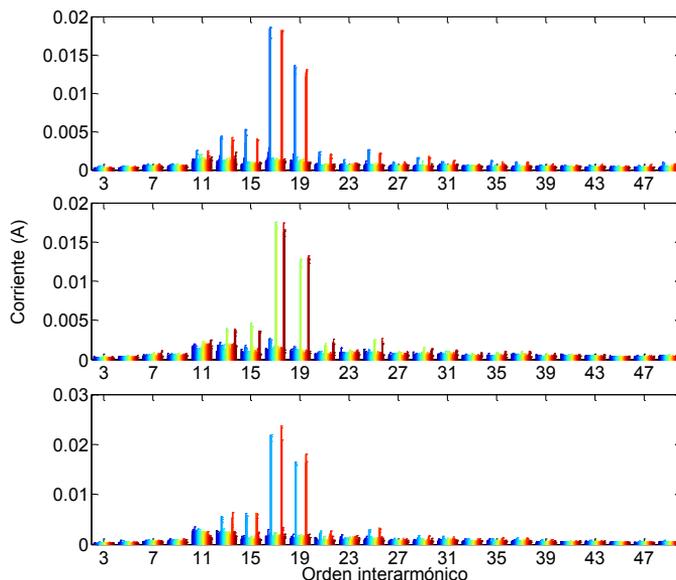


Figura 4-15. Evolución de los interarmónicos de corriente (A) para cada una de las lámparas estudiadas.

Es necesario conocer si la distorsión de la tensión provoca la distorsión de la corriente, o lo contrario, que la de la corriente provoca la de la tensión. De esa manera podremos conocer si se debe a la lámpara o a otra carga externa. Para esto se ha estudiado la impedancia, y seleccionado una de las frecuencias que aparecen elevadas, por ejemplo, el orden interarmónico 17 (850-900 Hz). A 900 Hz, la impedancia de la lámpara (debida principalmente al condensador de $10\ \mu\text{F}$) es $17,7\ \Omega$. A esa frecuencia, se ha medido una corriente de $13,3\ \text{mA}$ y una tensión de $250\ \text{mV}$, por lo que resulta en una impedancia de $18,8\ \Omega$. Por tanto, la fuente interarmónica está en la red, y no es la lámpara. Esto provoca la tensión interarmónica, lo que provoca una corriente que fluye a través del condensador.

Así que finalmente se ha podido extraer un patrón característico de los interarmónicos para este tipo de lámparas con balastos electromagnéticos, eliminando dichas ráfagas.

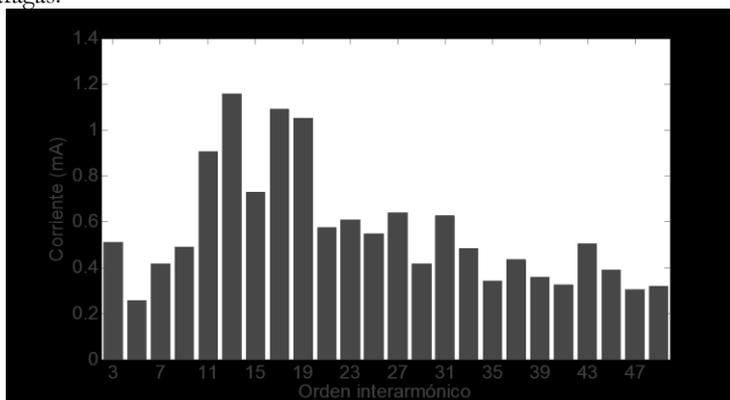


Figura 4-16. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para una lámpara con balasto electromagnético.

El grupo de interarmónicos desde el orden 11 (550-600 Hz) al 19 (950-1000 Hz) permanecen relativamente altos, alcanzando valores próximos a 1,5 mA y en algunos momentos 2 mA. Los órdenes más bajos como del 3 (150-200 Hz)-9 (450-500 Hz) poseen valores en torno a 0,5 mA, prácticamente igual que desde el orden 21 (1050-1100 Hz) hasta el 49 (2450-2500 Hz).

4.3.4. Cambios en el espectro armónico no característico

Si existe algún grado de asimetría entre el sistema de suministro y el equipo conectado se generarán armónicos no característicos (estos se definen en el apartado 2.3 sobre distorsión armónica, definiciones, interarmónicos y subarmónicos). Los niveles de estos armónicos pueden ser pequeños comparados con los característicos, pero para cierto tipo de instalaciones, pueden dominar y ser amplificadas debido a la resonancia con los filtros.

En nuestro caso, la Figura 4-17 muestra la evolución de estos armónicos no característicos. Los intervalos de elevado valor de estos armónicos no corresponden al comportamiento de las lámparas, como se vio en el análisis de los interarmónicos, sino a una carga externa conectada en ese mismo instante. Además, los pares siguen el mismo patrón que los interarmónicos.

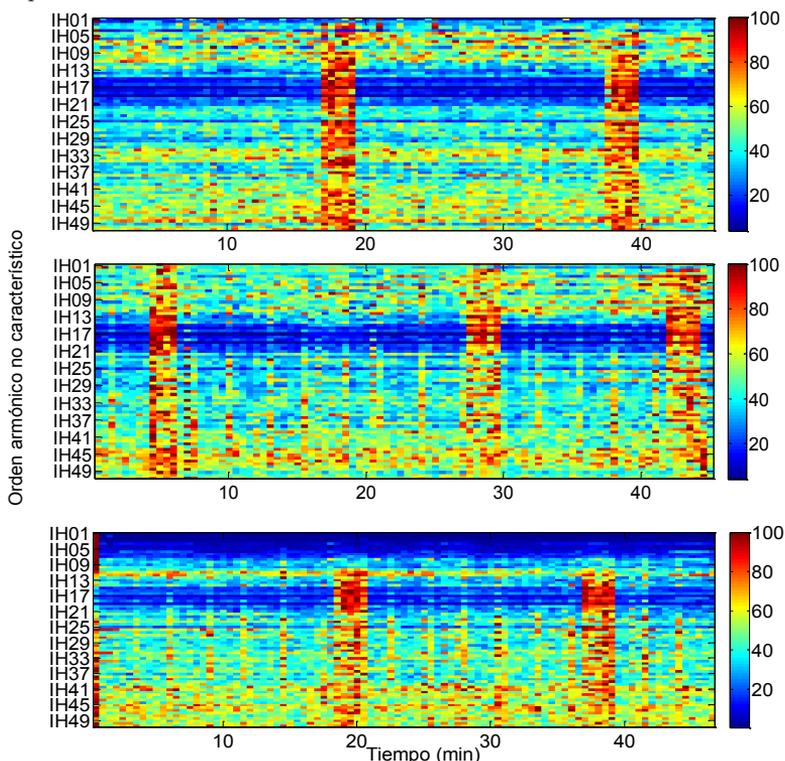


Figura 4-17. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo) para cada una de las lámparas estudiadas.

Cuanto mayor es el orden par e interarmónico, mayor es la aleatoriedad que presentan los mismos. Sin embargo, los órdenes bajos son más estables.

4.3.5. Agregación de lámparas

Como se vio en el capítulo 2 de materiales y métodos, la agregación de cargas representa un papel importante en cuanto a la estimación del contenido armónico resultante. Al igual que se ha hecho con el alumbrado de interior en combinación con otras cargas conectadas al mismo tiempo, la agregación en el alumbrado público se ha estudiado con lámparas de la misma tecnología. Suponemos que el alumbrado público posee una línea de alimentación propia; por lo que estaríamos simulando el comportamiento de una red con estas características.

Varios son los estudios que indican que la agregación de cargas es ligeramente inferior a la suma de las corrientes de cada una de las cargas por separado, debido, entre otros, a la diversidad de fase [71], [72]. En este apartado se tratará este tema con balastos electromagnéticos conectados a lámparas de sodio de alta presión, igual que en el caso anterior.

Pero antes de estudiar el efecto de agregación de lámparas de esta tecnología con un experimento real, se ha examinado este mismo comportamiento en el laboratorio. A tal efecto se han conectado las lámparas estudiadas con anterioridad al mismo punto eléctrico, y se ha medido usando el mismo equipo que se usó para la medida del espectro en frecuencia de la empresa Yokogawa. Posteriormente, estos resultados se compararán con un experimento realizado en un Campus Universitario y que se incluye en el siguiente apartado.

4.3.5.1. Espectro armónico

Si a una de las lámparas estudiadas en el apartado anterior le añadimos una segunda, y medimos en el punto de conexión de ambas, obtenemos el espectro mostrado en la Figura 4-18 y marcado con la leyenda 2 lámparas. Prácticamente se dobla el contenido armónico, teniendo igualmente valores elevados en los armónicos 19, 23 y 29 (aunque cuando hablamos de valores altos nos estamos refiriendo a 0,05 A). Es necesario aquí recordar que en el apartado 2.6 sobre caracterización de la emisión armónica e interarmónica, se indicó que el valor del 3º armónico típico en una vivienda es de 250-470 mA, y en el caso de 3 balastos electromagnéticos obtenemos 140 mA. Los órdenes a partir del 25 presentaban en la vivienda un valor de 20 mA, y en este caso la misma magnitud.

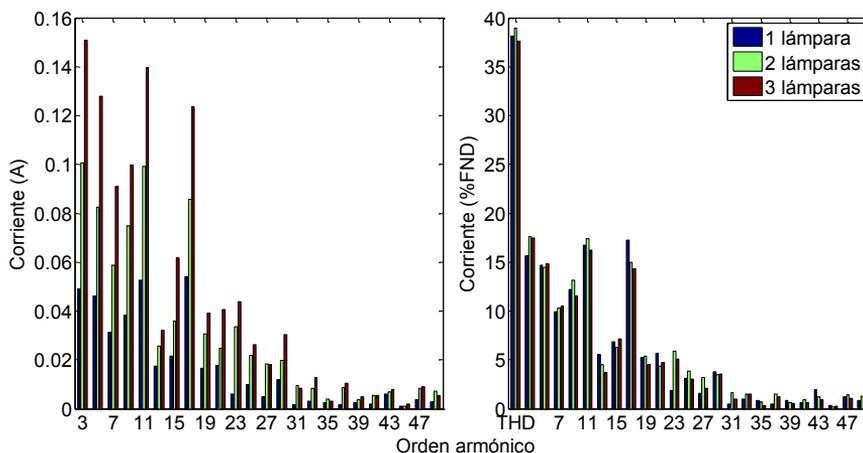


Figura 4-18. Evolución de los armónicos de corriente (A y %FND) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.

Si seguimos evaluando el efecto de la conexión sucesiva de lámparas, al conectar tres (leyenda 3 lámparas), ciertos órdenes como 3, 5, 7, 11, 15, 29, 31, 33 corresponden prácticamente a la suma aritmética (en Amperios, el triple del contenido de una sola), por lo que se podría estimar el contenido armónico de dos y tres lámparas sumando dos y tres veces respectivamente el contenido existente en Amperios de cuando hay una sola conectada. Esto ocurre principalmente por debajo de 750 Hz y por encima de 1650 Hz.

Sin embargo, otros órdenes como 9, 13, 17, 19, 21, 25, 35 (rangos intermedios de frecuencia) presentan unas magnitudes (A) menores que la suma aritmética a partir del contenido de una lámpara. El orden armónico 23 es la excepción dentro de este rango de frecuencias, ya que es mayor (A) que la suma aritmética.

Por el contrario, en cuanto al THDI, vemos que apenas existe variación en la distorsión total cuando añadimos una segunda e incluso una tercera lámpara; se mantiene siempre en torno al 38%, independientemente del número de lámparas conectadas. Esto se debe a que todos los armónicos (A) aumentan en la misma proporción, por lo que al aumentar el armónico fundamental, el THDI apenas sufre variación.

En el caso de la tensión, algunos órdenes presentan un aumento en la magnitud del armónico como es el caso del 3, 7, 25, 27, y del orden 31 en adelante. Los otros órdenes varían de distinta manera, aunque los errores en ambos casos podrían justificar las variaciones. La distorsión de la tensión aumenta al aumentar el número de lámparas conectadas, variando en torno a 1,8%. Como se aprecia, en definitiva, poca distorsión.

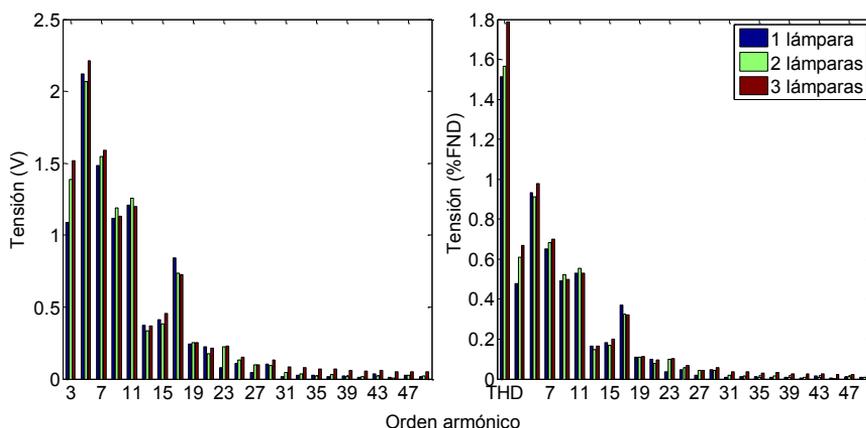


Figura 4-19. Evolución de los armónicos de tensión (V y %FND) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.

4.3.5.2. Espectro interarmónico

Y ahora con los interarmónicos sí se aprecia un aumento muy significativo con la adición de la última lámpara. El elevado valor en los interarmónicos 11 (550-600 Hz) y 17 (850 y 900 Hz) parece coincidir con el elevado valor encontrado en cada una de las lámparas por separado y recogido en la Figura 4-15; aunque en dicho caso eran el 17 (850 y 900 Hz) y 19 (950 y 1000 Hz). Sin embargo, con la adición de la segunda, estos incrementos no se magnifican tanto como al agregar la tercera de las lámparas.

La máxima magnitud interarmónica corresponde con 30 mA para los interarmónicos 11 (550-600 Hz) y 17 (850 y 900 Hz) en caso de haber 3 lámparas conectadas. Los interarmónicos 13 (650 y 700 Hz) y 17 (850 y 900 Hz) son los más elevados para dos lámparas conectadas, y 11 y 17 de nuevo los más elevados, cuando sólo hay una conectada.

En los tres casos parece existir una tendencia de crecimiento hasta los 700 Hz, para después decrecer exponencialmente. Siguen la misma tendencia independientemente del número de lámparas conectadas.

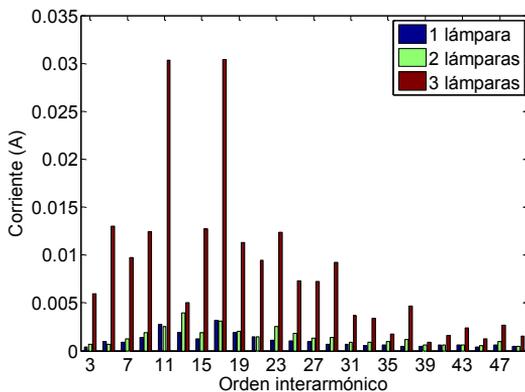


Figura 4-20. Evolución de los interarmónicos de corriente (A) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.

4.3.5.3. Plano complejo

La presentación en el plano complejo proporciona una forma adecuada de análisis del efecto suma o cancelación para armónicos individuales. En el eje horizontal hemos representado la corriente real, y en el vertical el valor imaginario, ambas magnitudes en mA. Se han representado los armónicos 3, 5, 7 y 9 en el plano complejo.

Como vemos, la adición de nuevas lámparas no produce un cambio en el plano complejo, por el contrario, siguen siempre el mismo aumento, con igual ángulo y magnitud (A). Esto coincide con lo mostrado en la Figura 4-18, donde estos armónicos (en Amperios) se sumaban aritméticamente para dar lugar al contenido tras añadir una segunda y una tercera lámpara. Por lo tanto, vemos que el plano complejo es otra herramienta útil para conocer, de forma general, cuál será el contenido armónico resultado de la agregación del mismo tipo de lámparas.

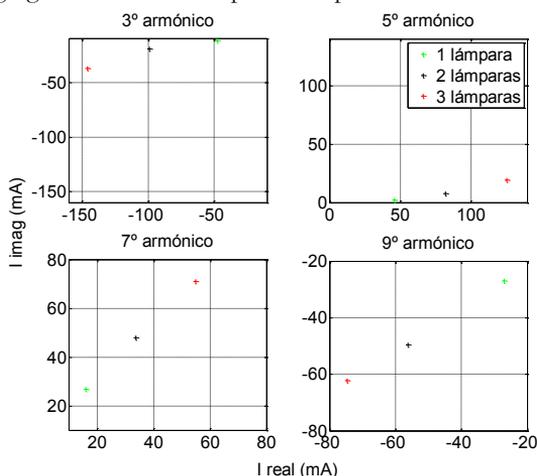


Figura 4-21. Evolución en el plano complejo los armónicos de corriente (mA) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.

4.4. Experimento en Campus Universitario

Todo lo anterior pertenece a un estudio realizado en laboratorio, por lo que para corroborar dichos datos, se ha realizado otro experimento también con lámparas de sodio (esta vez de 250 W ya que son las más usadas en alumbrado público) con balastos electromagnéticos. Dichos resultados se encuentran en [73]. Se conectaron hasta 3 lámparas, de una en una, conectadas a un sistema trifásico, de forma que en una de las fases tenemos 1 lámpara, en la otra 2 y en la tercera tres. Las medidas se tomaron con el equipo PowerGuide 4400 de Dranetz, midiendo en cada una de las fases con un intervalo de muestreo de 10 min para tensiones, corrientes, potencias y armónicos.

El experimento se realizó en el Campus Universitario de Rabanales, Córdoba, en Noviembre del 2010. Duró 3 días completos, encendiéndose las lámparas a las 18:20 y apagándose a las 7:20 de la mañana. Debido a la gran cantidad de datos, los armónicos que se visualizarán a continuación proceden directamente del cálculo que realiza el equipo, habiéndose extraído los mismos con el software Dran View; en lugar de ser calculados a partir de la forma de onda original con la agrupación indicada en UNE-EN

61000-4-7 [58]. No se ha podido realizar el cálculo de ángulos de fase ni cambios en el plano complejo debido a las restricciones del equipo (no se registraron formas de onda para su posterior tratamiento).

Lo primero en examinar será el valor eficaz de la corriente y tensión en el intervalo analizado. Se han promediado los tres días que estuvieron conectadas, y sólo se muestra la media de dichos datos, y solo cuando las lámparas estuvieron conectadas (durante el día, cuando las lámparas estaban desconectadas, no se ha analizado).

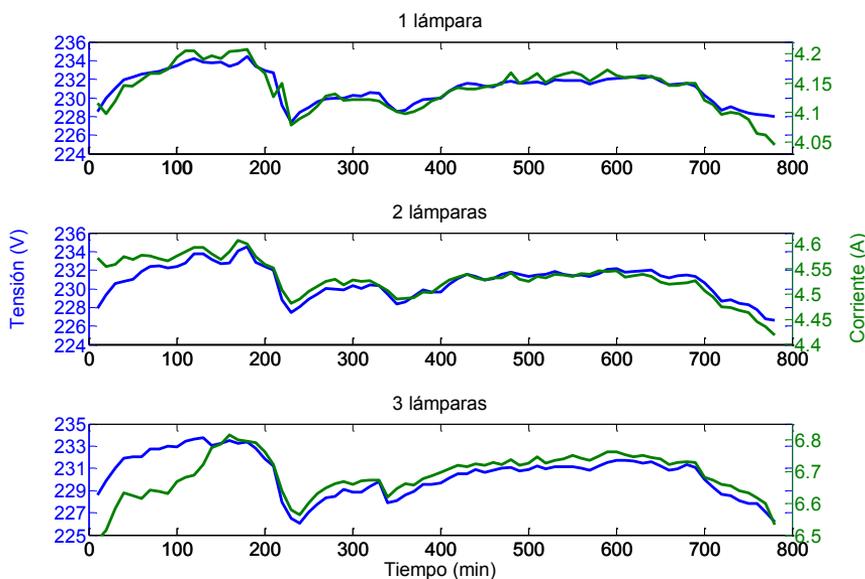


Figura 4-22. Evolución del valor eficaz de la tensión y corriente frente al tiempo con una, dos, y tres lámparas conectadas.

Cuando hay una sola lámpara conectada, la corriente varía entre 4,05 y 4,25 A; con dos lámparas entre 4,45 y 4,65 A; y tres lámparas entre 6,5 y 6,8 A. La tensión siempre oscila en torno a 230 V. Por tanto, las corrientes siguen la variación de la tensión, con más o menos igual porcentaje.

En la tendencia se observa que, al estar conectadas cerca de una residencia universitaria, hacia las 22.00 horas (minuto 250) empieza un incremento en la corriente, y hacia las 00.00 horas (minuto 350) disminuye. Posteriormente la corriente se mantiene constante durante la madrugada, y finalmente, conforme se acercan las primeras horas de la mañana va decreciendo la corriente.

4.4.1. Cambios en el espectro armónico

Una vez examinadas tanto la tensión como la corriente, en la Figura 4-23 se muestra la evolución de los órdenes armónicos impares hasta el 50 de cada una de las fases también como promedio de los tres días analizados. La forma de visualización, como en las anteriores ocasiones, es como porcentaje del máximo alcanzado durante el periodo para cada uno de los armónicos. El hecho de que aparezcan de color rojo las altas frecuencias no simboliza un alto contenido, sino que no hay grandes variaciones en los niveles con

respecto al máximo alcanzado, siempre se encuentra en torno al mismo nivel. Este hecho no ocurre, sin embargo, entre los órdenes 5 y 31, en los que puede verse que a veces las tonalidades son más azules (muy por debajo del máximo alcanzado) y otras más rojas (por encima del máximo).

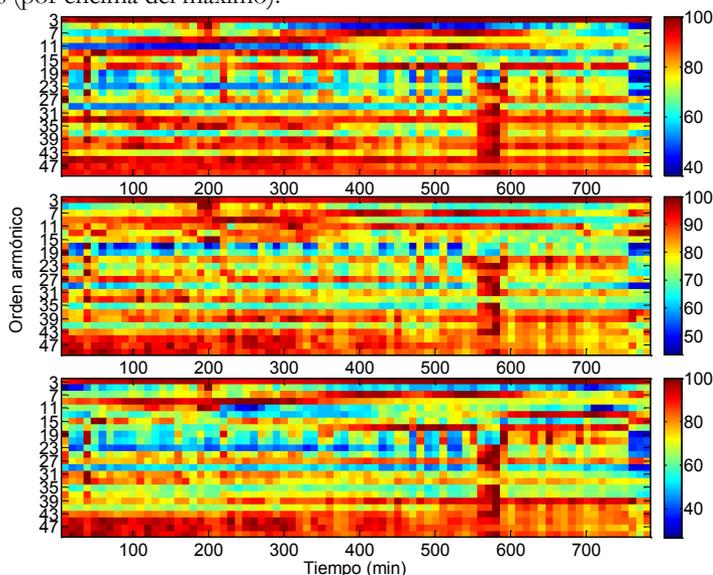


Figura 4-23. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para una, dos y tres lámparas conectadas a balastos electromagnéticos.

Podemos extraer una gráfica que represente la evolución de dichos armónicos de manera representativa del periodo. Como se puede apreciar de la Figura 4-24, no hay una clara tendencia de decrecimiento cuanto mayor es el orden armónico. La tendencia parece ocurrir desde el 7º armónico hasta el 15. Posteriormente, en el orden 17 aumenta, y continúa decreciendo posteriormente. El THDI para una y dos lámparas conectadas está en torno al 28%, mientras que en el laboratorio obtuvimos un 38% independientemente de que haya una, dos o tres conectadas. El THDI de tres lámparas en este experimento es ligeramente inferior, un 25%.

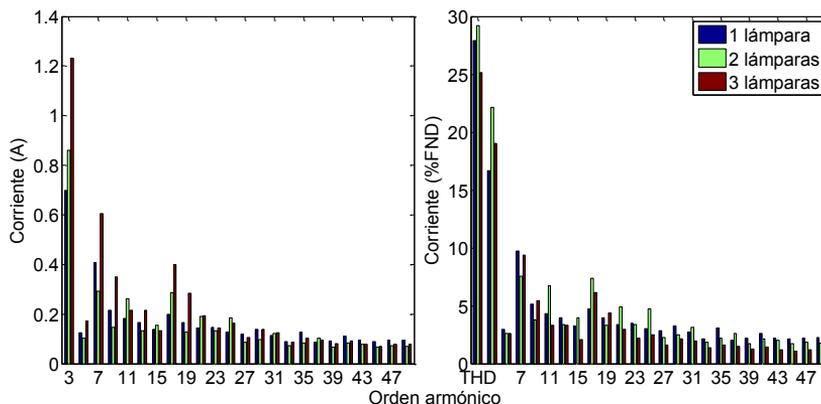


Figura 4-24. Evolución de los armónicos de corriente (A y %FND) para una, dos y tres lámparas conectadas con balastos electromagnéticos.

No existe un patrón que resulte de la conexión progresiva de lámparas, depende del orden armónico. Los órdenes 3, 17, 21 y 31 sí aumentan cuanto mayor es el número de lámparas conectadas. Sin embargo, los órdenes 5, 7, 9, 13, 19 disminuyen de valor al añadir una segunda lámpara; pero aumenta al conectar la tercera.

Algunos de estos valores coinciden con el resultado de la Figura 4-18, tal es el caso del aumento del 3, 17 y 21; sin embargo, los que en el experimento del Campus disminuyen, en el laboratorio aumentaban. Por tanto, podemos decir que cuando hay más cargas conectas, por la diversidad de fase, la adición de nuevas cargas no se traduce en suma algebraica de los armónicos de corriente.

4.4.2. Cambios en el espectro interarmónico

El análisis interarmónico ha sido realizado directamente de los datos almacenados en el equipo de medida; por lo que estos interarmónicos no siguen el mismo método de agregación que en el caso de las lámparas del laboratorio recogidos en el apartado anterior, por lo que no se pueden comparar.

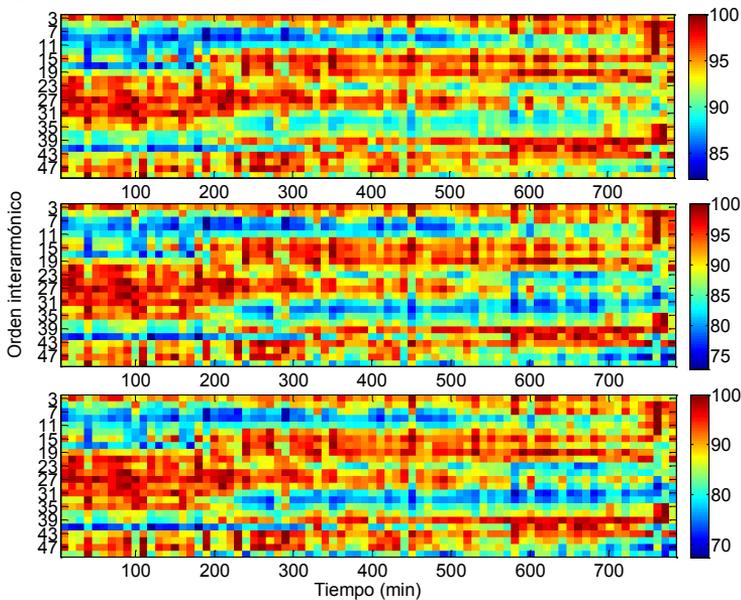


Figura 4-25. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para una, dos y tres lámparas conectadas a balastos electromagnéticos.

Lo primero que es necesario destacar es que el contenido interarmónico no depende del número de lámparas conectadas, ya que una, dos y hasta tres lámparas siguen el mismo patrón interarmónico. Lo que cambiará, y a continuación se estudiará, será el valor de las magnitudes; pero las diferencias entre el máximo y el resto de los instantes no varían, que es lo que se representa con los colores del gráfico.

Si analizamos cada interarmónico, el de orden 3 (150-200 Hz) es elevado independientemente del número de lámparas conectadas. Hasta el orden 13 (650-700 Hz), todos los casos presentan un bajo valor, y luego ascienden por la mañana (al final del muestreo). A continuación, desde el 15 (750-800 Hz) hasta el 31 (1550-1600 Hz) presentan un elevado valor durante todo el periodo; pero poseen un valor especialmente

alto hasta casi el minuto 250 (22.00 horas), unas 4 horas después del encendido parece que hay un elevado contenido interarmónico, coincidiendo con horas en las que habrá cargas conectadas que poseen interarmónicos (TV, PC,...). Continuando con el análisis de los interarmónicos, desde el orden 37 (1850-1900 Hz) al 41 (2050-2100 Hz), de nuevo no poseen un demasiado elevado valor; pero desde el 43 (2150-2200 Hz) en adelante, hasta la media noche, poseen un elevado valor, y luego decrecen. Esto puede deberse al flujo interarmónico de la alimentación hacia las lámparas.

Si se deseara extraer un espectro interarmónico representativo, lo idóneo sería extraer lo que ocurre hacia la mitad de la noche, cuando no estén demasiadas cargas conectadas. En la Figura 4-26 se ha representado la evolución de los interarmónicos escogiendo el minuto 500. En la siguiente figura se aprecia, como se indicó arriba, que los incrementos debidos al diferente número de lámparas eran los mismos. También que la progresiva conexión de lámparas no genera un patrón que lo caracterice. Sin embargo, es apreciable la atenuación de los interarmónicos cuantas más lámparas hay conectadas; ya que 3 lámparas poseen menor valor que una sola.

No se puede extraer un patrón cuanto mayor es el orden interarmónico, ya que crecen y decrecen continuamente. Las magnitudes oscilan entre 0,18 A y 0,14 A cuando hay una lámpara (apenas hay variación); y entre 0,15 A y 0,105 A cuando hay tres al mismo tiempo.

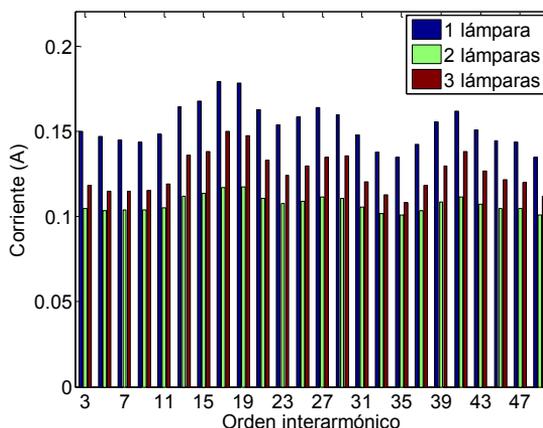


Figura 4-26. Evolución los interarmónicos de corriente (A) para una, dos y tres lámparas conectadas a balastos electromagnéticos.

4.4.3. Cambios en el espectro armónico no característico

Al igual que en apartados anteriores, se pretende evaluar en contenido armónico no característico (armónicos pares e interarmónicos) durante todo el periodo. De nuevo los valores se han representado tal y como los calcula el equipo de medida, y el método de visualización seguido es con ponderación sobre el máximo valor alcanzado en el periodo.

A grosso modo, y al igual que analizamos en la Figura 4-25, hasta la media noche existe un elevado contenido de armónicos no característicos, independiente del número de lámparas conectadas. Posteriormente, las magnitudes disminuyen y vuelven a aumentar a primeras horas de la mañana. Esto se deduce de examinar que el rojo (100%)

corresponde a primeras y últimas horas. Los armónicos pares siguen prácticamente el mismo comportamiento que los interarmónicos.

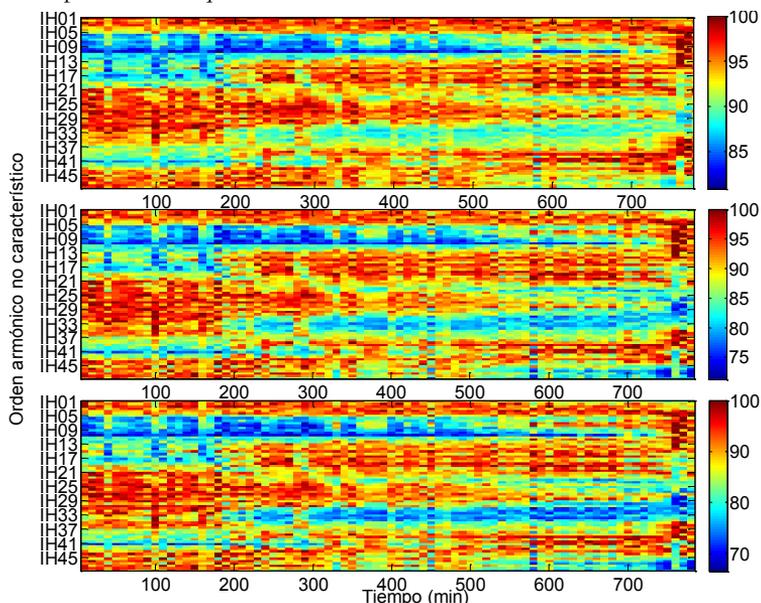


Figura 4-27. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo).

Como resumen del capítulo, primeramente se ha hecho un estudio teórico en el que se resumen las principales ventajas y desventajas de esta tecnología. Se ha medido la corriente en cada uno de los componentes que forman el balasto. Además, se han estudiado diversos parámetros de calidad de suministro como la potencia activa, DPF, THDI, armónicos (en baja y alta frecuencia) e interarmónicos. Uno de los estudios se ha realizado en laboratorio y el otro en un Campus universitario. En este tipo de tecnología son necesarios al menos 10 minutos para la estabilización de la lámpara.

Del estudio temporal de dichas magnitudes se ha extraído un patrón de las magnitudes anteriormente mencionadas. Además se ha estudiado el fenómeno de la agregación de cargas, para lo que se han conectado hasta tres lámparas al mismo punto eléctrico, obteniendo un contenido armónico (en Amperios) que muestra que ciertos órdenes corresponden en n lámparas a n veces el contenido de una de las lámparas para prácticamente todos los órdenes armónicos. También ocurre lo mismo en el experimento del Campus con las lámparas conectadas a cada una de las fases de un sistema trifásico. Este mismo patrón no se aprecia en los interarmónicos en ninguno de los dos experimentos realizados.

Del estudio en alta frecuencia (hasta 150 kHz), se observa que la corriente disminuye al aumentar la frecuencia, y no existe ningún pico en todo el intervalo derivado de la ausencia en el circuito de algún componente que posea conmutación.

5 Estudio en alumbrado público con balastos electrónicos

En este apartado se incluye tanto una revisión histórica de los balastos electrónicos, como los resultados del análisis de una lámpara con balasto electrónico regulada a diferentes niveles de potencia de arco.

Además, para estudiar el efecto de agregación de lámparas, se han conectado hasta cinco, de una en una, al mismo PCC, midiéndose en dicho punto diferentes parámetros eléctricos como tensión y corriente entre otros. Este estudio se ha realizado en el laboratorio de Electrónica, sito en el Campus Universitario de Rabanales (Córdoba, España).

Finalmente, se ha incluido un resumen de los resultados obtenidos en un primer experimento que se realizó con este tipo de tecnología.

5.1. Revisión histórica

En el capítulo anterior se analizó el comportamiento armónico del balasto electromagnético, pero también existe otro tipo de tecnología de balasto, el balasto electrónico. Se emplea para alimentar lámparas de descarga a frecuencia mayor que la de red, siendo muy utilizado en lámparas fluorescentes. Entre otras, las ventajas de los balastos electrónicos en general, independiente del tipo de lámpara a la que se conecte son:

- Menos peso que los balastos electromagnéticos, principalmente debido a que requieren menos cableado y componentes en el circuito (no hay arrancador ni condensador).
- Mejoran la eficiencia de la lámpara (mayor vida útil – de 40000 a 60000 horas) y del sistema (eficiencia aproximada del 75%, lo que se traduce en ahorros del 15%).
- No producen *flicker*.
- Rápido encendido de la lámpara, evitándose así el efecto estroboscópico, lo que reduce la fatiga visual.
- Ahorro de energía ya que las pérdidas de potencia en los balastos electrónicos son muy bajas, lo que puede traducirse en una reducción del consumo de

energía en aproximadamente un 25%, y por consiguiente en ahorro económico.

- F.d.p. próximo a la unidad, aunque se debe supervisar que los armónicos presentes en la red no excedan los valores máximos admitidos.
- Arranque instantáneo sin necesidad de un arrancador independiente.
- Buena regulación del flujo luminoso de la lámpara (atenuación).
- Trabajan en una frecuencia no audible por el oído humano (en el caso de balastos para lámparas de sodio en el rango 70-400 Hz o por encima de 100 kHz), por lo que no producen zumbido ni otros ruidos.

Sin embargo, presentan algunos inconvenientes:

- Relativamente caro (costes derivados del mantenimiento y reparación).
- Relativamente baja inmunidad frente a condiciones ambientales extremas tales como elevada humedad y amplia variación de temperatura.
- Es poco respetuoso con el medio ambiente (posee residuos electrónicos tóxicos y no biodegradables que no son reciclables).
- No autorrecuperable (por ejemplo, si se queman los fusibles, la lámpara no se encenderá automáticamente tras el restablecimiento de la tensión de red).

5.2. Principio de funcionamiento

Básicamente un balasto electrónico convierte la frecuencia fundamental de la tensión a la entrada en una tensión con mayor frecuencia (70-400 Hz para el caso de balastos con onda cuadrada de baja frecuencia; 10-500 kHz para el caso de balastos completamente electrónicos) con lo que se evitan frecuencias audibles y ruidos molestos. Además, al ser elevada la frecuencia de funcionamiento, se consiguen varias de las ventajas anteriormente mencionadas, como el aprovechamiento del menor tamaño y peso de los elementos usados para estabilizar la descarga, ya que con una pequeña bobina es suficiente para limitar la corriente de arco y además se elimina el *flicker* asociado a los balastos electromagnéticos. También es importante evitar frecuencias en el rango 30-40 kHz, ya que normalmente estas frecuencias se usan en control remoto por IR. En el caso de los balastos utilizados en este experimento, la frecuencia de funcionamiento es 165 Hz.

El balasto electrónico típico se compone de los siguientes bloques funcionales:

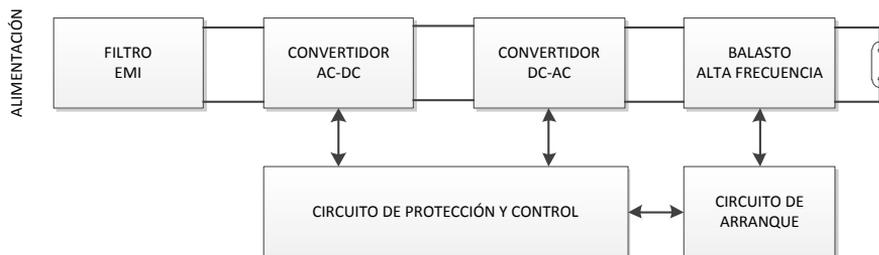


Figura 5-1. Bloques funcionales de un balasto electrónico. Fuente: [68].

La Figura 5-1 muestra los cinco principales bloques, que junto con el balasto en sí mismo conforman un típico balasto electrónico. Se puede decir que en lazo de potencia encontramos el filtro de interferencias electromagnéticas (EMI), el convertidor AC-DC y el DC-AC (inversor). Por otro lado, en el lazo de regulación se encuentran los circuitos de arranque, y de control y protección.

Si ahora estudiamos cada bloque de forma independiente, el primero, empezando por el lado de la alimentación, es el filtro EMI, que aunque no es obligatorio su uso en sí mismo, las restricciones en la máxima tensión a la entrada indicadas en [74] empujan al uso de los mismos. Su principal misión es la atenuación de dichas interferencias generadas por las etapas de alta frecuencia de los balastos; además protege al balasto frente a posibles perturbaciones transitorias en la alimentación.

El segundo bloque es el convertidor AC-DC, con el que se consigue generar una corriente continua a partir de la alterna que procede de la red. Lo común era usar un diodo rectificador en puente completo seguido de un condensador. Sin embargo, este rectificador proporciona un bajo f.d.p. y una pobre regulación de la tensión, no cumpliendo los límites establecidos por UNE-EN 61000-3-6 [59]. Además, con esta norma es necesario un f.d.p. mayor de 0,9 y una distorsión armónica por debajo del 30%, lo que se soluciona con el uso de convertidores activos del factor de potencia (APFC). En esta tesis no se detallarán los distintos tipos de convertidores, ya que varían dependiendo del fabricante y el contenido armónico varía dependiendo de la tecnología.

La tercera etapa es el inversor DC-AC y el balasto de alta frecuencia. Estas etapas se usan para alimentar la lámpara a alta frecuencia. En esta etapa, el inversor genera una forma de onda de alta frecuencia, y el balasto se emplea para limitar la corriente en el proceso de descarga. Al funcionar ambos dispositivos a alta frecuencia, estos balastos tienen menor tamaño y peso tal y como se comentó entre las ventajas de esta tecnología.

Y ahora, en el lazo de regulación, la cuarta etapa es el circuito de arranque, cuya funcionalidad depende del tipo de lámpara que se conecte, y es innecesario para las de baja presión pues el propio balasto de alta frecuencia produce la ignición de la lámpara y limita la corriente. Para las lámparas HID que precisan tensiones de arranque más elevadas, son necesarios circuitos de arranque independientes. Lejos de ser un inconveniente, este bloque permite el re-arranque en caliente de la lámpara.

Finalmente, el circuito de protección y control es la etapa que más varía entre un fabricante y otro, y su configuración dependerá de las características funcionales que se le quieran dar al conjunto. Éste puede incluir, entre otros, el oscilador principal, amplificadores del error para regular la corriente o potencia de la lámpara, protección contra sobretensiones a la salida, temporizadores para controlar los tiempos de arranque, protección contra sobrecorrientes y fallos de la lámpara.

5.3. Experimento en laboratorio

De entre los interfaces de control para el control de balastos recogidos en el Anexo E del UNE-EN 60929 [75] encontramos tres, el control por tensión continua, por modulación de anchura de impulso y mediante señales digitales (DALI). Ha sido necesario implementar un sistema de comunicación para enviar comandos a la lámpara, y de entre los tres anteriores se ha elegido DALI, el cual se detalla más específicamente en la norma UNE-EN 62386-101 [40].

En el experimento se han usado hasta 5 balastos electrónicos regulables OSRAM Powertronic® PTo DALI 70/220-240 3DIM [76], junto con sus respectivas 5 lámparas de sodio de alta presión Philips SON 70 W/220 I E27 1CT [77]. Estos balastos son atenuables en un rango continuo entre 60 y 100%, pero para caracterizar el contenido armónico se han escogido tres valores discretos del nivel de potencia de arco, 60, 76 y 100% de manera que estén igualmente espaciados en la curva logarítmica incluida en la anteriormente citada UNE-EN 62386-101 [40], que relaciona el nivel de la potencia de arco (%) con 8 bit del nivel de potencia de arco. En la publicación [41] se hace una descripción del sistema de gestión utilizado en este experimento.

El instrumento de medida ha sido, el analizador de calidad de onda PowerGuide 4400 de Dranetz. Los intervalos de muestreo varían según el experimento en concreto, pero lo que es común a todos es el registro de las formas de onda de la corriente y tensión, y el posterior procesado con Matlab para hacer la agregación, tal y como indica la UNE-EN 61000-4-7 [58] y obtener así el contenido armónico e interarmónico.

Primero se analizará lo que ocurre a la entrada y salida del balasto. Para ello se representan en la Figura 5-2a la tensión y corriente a la entrada del balasto y en la Figura 5-2b a la salida del mismo cuándo la lámpara se encuentra a un nivel de potencia de arco del 100%, y tras transcurrir el tiempo suficiente como para estar la lámpara totalmente estable. Este tiempo también se estudiará posteriormente en el apartado 5.3.1 sobre cambios en la potencia.

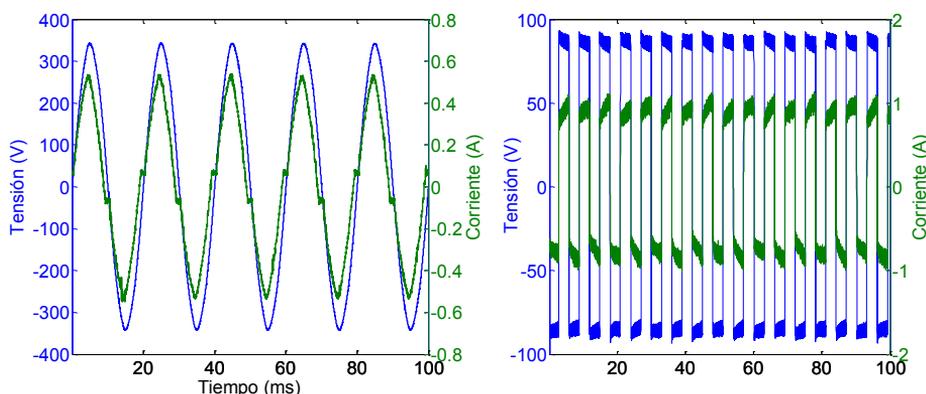


Figura 5-2. Tensión y corriente a la entrada y a la salida del balasto electrónico con la lámpara al 100%.

En la Figura 5-2a se puede ver el aplanamiento del paso por cero de la corriente a la entrada. Esto se debe a que no existe suficiente energía en el inversor, no funcionando por tanto en esos instantes. Además, se aprecia que el paso por cero está desfasado con respecto a la tensión debido al condensador del filtro EMI.

En el caso de la Figura 5-2b, se aprecia lo especificado por el fabricante sobre la frecuencia de funcionamiento (165 Hz) y la forma de onda cuadrada. Tal y como indican, para mantener la máxima vida de la lámpara, es importante alimentar la lámpara con corrientes simétricas alternativas, haciendo uso de ambos electrodos de la lámpara de forma alterna. Las características de la alimentación de la lámpara son una tensión de 80 V y una corriente de 1 A de pico.

Finalmente la posibilidad de atenuación es una característica importante que permite al balasto controlar el nivel de potencia de arco de la lámpara, y como consecuencia, la

salida de luz. Entre las distintas técnicas de atenuación utilizadas en los balastos se encuentra la variación de la tensión o de la frecuencia de funcionamiento del inversor, o bien la variación de la anchura de impulso de la señal de salida del inversor.

A continuación se visualizará la forma de onda de la corriente a la entrada del balasto para los distintos niveles de atenuación. Vemos la disminución de corriente a la entrada del balasto derivada de la atenuación al 60%. Posteriormente se realizará el cálculo armónico para ver su relación con la atenuación.

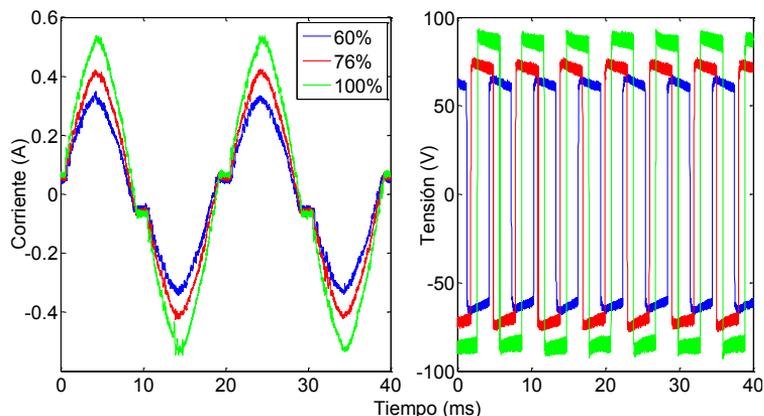


Figura 5-3. Forma de onda de la corriente a la entrada y tensión a la salida del balasto para diferentes niveles de atenuación.

Si analizamos la tensión a la salida del balasto, para los tres niveles de atenuación, apreciamos una disminución en la tensión al atenuar la lámpara, y debido a que la salida no está sincronizada en la medida, obtenemos unas tensiones desfasadas con respecto a otras, por lo que los tres niveles de potencia de arco tienen igual frecuencia. Por tanto, el método de atenuación en este balasto es por disminución en la amplitud.

La caracterización del contenido armónico se debe dividir en contenido debido a la carga, o debido a la fuente [78]. Para poder separar ambos contenidos, y caracterizar el debido a la lámpara, ésta se ha conectado a una fase de una carga trifásica puramente sinusoidal de la empresa *California Instrument*. Así obtenemos una tendencia decreciente hasta el armónico 19, y una posterior estabilización en torno a 0,85 A. El THDI de la lámpara es del 10,9%, siendo el armónico de orden 3 el que más porcentaje representa (9,26%). En ningún caso se sobrepasan los límites establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-6 [59] que hacen referencia a niveles en porcentaje de la fundamental.

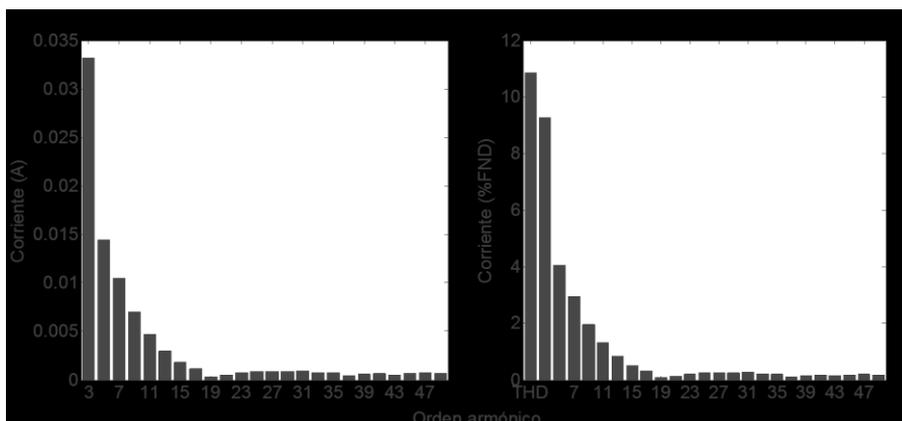


Figura 5-4. Espectro de los armónicos de corriente de una lámpara conectada a un balasto electrónico, alimentada con fuente puramente sinusoidal.

En cuanto a la tensión, y para poner de manifiesto la pureza de la sinusoide con la que se ha extraído el contenido armónico de la lámpara, se muestra el contenido armónico de la tensión con la lámpara conectada, la cual tiene un THDV del 0,19%, prácticamente no existe distorsión.

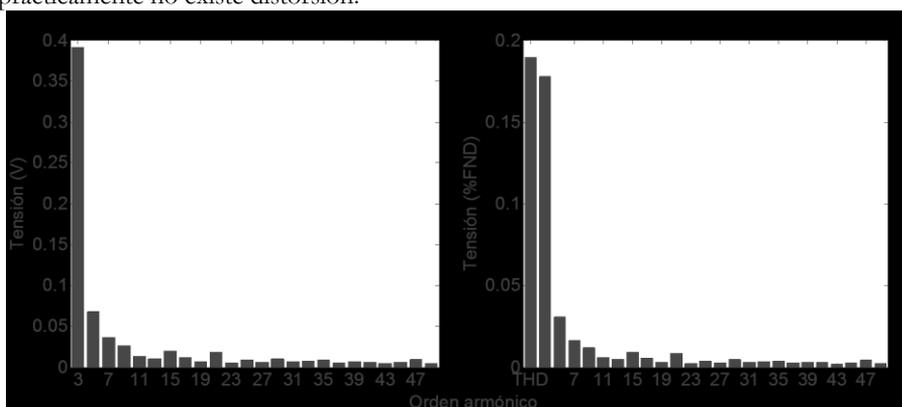


Figura 5-5. Espectro de los armónicos de tensión de una lámpara conectada a un balasto electrónico, alimentada con fuente puramente sinusoidal.

Pero debido a que esto no es lo que ocurre en la realidad, es necesario hacer medidas experimentales en las que la tensión de alimentación posea distorsión. Por este motivo los siguientes experimentos no se han realizado con la anterior fuente trifásica. Sin embargo, han sido realizados en horas nocturnas, para simular el contenido bajo condiciones reales.

5.3.1. Cambios en la potencia

Se ha modificado el nivel de potencia de arco de la lámpara al 60, 76 y 100%. Para estos niveles, del registro de tensión y corriente a la entrada del balasto se ha calculado la potencia de entrada total, siendo 79,5 W con la lámpara al 100%; 59,8 W con la lámpara al 76%; 46,6 W con la lámpara al 60%. Por otro lado, la potencia a la entrada de la lámpara es 71,45 W (prácticamente los 70 W que consume la lámpara) cuando la

lámpara está al 100%; 54,9 W con la lámpara al 76%; y 42,4 W con la lámpara al 60%. De ahí que las pérdidas debidas a este tipo de balastos sean de 10 W.

Para ver la estabilidad de la lámpara, se monitorizan la tensión y corriente de una lámpara durante 1.15 h al 100% (intervalo de muestreo de 30 s), y posteriormente se calcula la potencia activa.

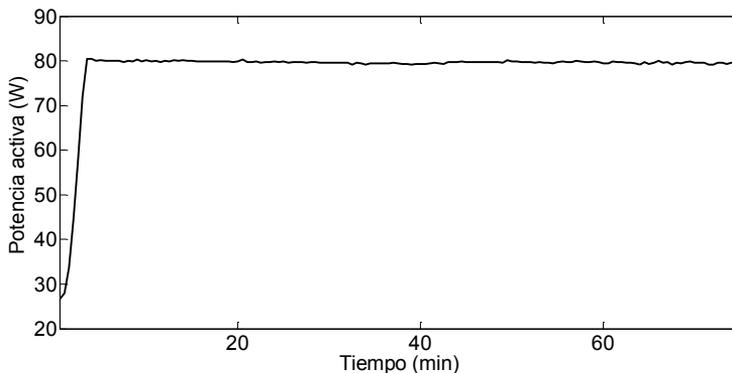


Figura 5-6. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco.

A los 4 min se alcanza la máxima potencia (80,5 W). Posteriormente, esta se mantiene estable en torno a 80 W. Esto mismo no se observará en las lámparas LED. Pero para estudiar más al detalle la evolución de la potencia, se visualiza la evolución de la misma a partir del minuto 4, que es cuando se estabiliza. Esto ocurriría también en los balastos electromagnéticos, pero en ese caso se necesitaban 10 minutos para su estabilización.

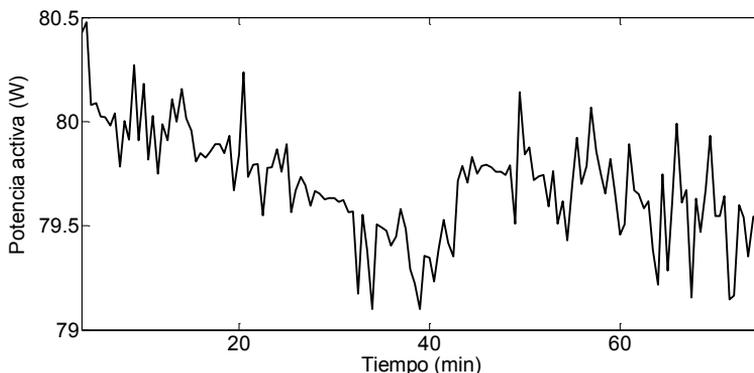


Figura 5-7. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco eliminando los 4 primeros minutos.

Vemos que la variación es del 1,18% con tendencia decreciente, pero prácticamente constante. Finalmente, es necesario destacar que esta desestabilización inicial en potencia no tiene ninguna repercusión en la calidad de suministro, ya que la diferencia es muy pequeña, sobre todo comparando 4 minutos con todas las horas que permanece conectado el equipo en su normal funcionamiento.

5.3.2. Cambios en el espectro armónico

5.3.2.1. Baja frecuencia

Es necesario mencionar en este punto que, tras realizar varios experimentos en diferentes instantes de tiempo, los resultados mostrados corresponden con experimentos realizados en días en los que existe poca emisión de fondo (fines de semana), simulando las horas nocturnas en las que existe muy baja distorsión armónica. El contenido armónico en las lámparas varía mucho dependiendo de dicha emisión de fondo. Es importante señalar esto, ya que dificulta la caracterización.

Una vez conocida la forma de onda de ambas magnitudes tensión y corriente, se ha registrado y visualizado durante 75 min (intervalo de muestreo de 30 s), las formas de onda de las mismas. De igual manera al procedimiento seguido en los capítulos anteriores, la representación temporal de los armónicos se hace como tanto por ciento del valor máximo de cada armónico para todos los instantes de tiempo. El método aparece descrito en el apartado 2.11 sobre representación de la evolución temporal

Tras la agrupación indicada en UNE-EN 61000-4-7 [58], se ha calculado el contenido armónico hasta el orden 50 de una de las lámparas usadas en el experimento. Como se observó en el anterior estudio de la potencia que el equipo necesita cuatro minutos para su estabilización, se representa directamente desde ese minuto en adelante. Como se aprecia en la Figura 5-8, los órdenes 17, 23 y 35 se encuentran bajos durante todo el intervalo. Desde el orden 37 en adelante, hasta el minuto 25 varía en magnitud; pero los órdenes menores permanecen elevados en todo el intervalo.

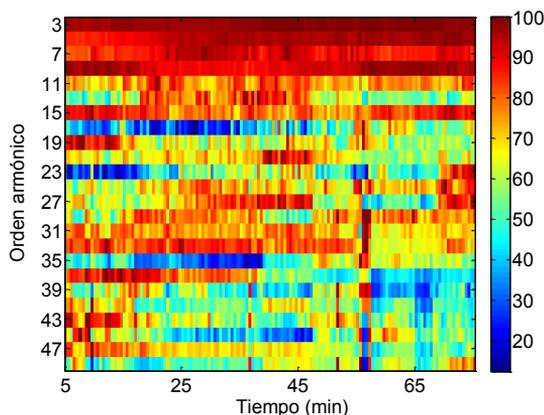


Figura 5-8. Valores de los armónicos de corriente para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco (porcentaje del máximo valor) eliminando los primeros 5 min.

A continuación estudiamos el espectro para diferentes niveles de atenuación. Para su caracterización se han realizado diferentes combinaciones en las que para distinto número de lámparas, de manera independiente y varias simultáneamente, se ha cambiado el nivel de atenuación. Se puede concluir que ocurre lo mismo en todos los casos, por lo que se detalla a continuación sólo uno de los experimentos. El experimento consiste en cambiar el nivel de potencia de arco de una lámpara para diferentes intervalos temporales, registrándose las formas de onda de la tensión y

corriente. Tras el posterior tratamiento y agrupación armónica e interarmónica con Matlab, se ha calculado el contenido armónico y la potencia activa. En la Figura 5-9 se representa tanto la potencia activa (W) como la evolución armónica para poder identificar aquellos instantes en los que la lámpara se encuentra a un nivel de potencia de arco u otro. Primero se encendió la lámpara al 60% (pero al establecer este nivel, la lámpara primero se sitúa en el 100% para posteriormente bajar al mínimo del 60%) y se mantuvo durante 1.25h; después se cambió al 76% durante 47 min; y finalmente al 100% durante 15 min.

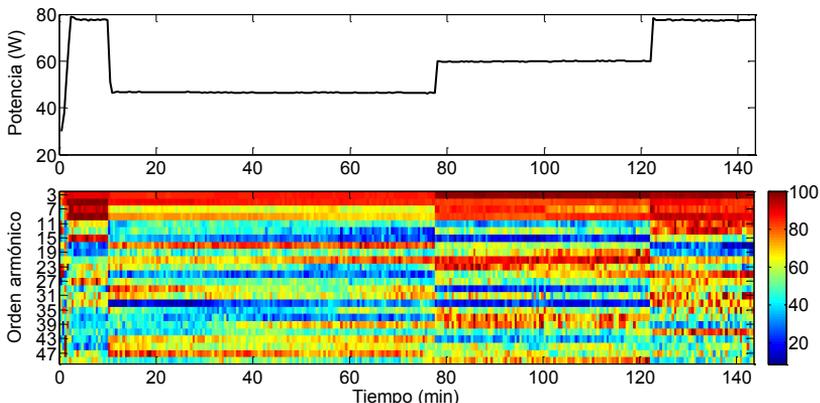


Figura 5-9. Valores de los armónicos de corriente frente a la variación del nivel de potencia de arco para una lámpara con balasto electrónico.

Se aprecia que cuanto mayor es el nivel de potencia de arco de la lámpara, mayor es el contenido armónico, por lo que además del ahorro por un menor consumo de potencia, se produce una menor distorsión a la red. También se observa que tras el cambio de nivel de potencia de arco de la lámpara, ésta adquiere un estable contenido armónico en un corto lapso de tiempo, no ocurriendo lo mismo con los balastos electromagnéticos. Si a continuación estudiamos qué niveles se encuentran más elevados durante el experimento, podemos apreciar que con el nivel al 60%, los armónicos 15, 25, 33, y 37 alcanzan el mínimo del intervalo; al 76%, se mantienen algunos de los bajos niveles anteriores como los armónicos 15 y 33, y otros alcanzan el mínimo como el 11 y 29. Sin embargo, durante el funcionamiento con el nivel al 100%, los armónicos 29 y 33 alcanzan el máximo.

En el lado opuesto se encuentran los órdenes armónicos que poseen un bajo valor cuando la lámpara se encuentra al 100%. Es el caso de los órdenes 17 y 19, que alcanzan el máximo con la lámpara al 60%, y el mínimo con ella al 100%.

Aun así, vemos poca variación; por lo que podemos representar el contenido armónico como una media de lo registrado en cada uno de esos periodos. A continuación, representaremos los armónicos de tensión y corriente derivados de la agrupación con una ventana de 200 ms tal y como indica la norma UNE-EN 61000-4-7 [58]. Estos valores corresponden al contenido armónico con la lámpara estabilizada.

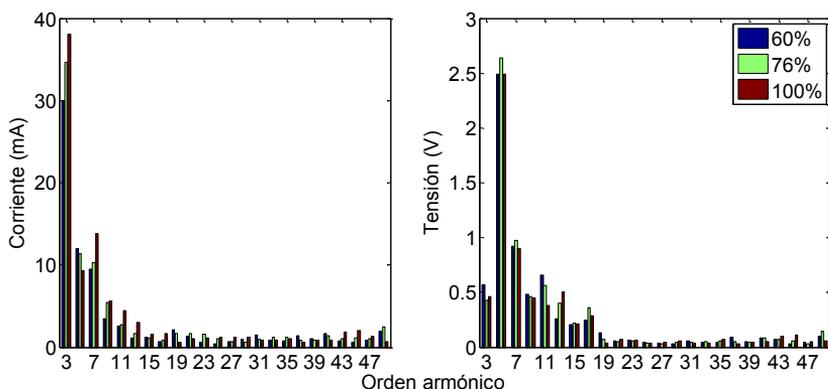


Figura 5-10. Espectro de los armónicos de corriente (mA) y tensión (V) para una lámpara con balasto electrónico con diferente nivel de potencia de arco.

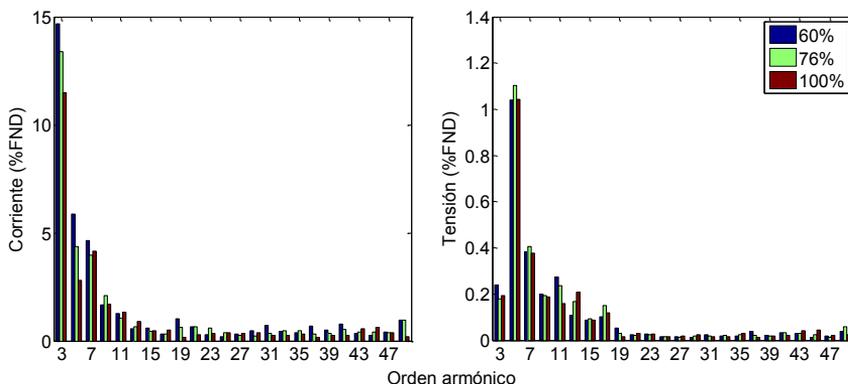


Figura 5-11. Espectro de los armónicos de corriente y tensión (%FND) para una lámpara con balasto electrónico con diferente nivel de potencia de arco.

Primero es necesario señalar que la fundamental de la corriente es de 0,33 A para un nivel del 100%, 0,26 A para el 76% y de 0,20 A para el 60%. Parece extraerse de dichas gráficas la evolución decreciente en magnitud de la corriente hasta prácticamente el armónico 15 cuando la lámpara se encuentra al 60 y 76% del nivel de potencia de arco, pero en el caso del 100%, el 7º armónico es mayor que los órdenes que le circundan (14 mA). La mayor magnitud es alcanzada por el armónico 3, variando entre 30 mA (15% FND) y 38 mA (11,5% FND) dependiendo del nivel de atenuación. Comparando estos valores con los balastos electromagnéticos, en aquellos el 3º armónico alcanzaba 50 mA, por lo que resalta la disminución en contenido armónico. Este orden armónico viene seguido de los armónicos 5 y 7, que ambos poseen similares magnitudes, cercanas a 11 mA (5% FND). Finalmente, los mayores órdenes armónicos oscilan en torno a 1,4 mA (0,5% FND).

Por tanto, cuanto mayor es el nivel de potencia de arco, mayor magnitud en Amperios poseen los armónicos. Sin embargo, expresados en porcentaje de la fundamental, ocurre lo contrario. Se debe principalmente a la gran disminución de la fundamental en relación a la disminución del armónico en sí mismo. Finalmente, en cuanto a la distorsión total, el THDI al 100% es de 12,83%, al 76% es de 14,94, y al 60% es de 16,78%, por lo que aumenta cuanto menor es la potencia de arco. Como esta

medida no es característica de lo que ocurre realmente, se calcula el THDI en Amperios, en lugar de en porcentaje de la fundamental. En ese caso, con el nivel al 100% el THDI es de 42,5 mA, al 76% es de 38,7 mA y al 60% es de 34,2 mA. Esto sí corrobora mayor distorsión cuanto mayor nivel de potencia.

5.3.2.2. Alta frecuencia

En las Figura 5-12, Figura 5-13 y Figura 5-14 se muestran las variaciones temporales de los espectros en frecuencia de la corriente a la entrada del balasto, para una lámpara con balasto electrónico en los diferentes niveles de potencia de arco, 60, 76 y 100%. Se han representado dos periodos de la corriente para mejorar la visualización.

En el caso de la Figura 5-12, las variaciones en amplitud de la corriente que aparecen en torno a los 100 kHz se corresponden con los 165 Hz que posee el balasto de frecuencia de funcionamiento. Esto se sabe ya que 165 Hz equivalen a 6 ms, y la forma de onda en diente de sierra que aparece en torno a 100 kHz tiene de periodo 6 ms (dos picos). Además, también se aprecia la frecuencia de conmutación en torno a los 150 kHz (coincide en los instantes de tiempo del paso por cero de la corriente).

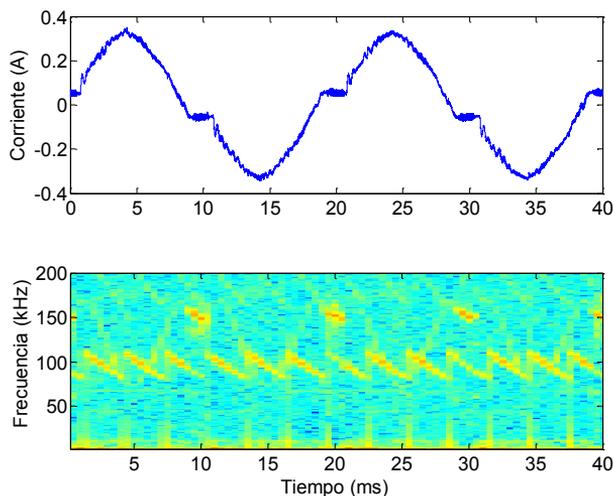


Figura 5-12. Espectro en frecuencia frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 60%.

Cuando aumentamos el nivel de potencia de arco de la lámpara al 76%, los 165 Hz de la onda de corriente cuadrada a la salida, se ven en la corriente de entrada a una frecuencia menor de 100 kHz (que es la frecuencia que poseía al 49%). Igualmente la frecuencia del paso por cero de la corriente ahora baja por debajo de 150 kHz.

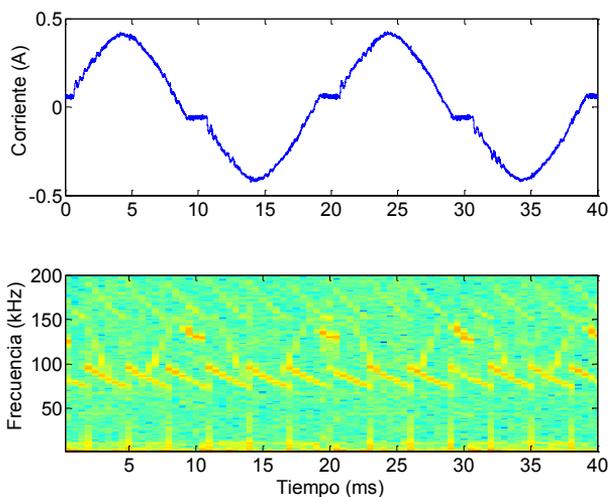


Figura 5-13. Espectro en frecuencia frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 76%.

Si finalmente la lámpara se sube al nivel 100%, los 165 Hz de la onda cuadrada a la salida del balasto, se aprecian en la corriente de entrada a una frecuencia por debajo aún más de los 100 kHz. Y el paso por cero de la corriente aparece a una frecuencia algo mayor de 100 kHz (cuando alcanzaba 150 kHz con la lámpara al 60%).

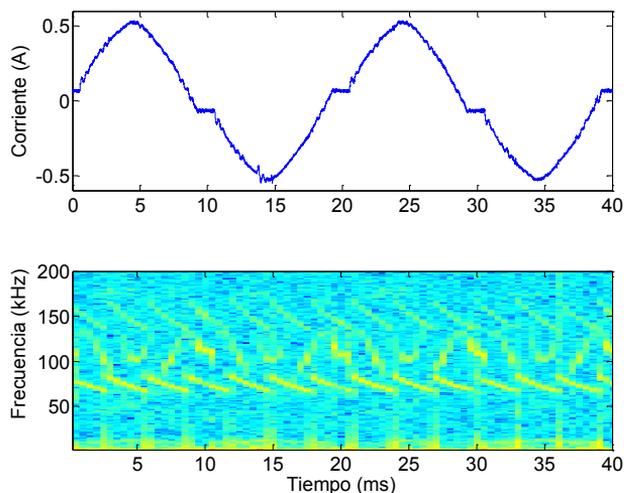


Figura 5-14. Espectro en frecuencia frente al tiempo para una lámpara con balasto electrónico al 100%.

A continuación, y una vez visto que la variación en frecuencia es constante en el tiempo, se caracteriza el espectro armónico en alta frecuencia (2-150 kHz) para un ciclo a los niveles de potencia 60, 76 y 100%. Para la realización de estos cálculos, la frecuencia de muestreo que se usó fue 5 MS/s, y una ventana de 200 ms. Una vez extraída la forma de onda de la corriente, y aplicada la FFT sobre la corriente, se ha

hecho la agregación indicada en el anexo B de la norma UNE-EN 61000-4-7 [58] y recogido en el apartado 2.7 sobre medida de armónicos e interarmónicos. Aunque dicho anexo se refiera al rango de frecuencias 2-9 kHz, el método se ha hecho extensivo hasta 150 kHz.

Analizando la Figura 5-15, es característico en los tres niveles de atenuación un espectro en banda ancha (*broadband*) seguido posteriormente de un pico a una frecuencia algo mayor. Esta banda ancha (que de hecho disminuye la frecuencia a la que se da cuanto mayor es el nivel de potencia de arco) tiene lugar ya que vimos en las Figura 5-12-Figura 5-14 una forma similar a un diente de sierra. Es justo esa forma de onda la que se ve en el espectro en frecuencia como banda ancha.

En la Figura 5-15a (con la lámpara al 60%) aparece el pico a 100 kHz (aunque como se ha mencionado anteriormente es banda ancha) que corresponde con los 165 Hz de la salida del balasto. El pico a 150 kHz es el paso por cero que vimos en la Figura 5-12.

Al aumentar la salida de luz al 76% (Figura 5-15b), el pico correspondiente a los 165 Hz de la salida, en la entrada aparece en torno a 90 kHz, y el paso por cero en torno a 130 kHz. Corresponde con lo que se observaba en la Figura 5-13.

Finalmente, en la Figura 5-15c (con la lámpara al 100%) aparece un pico en el rango 68-80 kHz, que no es muy puntiagudo, y que se debe a la frecuencia de conmutación. Existe otro pico alrededor de 110 kHz que se corresponde con los pasos por cero de la corriente según la Figura 5-14.

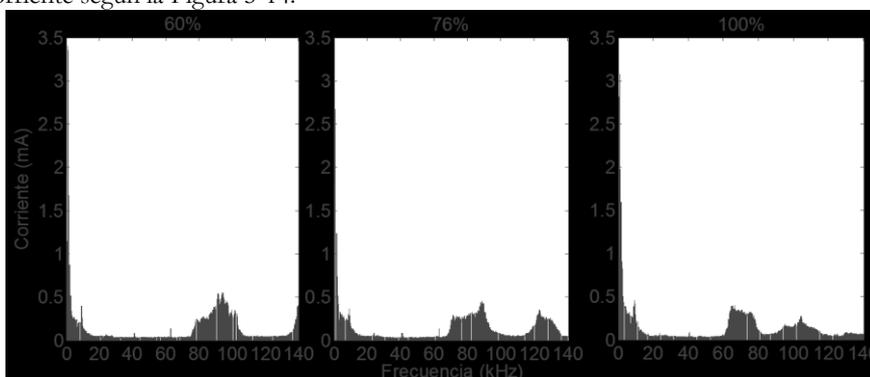


Figura 5-15. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta la lámpara en el rango 2-150 kHz para la lámpara al 60, 76 y 100%.

Tras examinar todo el rango 2-150 kHz, con el objetivo de poder ver en detalle lo que sucede en el rango 2-9 kHz (que es el rango que regula la norma UNE-EN 61000-4-7 [58] en cuanto a método de agregación de armónicos), en la Figura 5-16 se representa dicho rango. Para la lámpara al 100%, el pico se encuentra alrededor de 2,8 kHz, y alcanza 3 mA (0,9 %FND). Tras este pico, los armónicos siguen una tendencia decreciente.

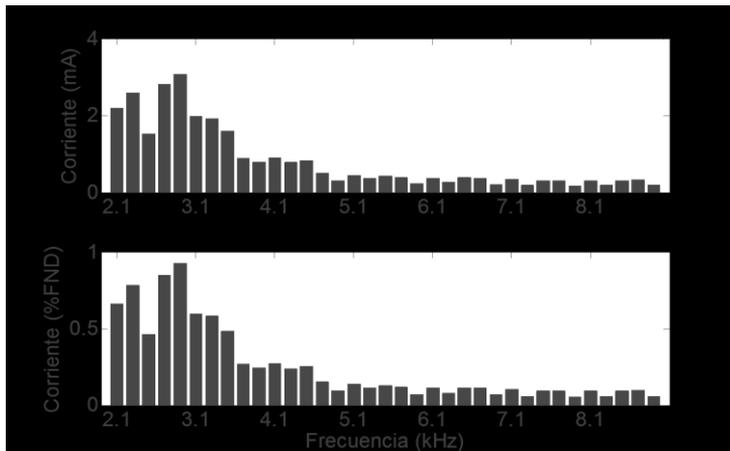


Figura 5-16. Espectro en bandas de 200 Hz de la corriente que alimenta la lámpara al 100%- en el rango 2-9 kHz.

5.3.3. Cambios en el espectro interarmónico

Posteriormente se estudia el contenido interarmónico en una de las lámparas. Para ello se han agrupado los interarmónicos de corriente tal y como indica la norma UNE-EN 61000-4-7 [58]. En primer lugar se estudia la estabilidad frente al tiempo con una lámpara conectada al 100% de nivel de potencia de arco durante 1,15 h. La representación, igual que el apartado anterior de cambios en el espectro armónico, se hace en porcentaje del valor máximo alcanzado durante todo el periodo.

Analizando los resultados, hasta transcurridos unos 20 minutos desde el arranque, el conjunto emite ciertos niveles interarmónicos, a continuación disminuye, pero en torno al minuto 40 de nuevo vuelven a ser elevados como tras el arranque. Sin embargo no todos los órdenes son elevados, desde el interarmónico 29 (1450-1500 Hz) en adelante los niveles no son tan elevados como al principio. Como vemos, este tipo de lámparas no se caracteriza por un alto contenido interarmónico en las altas frecuencias.

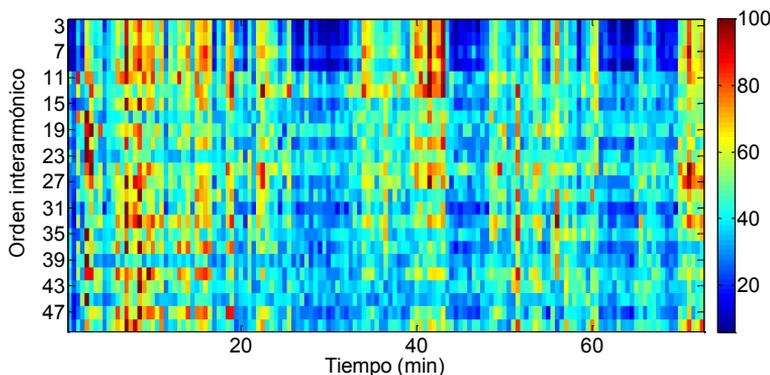


Figura 5-17. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco.

Posteriormente, se estudia el contenido interarmónico para diferentes niveles de atenuación. Primero se verá cómo evolucionan con el tiempo, para posteriormente

intentar obtener un patrón de ocurrencia. Al igual que ocurre con el contenido armónico, cuanto mayor es el nivel de potencia de arco, mayor el contenido interarmónico, alcanzándose los valores máximos con la lámpara al 100%. Además, existe mayor aleatoriedad en el contenido interarmónico con la lámpara al 100% en comparación con el 76 y 60%.

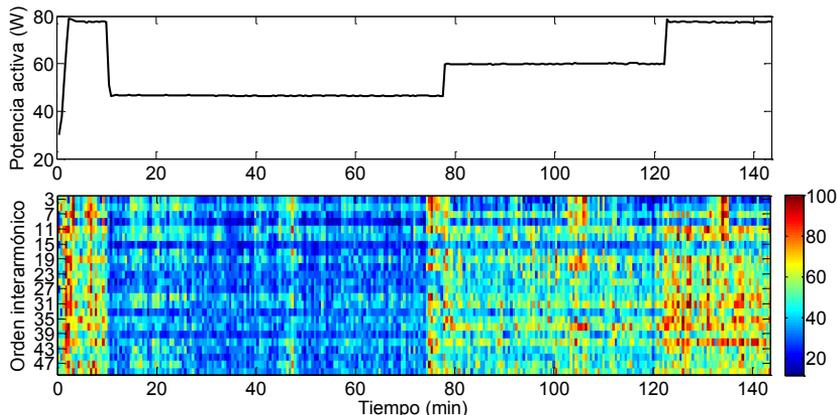


Figura 5-18. Valores de los interarmónicos de corriente frente a la variación del nivel de potencia de arco para una lámpara con balasto electrónico.

Como dentro del intervalo en el que la potencia se mantiene constante podemos sacar un contenido interarmónico que represente el comportamiento para cada una de las potencias, esto lo hemos representado en la Figura 5-19. Intentamos obtener una posible tendencia relacionada con la potencia de salida; pero no es posible.

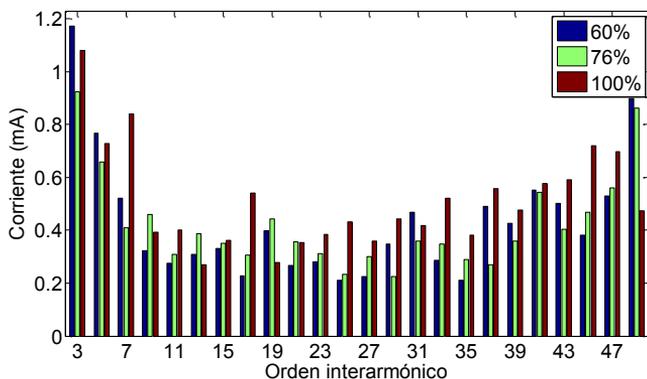


Figura 5-19. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para una lámpara con balasto electrónico con diferente nivel de potencia de arco.

Los interarmónicos 3 (150-200 Hz) y 5 (250-300 Hz) poseen menos magnitud con la lámpara al 100% que al 60%. Sin embargo los órdenes 7, 11, 15, 17, y del 23 hasta el 47 poseen mayor magnitud para el 100% que para los otros niveles. Los órdenes que presentan un aumento en la magnitud cuanto mayor es la potencia son 11, 15, 17, 23, 25, 27, 33, 35, 45 y 47. El resto, bien el nivel 76% es mayor, bien el 60%. Por tanto, se puede concluir que no existe una clara dependencia en el contenido interarmónico en relación con la potencia seleccionada.

Lo que sí es reseñable es la disminución cuanto mayor es el orden interarmónico hasta el orden 13 (650-700 Hz). Del 35 (1750-1800 Hz) en adelante ocurre lo contrario, un aumento cuanto mayor es el orden. Pero lo principal es señalar que las magnitudes de las que hablamos oscilan entre 1 mA y 0,2 mA.

5.3.4. Cambios en el espectro armónico no característico

En el espectro armónico no característico incluimos los armónicos pares y los interarmónicos. La forma de visualización, de nuevo, es en porcentaje del valor máximo alcanzado durante el periodo. Al igual que en los apartados anteriores, primeramente se analiza el contenido armónico no característico para el 100% de potencia de salida, representando dicho espectro durante 75 min. Según puede apreciarse, este presenta cierta aleatoriedad, siendo mayor cuanto mayor es el orden.

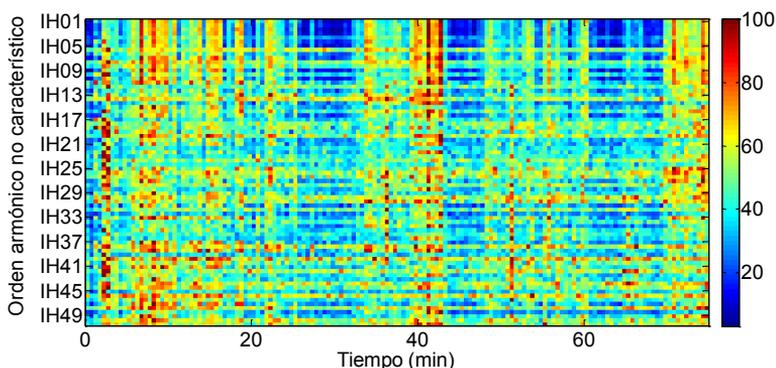


Figura 5-20. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del máximo valor) para una lámpara con balasto electrónico al 100% de potencia de arco.

Y también con diferentes niveles de potencia de salida. Es muy significativo el mayor nivel en estos armónicos cuanto mayor es la potencia de la lámpara.

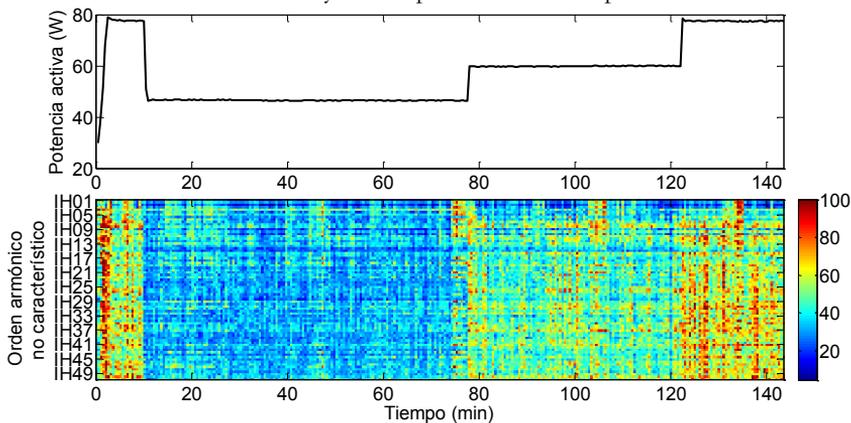


Figura 5-21. Valores de los armónicos de corriente no característicos frente a la variación del nivel de potencia de arco para una lámpara con balasto electrónico.

5.3.5. Agregación de lámparas

El fin de este experimento es extrapolar el contenido armónico a un mayor número de lámparas, en concreto hasta un número similar al de lámparas instaladas en un municipio, pero no ha sido posible la obtención de dichos datos que corroboren el modelo extraído. En su lugar, se procede a su estimación y posterior validación con la conexión de hasta cinco lámparas.

Los resultados del experimento realizado sobre alumbrado de interior, así como la conexión en el laboratorio de hasta 5 lámparas conectadas a balastos electrónicos, desprenden que una buena aproximación de la corriente consumida por varias lámparas corresponde a la suma de las formas de onda de la corriente de cada una de las lámparas. De todos modos, se corrobora en este caso dicha aproximación.

El procedimiento seguido ha sido la monitorización de la tensión y corriente de cada una de las cinco lámparas conectadas a balastos electrónicos, durante 3 minutos (con medidas cada 30 segundos), una vez la lámpara se encuentra estabilizada en corriente. El equipo de medida utilizado fue el osciloscopio SCOPE RECORDER con frecuencia de muestreo de 100 MS/s e intervalos de muestreo de 30 s. A continuación se calcula el contenido armónico de la corriente según indica la norma UNE-EN 61000-4-7 [58]. Se representa en la siguiente figura el promedio de dichos valores armónicos.

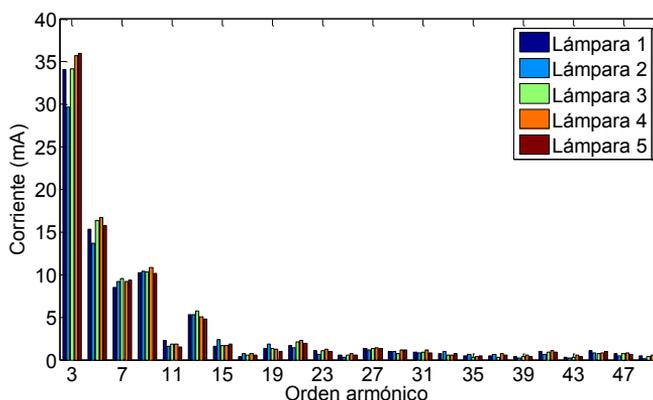


Figura 5-22. Espectro de los armónicos de corriente (mA) de todas las lámparas estudiadas.

A excepción del armónico de orden 3 y 5 en la lámpara 2, todas las lámparas poseen similar contenido armónico para cualquier orden. Por tanto, asumiendo que son idénticas, se procederá a la conexión progresiva hasta estar las 5 conectadas a la vez.

Primero es conveniente indicar la potencia activa para cada intervalo, siendo 390 W para 5 lámparas, 313 W para 4 lámparas, 236 W para 3 lámparas, 159 W para 2 lámparas y 80 W para 1 lámpara. Todas estaban al 100% del nivel de potencia de arco.

Además, se ha representado la evolución de la forma de onda de la corriente en el punto de conexión para distinto número de lámparas.

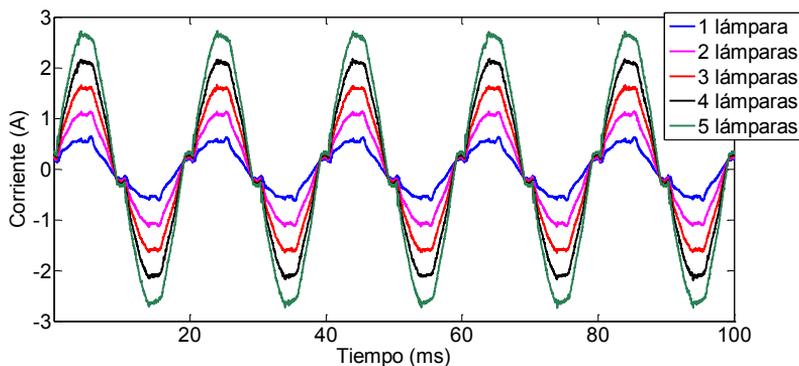


Figura 5-23. Evolución de la forma de onda de la corriente (A) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electrónicos.

Se aprecia que la corriente se duplica, triplica,... al conectar 2, 3,... lámparas. Estudiaremos a continuación si sucede lo mismo con el valor de los armónicos.

5.3.5.1. Espectro armónico

En la Figura 5-24 se muestra el contenido armónico en miliamperios y porcentaje de la fundamental para diferente número de lámparas conectadas al mismo tiempo. Se puede apreciar que hasta el armónico 9, la conexión sucesiva de lámparas resulta prácticamente en una suma aritmética de corrientes armónicas (en Amperios), pero posteriormente se analizará este efecto. Por ejemplo, el armónico de orden 3, posee magnitudes de 45,1; 73; 105; 137 y 166 mA para 1, 2, 3, 4, y hasta 5 lámparas. Los valores alcanzados desde el armónico 15, independiente del número de lámparas conectadas se encuentran en torno a 3 mA.

En porcentaje de la fundamental, todos los órdenes excepto el 5° muestran una disminución cuanto mayor es el número de lámparas conectadas. La excepción se produce en el orden 5°, donde prácticamente se mantiene constante en porcentaje de la fundamental en función del número de lámparas, en torno al 4%. Si estudiamos la fundamental para cada uno de los casos, observamos que en el caso de una lámpara, ésta vale 0,39 A, para 2 lámparas 0,74 A, para 3 lámparas 1,08 A, 4 lámparas 1,43 y 5 lámparas 1,79 A. Al ser mayor el incremento con la conexión de la primera lámpara que con las sucesivas, es mayor el decremento en porcentaje de la fundamental con la conexión de la primera.

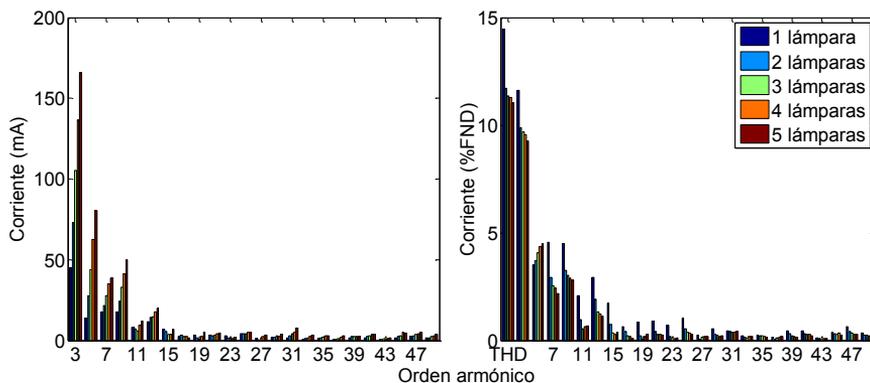


Figura 5-24. Evolución de los armónicos de corriente (mA y %FND) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electrónicos.

Comparando ahora el THDI en porcentaje, encontramos que salvo para el caso de una lámpara, en cuyo caso dicha magnitud alcanza un 14,4%, la conexión de dos, tres, cuatro y hasta cinco lámparas, mantiene prácticamente constante el valor del THDI en un 11%. Se aprecia que la adición de una segunda lámpara, provoca una disminución de un 3% con respecto a una sola. Esto se debe a la disminución de la magnitud (A) de los armónicos 3, 7, 9, 11 y 13 principalmente; que de hecho son los que más influyen en el cálculo del THDI.

A continuación se pretende obtener un modelo que simule el comportamiento de dicha conexión sucesiva de lámparas. Para ello se han hecho otras combinaciones de lámparas, midiéndose de nuevo la tensión y corriente, hasta llegar a las 5 lámparas a la vez conectadas. Según se vio en el apartado 2.10 sobre caracterización de la agregación y su impacto, la estimación del cambio en la emisión debido a la conexión de sucesivas cargas se puede realizar, añadiendo la magnitud del espectro, o sumando las formas de onda y calculando posteriormente el contenido armónico de la onda resultante. Se ha escogido esta última aproximación (color verde). Además se ha comparado esta última simulación con el espectro de una lámpara tantas veces como lámparas haya conectadas (2 lámparas equivale a 2 veces el espectro de una lámpara, 3 lámparas a 3 veces el espectro de la primera, y así sucesivamente). Esto aparece con color rojo.

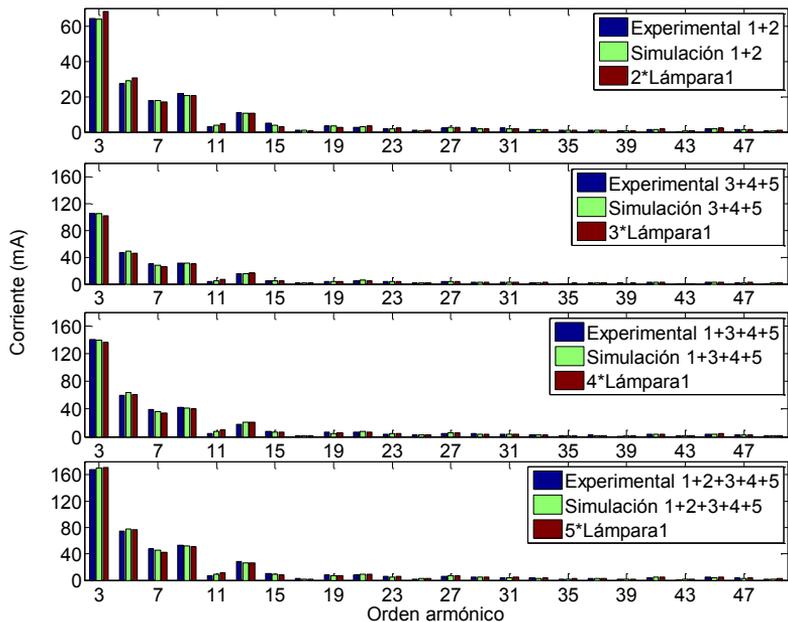


Figura 5-25. Espectro de los armónicos de corriente (mA) para diferente combinaciones de lámparas.

Se puede ver claramente que prácticamente coinciden ambas simulaciones con el ensayo experimental. Por ejemplo, como el armónico de orden 3 de una lámpara alcanza aproximadamente 35 mA, cuando hay dos conectadas este armónico vale unos 70 mA, cuando hay tres 105 mA, con cuatro 140 mA y con cinco 175 mA. Lo mismo ocurre con el resto de órdenes.

Es posible, por tanto, predecir el comportamiento armónico que tendrán n lámparas. De los resultados obtenidos, se observa que precisamente coincide el contenido de n lámparas con n veces el contenido de una de ellas. Este patrón también coincide con lo ocurrido en lámparas conectadas a balastos electromagnéticos. Este hecho es muy importante a la hora de predecir el contenido en un municipio, por ejemplo, o en la nueva instalación de alumbrado público en entornos industriales.

5.3.5.2. Espectro interarmónico

Si estudiamos a continuación el contenido interarmónico, es necesario obtener el de cada lámpara de manera individual. No ocurre igual que con los armónicos, obtenemos más variedad en el espectro, oscilando como máximo entre 100 mA de una lámpara a otra.

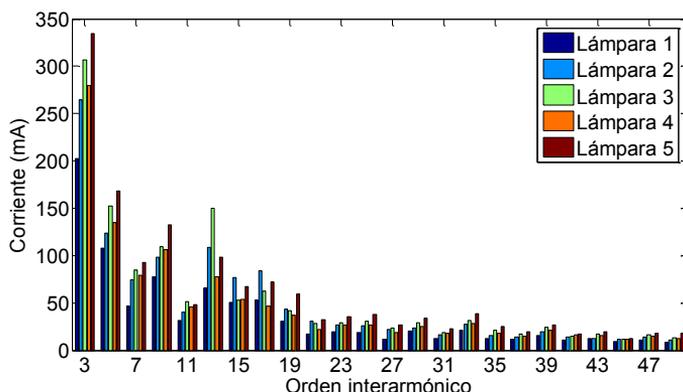


Figura 5-26. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) de todas las lámparas estudiadas.

Si ahora examinamos los interarmónicos de la conexión sucesiva de lámparas, observamos que hasta el interarmónico de orden 9 (450-500 Hz), la tendencia parece ser 2 y 3 lámparas poseen prácticamente la misma magnitud, se produce un incremento al añadir la 4, manteniendo el mismo valor tras añadir la 5.

Cuanto mayor es el orden interarmónico, prácticamente todos poseen la misma magnitud, 1-2 mA.

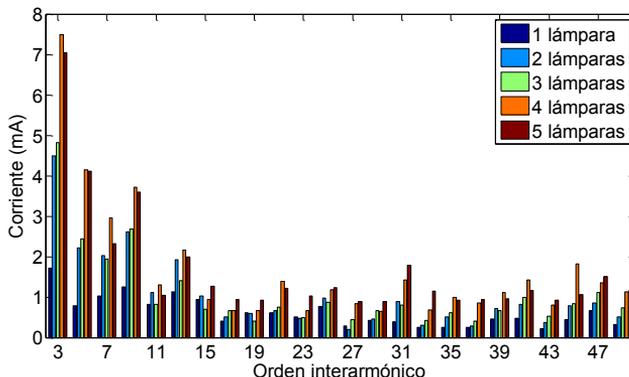


Figura 5-27. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para diferente número de lámparas al 100% conectadas a balastos electrónicos.

Si estos valores se comparan con los de los balastos electromagnéticos, en aquel caso, con una lámpara conectada prácticamente todos los órdenes poseían magnitudes en torno a 0,5 mA, excepto el grupo de interarmónicos desde el orden 11 al 19, que permanecían relativamente altos, alcanzando valores próximos a 1,5 mA y en algunos momentos 2 mA. Esos 2 mA en este caso son alcanzados cuando hay 2 o incluso 3 lámparas, por lo que es apreciable el bajo contenido en estos que poseen los electrónicos.

5.3.5.3. Cambios en el plano complejo

Se ha dibujado en el plano complejo, la evolución de la conexión progresiva de 1, 2, 3, 4, y hasta 5 lámparas conectadas a balastos electrónicos. Todas ellas estaban establecidas al

100% de la potencia. Al igual que ocurría con los balastos electromagnéticos, todas siguen el mismo ángulo, que en el caso del orden 3 es prácticamente invariable de 190° ; no sucediendo lo mismo con los siguientes órdenes, los cuales varían al añadir las siguientes lámparas. Tal es el caso del orden 5, que posee un ángulo entre 200° y 247° ; el orden 7 varía entre 164° y 200° . Otro caso similar al del orden 3, es el caso del orden 9, el cual prácticamente no varía de 230° , excepto cuando hay 1 sola lámpara que vale -90° .

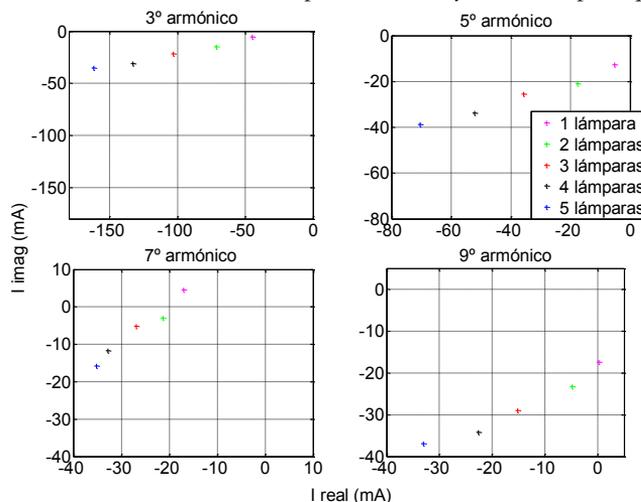


Figura 5-28. Evolución en el plano complejo los armónicos de corriente (mA) para diferente número de lámparas conectadas con balastos electrónicos.

A lo largo del capítulo se ha realizado un estudio teórico de las ventajas e inconvenientes de esta tecnología, mostrándose a continuación los resultados obtenidos de diversos experimentos realizados en un laboratorio. Se han medido hasta cinco lámparas conectadas a balastos electrónicos. Éstos permiten atenuación de la potencia de arco de la lámpara, para lo que ha sido necesaria la implementación de un sistema de comunicaciones para enviar datos a los balastos. El protocolo elegido ha sido DALI.

Por un lado se ha analizado el comportamiento de uno de los balastos, obteniéndose el espectro armónico e interarmónico característicos para cada uno de los niveles de atenuación estudiados (60, 76 y 100%). Se observa que este tipo de tecnología consigue una estabilidad en la potencia activa de la lámpara después de 4 minutos. Se desprende que cuanto mayor es la atenuación, menor es el contenido armónico, por lo que existe menor magnitud armónica (en Amperios) para el 60% que para el 100%. Con esto se consiguen ahorros energéticos y menor contribución armónica. Sin embargo esto no sucede con los interarmónicos, y éstos poseen un valor similar independiente del nivel de atenuación.

Por otro lado se ha analizado el contenido armónico no solo a baja sino a alta frecuencia (hasta 150 kHz), obteniéndose dos picos en la corriente que se dan a diferentes frecuencias dependiendo de la atenuación seleccionada.

Finalmente, otro aspecto estudiado es el fenómeno de la agregación. Para ello se han conectado hasta cinco lámparas, y del estudio en el plano complejo se extrae que el contenido armónico de n lámparas es n veces el contenido de una de ellas.

6 Estudio en alumbrado público con LED

En este apartado se recogen dos experimentos realizados con lámparas de LED para alumbrado público. Se incluye primero una revisión histórica de esta tecnología. A continuación, como aplicación de dichos equipos se han realizado dos experimentos teóricos, uno con cada lámpara por separado, y el otro con la conexión de dos lámparas al mismo tiempo.

Ambos experimentos están desarrollados en el laboratorio de Pehr Högström en la Universidad Técnica de Luleå (Skellefteå, Suecia). En él se encuentra construido un modelo eléctrico de una casa a gran escala, con longitudes reales de cable (alrededor de 200 m), alimentado por un transformador de 800 kVA, del que se alimentan dos edificios del campus. Por tanto, los resultados no están influenciados por dispositivos conectados al mismo tiempo en ese mismo cable, pero el transformador no es de uso exclusivo al laboratorio.

6.1. Revisión histórica

El primer LED fue producido en 1950 por científicos Británicos, y ha pasado de tener una extremadamente baja eficacia (1 lm/W), a datos tan elevados como 124 lm/W en 2010 [79]. La principal diferencia con otro tipo de lámparas como fluorescentes o de descarga es el principio de funcionamiento usado en las LED. Mientras las primeras producen luz por calentamiento del filamento o estableciendo un arco eléctrico a través del gas, LED emiten luz por un pequeño chip semiconductor al aplicarle una corriente.

Al contrario que las incandescentes, los LED emiten luz en una estrecha banda de longitud de onda, haciendo que la emisión aparezca coloreada. En la actualidad, la mayoría de los LED usados para aplicaciones de iluminación, emiten luz azul o ultravioleta sobre un fósforo. Posteriormente, el fósforo convierte dicha luz en luz blanca. Pero la luz blanca también puede obtenerse uniendo tres o más chips de LED que emitan en las zonas espectrales del azul, verde, y rojo. Este método, aunque es más complejo que el del fósforo, permite alcanzar niveles de eficacia realmente elevados. Por último, si no es crítico el buen rendimiento del color, la luz blanca también puede obtenerse con sólo dos LED (por ejemplo, amarillo y azul).

Los LED son especialmente ventajosos en alumbrado público porque ofrecen larga vida útil, son fuentes de luz direccionales lo que limita la contaminación lumínica, tienen alta eficacia, funcionan bien con bajas temperaturas, son muy resistentes a la vibración, capaces de proporcionar una luz de elevada calidad, permiten la atenuación entre 0 y 100%, no contienen materiales peligrosos para la salud, poseen un rápido encendido y

re-encendido (en ms pueden alcanzar la potencia máxima), y lo más importante, permiten ahorrar energía por su bajo consumo. Las predicciones indican que el alumbrado con LED en iluminación general tiene el potencial de reducir el consumo de energía destinada a iluminación de EE.UU prácticamente a la mitad y el destinado a alumbrado público en más de la mitad [80].

Sin embargo, el mayor obstáculo para una mayor penetración en el mercado continúa siendo el coste inicial de las luminarias LED. El estudio [81] reveló que el coste inicial oscila entre tres y siete veces más que las equivalentes HID. Sin embargo, esta diferencia se ve acortada por el reducido uso de electricidad y menores costes de mantenimiento. Además, la eficacia también es un factor importante. Actualmente la eficacia del LED es 90 lm/W, y se espera que en un futuro próximo sea 150-200 lm/W, por lo que es difícil comparar HID con LED ya que este último varía muy rápido. Entre otras, algunas de las ventajas son:

- elevada vida útil (50000 h);
- muy bajo consumo
- bajos costes de instalación y mantenimiento
- iluminación armonizada
- alta eficiencia
- posibilidades de atenuación
- trabaja bien con bajas temperaturas
- buenas características frente a vibraciones
- rápido encendido y reencendido (no es necesaria un previo enfriamiento como en las HID)
- posible uso con energías renovables

Sin embargo, una de las mayores desventajas es la necesidad de enfriamiento. Si el radiador está conectado eléctricamente al LED, se pueden inducir interferencias medibles en el punto de conexión de la lámpara. Dicho nivel es muy bajo, pero no se puede olvidar si se consideran comunicaciones en dicho punto.

6.2. Principio de funcionamiento

Los LED de alta potencia funcionan mediante corriente continua constante, por lo que es necesario un “*driver*” o convertidor para proporcionar la corriente requerida a partir de AC a DC. Un convertidor de potencia de dos etapas, un PFC más un rectificador en medio puente con circuito integrado para LED proporciona una salida controlada de corriente para un amplio rango de tensión alterna de entrada. El resultado es un alto f.d.p. y un bajo THD.

En el funcionamiento de las lámparas LED, se controla la corriente, siendo la tensión directa dependiente de la temperatura. Como la disipación de los LED es casi constante, la característica luminosa es estable independientemente de la fluctuación de la tensión de entrada, proporcionando una gran ventaja en comparación con otras lámparas destinadas a alumbrado público [82].

Entre los métodos de atenuación encontrados para esta tecnología de LED, podemos mencionar la modulación por anchura de impulso (PWM), en la que la corriente conmuta a alta frecuencia, con la desventaja de que al atenuar, incrementa el tiempo entre la conexión y desconexión. Otra técnica es la modulación en amplitud, lo que reduce la corriente a través del LED para conseguir así menores niveles de iluminación, cuyas ventajas son la ausencia de ruido audible durante la atenuación, y de interferencias visuales con otras fuentes luminosas.

Otras técnicas incluyen algoritmos para evitar la sobreiluminación, con lo que se consigue un consumo energético eficiente y una mejor fiabilidad del sistema. Un ejemplo lo encontramos en el uso de algoritmos predictivos que mantienen la corriente de entrada al LED durante todo el tiempo de vida especificado (50000 horas). Si se incrementa la corriente, el consumo de energía también aumenta en un 20%; por lo que si se evita la sobreiluminación (mediante el control de la corriente), se pueden conseguir importantes ahorros con respecto a otras soluciones.

6.3. Experimento en laboratorio para un tipo de LED

La primera luminaria LED de alumbrado público analizada es ATLA LED LLM 1800 L740 ESH 8M del fabricante Thorn y está diseñada para áreas residenciales y carreteras secundarias. La lámpara que incluye es Fortimo LED linear light module (LLM) de Philips, con duración de 50000 h e incluye 10 LEDs. Algunos de los parámetros medidos de dicha lámpara son una potencia activa de 25 W, THDI de 6,8% y DPF de 0,96, siendo estos últimos obtenidos tras las mediciones realizadas.

Primero se visualizan las formas de onda de tensión y corriente. Se puede observar la baja corriente consumida por este tipo de lámparas (0,17 A de pico; 25 W, 230 V, 0,96 DFP originan 113 mA), y los picos alrededor del paso por cero. Estos nos llevarán a estudiar el contenido armónico a altas frecuencias en la sección posterior.

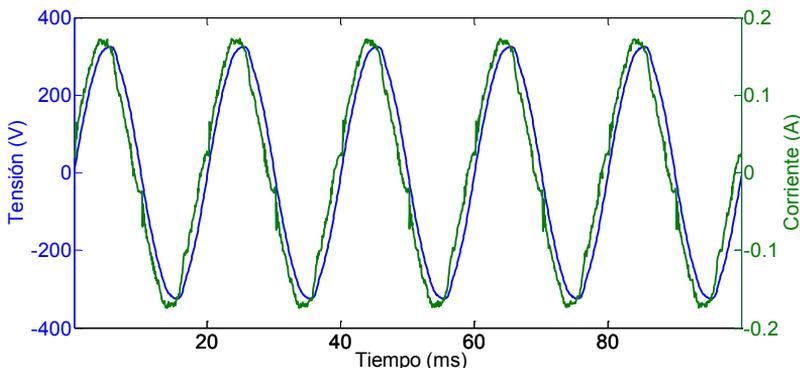


Figura 6-1. Formas de onda de tensión y corriente para la 1ª lámpara LED.

6.3.1. Cambios en la potencia

Al igual que se estudió en las lámparas de sodio conectadas a balastos electrónicos y electromagnéticos, la evolución temporal de la potencia activa también se ha analizado para esta lámpara. Para ello se han muestreado la tensión y corriente durante 30 min con intervalo de muestreo de 30 s, usando de nuevo el equipo Power Xplorer PX5 de Dranetz.

Como se puede apreciar, tras casi 30 min monitorizando ambas variables, el cálculo de la potencia activa resulta en una curva exponencial decreciente, por lo que no llega a estabilizarse el consumo tras al menos 30 min que es lo que duró el experimento. En el siguiente experimento con otra lámpara de LED podremos ver que incluso tras más tiempo de conexión, tampoco se obtiene la estabilización en la potencia. En concreto para este caso hay una variación del 2,6% entre el principio y el final del muestreo. Esta variación, sin embargo, no repercute en la calidad de suministro.

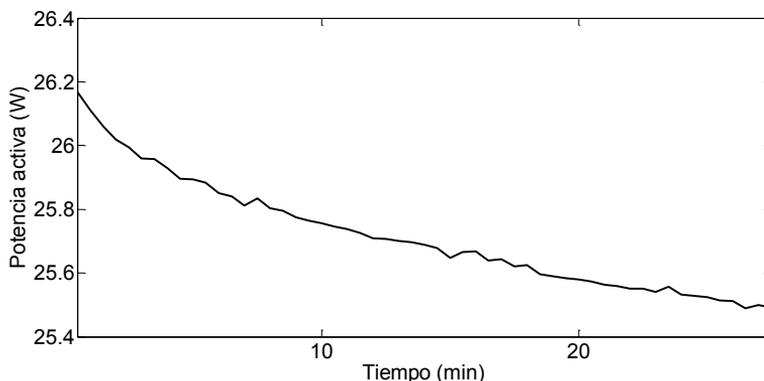


Figura 6-2. Evolución de la potencia activa para la 1ª lámpara LED.

Esto confirma, tal y como aparece en la literatura, la dependencia de los LED con la temperatura [83]. Una posible explicación la encontramos en el hecho de que la tensión directa cae con la temperatura. Si el LED funciona a corriente constante, a medida que el dispositivo se calienta, la tensión directa disminuye, y por ende, la potencia también disminuye con la temperatura.

El estudio [84] realizó un experimento en el que se evaluaba en un LED la variación de la temperatura de la base de aluminio y las láminas en función del tiempo de funcionamiento. Se observó que hasta casi tres horas la temperatura seguía incrementando. Esta puede ser la razón del decrecimiento en la potencia del LED.

6.3.2. Cambios en el espectro armónico

Es necesario distinguir en el estudio armónico entre baja (hasta 2 kHz) y alta (hasta 150 kHz) frecuencia.

6.3.2.1. Baja frecuencia

Una vez conocida la forma de onda de ambas magnitudes tensión y corriente, se ha registrado y visualizado durante 30 min (intervalo de muestreo de 30 s), las formas de onda de las mismas. De igual manera al procedimiento seguido en los capítulos anteriores, la representación temporal de los armónicos se hace como porcentaje del valor máximo para ese armónico durante toda la medida. Con este tipo de representación se resaltan las variaciones entre los valores, y se puede conocer la diferencia entre el máximo y mínimo. Hay que destacar que esta figura no se puede usar para comparar las magnitudes de unos armónicos con otros, ya que se usa diferente normalización para cada armónico, pero sí para comparar niveles de los mismos. También, señalar que el color rojo no indica ninguna interferencia importante ni una

superación de umbral durante la emisión; sino sólo el mayor nivel alcanzado durante las medidas.

Cada color representa en porcentaje, cuánta es la diferencia entre este valor y el máximo de las medidas en todo el intervalo. Varía desde el 0% (azul), el que más dista del máximo, hasta el 100% (rojo), que simboliza el máximo alcanzado en todo el intervalo.

Tras la agrupación indicada en UNE-EN 61000-4-7 [58], se ha calculado el contenido armónico hasta el orden 50 y en la Figura 6-3 aparece la tendencia de todos los armónicos impares (hasta el orden 50). De esta figura se puede ver que ciertos órdenes armónicos son bastante estables con el tiempo, sin que exista una diferencia entre los primeros y los últimos instantes de tiempo. Este es el caso de 3°, 5°, 9°, 13° y 15°. Sin embargo, otros como 7°, 11°, 17°, 19°, y superiores, cambian y de forma aleatoria. Por lo que podemos decir que puede ser bien propio de la lámpara, bien que al ser valores tan bajos, cualquier perturbación que se produzca en la red se manifieste de forma aleatoria.

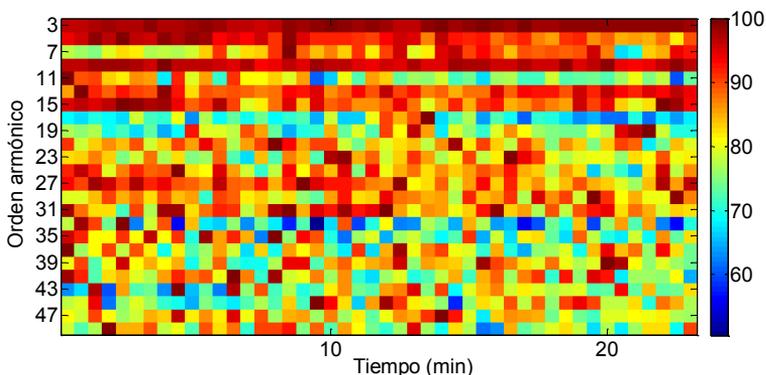


Figura 6-3. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del máximo valor) para la 1ª lámpara LED.

Sin embargo, tras estudiar la magnitud en Amperios vemos que ésta es bastante estable durante toda la medida (30 min). Por lo que estimando una media de los valores alcanzados en el periodo analizado, podemos concluir que el espectro armónico es el que se muestra en la Figura 6-4. A la izquierda se representa en miliamperios y a la derecha en porcentaje de la fundamental. En esta misma figura de la derecha aparece también el THDI para cuantificar la distorsión total de la corriente, y es de 6,8%. La primera conclusión es que los armónicos 3, 9, 13 y 15 son dominantes en este caso, estando prácticamente al mismo nivel el resto de armónicos impares. La fundamental de la corriente es de 117 mA. El 3º armónico es el más elevado, considerando elevado un valor de 6,5 mA (5,4% FND) aunque es relativamente bajo en comparación con otras tecnologías de alumbrado (el 3º armónico en las lámparas HPS conectadas a balastos electrónicos alcanzaba 38 mA y conectadas a balastos electromagnéticos 48 mA). Los otros órdenes se encuentran en torno a 1 mA (1% de la FND). El 9, 13 y 15 poseen mayor magnitud que las frecuencias circundantes. Sus valores son 2,85 mA (2,5% FND), 1,8 A (1,6% FND), y 1,5 A (1,25% FND) respectivamente. No es apreciable una tendencia cuanto mayor es el orden armónico.

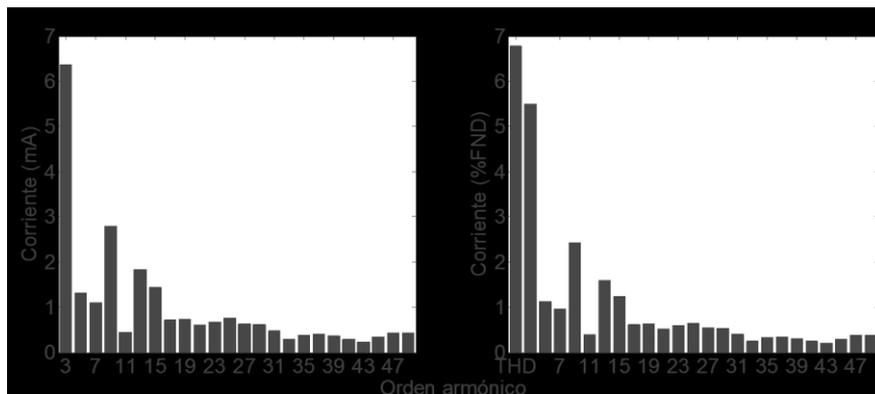


Figura 6-4. Espectro de los armónicos de corriente (mA y %FND) para la 1ª lámpara LED.

Si comparamos estos resultados algunas otras medidas hechas en lámparas de LED para alumbrado público [82] podemos ver un espectro similar de banda ancha, con unos elevados valores de los armónicos 3, 5 y 7; pero poseen mayores magnitudes que en las lámparas aquí estudiadas (entre 8,1% y 19,1% de la FND para el 3º armónico; alrededor del 3% de la FND para el 5º armónico y entre 2,1% y 5,5% para el armónico 7). El THDI es también diferente, en [82] este valor varía entre 9,3% y 21,5%, siendo el THDI en este experimento del 6,8%. Pero la principal diferencia entre estas lámparas es la potencia. En el presente experimento la potencia activa es de 25 W, mientras que en [82] las dos lámparas analizadas eran de 144 W y 68 W.

6.3.2.2. Alta frecuencia

Al observarse en la Figura 6-4 un espectro de banda ancha en los armónicos de corriente, se analizó una ventana de 200 ms con una mayor frecuencia de muestreo con el objetivo de estudiar el espectro armónico en alta frecuencia y confirmar este espectro de banda ancha. Para esto se usó el osciloscopio Hioki Memory Recorder 8855 a una frecuencia de muestreo de 10 MS/s. En la Figura 6-1 puede verse la emisión en alta frecuencia en las oscilaciones presentes en torno a 0,1 A.

Los valores en el dominio de la frecuencia se obtienen tras aplicar la FFT a los datos medidos en el dominio del tiempo. Para una ventana de 200 ms con frecuencia de muestreo de 10 MS/s, resulta una separación de 5 Hz y una frecuencia de Nyquist de 5 MHz. El método de agrupación de armónicos en bandas en 200 Hz es el recogido en UNE-EN 61000-4-7 [58] e indicado en el apartado 2.7 sobre medida de armónicos e interarmónicos. Al igual que cuando se ha realizado el estudio en alta frecuencia en los anteriores apartados, aunque el anexo B de la anterior norma establece medidas hasta 9 kHz, en esta tesis se ha considerado hasta 150 kHz con igual método de agrupación. A continuación se analiza el espectro en frecuencia 2-150 kHz con agrupación en bandas de 200 Hz tanto en miliamperios como en porcentaje de la fundamental.

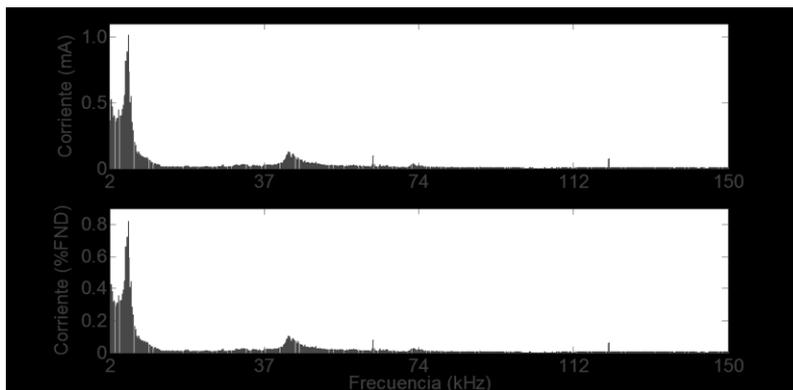


Figura 6-5. Espectro resultante de la corriente medida con agrupación en bandas de 200 Hz para la 1ª lámpara LED. Intervalo de 2-150 kHz.

El espectro incluye dos picos principales, uno en torno a 6,3 kHz y otro alrededor de 41 kHz. Además del mencionado pico a 41 kHz, la forma del espectro, la forma de onda de la corriente, y la potencia, podemos asumir que el balasto usa corrección activa del factor de potencia. Lo que destaca es una amplia banda de frecuencias.

Un mayor estudio se ha realizado sobre lámparas fluorescentes conectadas a balastos de alta frecuencia [85] y [86], mostrando el espectro unas elevadas componentes a 28 kHz y 123 kHz. Además, se mostró un incremento en la amplitud asociada con la frecuencia de conmutación alrededor de 40 kHz, que decrecía con la frecuencia. A partir de esto podemos concluir en nuestro caso que en las lámparas de LED, el pico alrededor de 40 kHz también se debe a la frecuencia de conmutación del circuito de corrección del factor de potencia.

Para ver con más detalle cuánta proporción existe con respecto a la fundamental, se ha representado el espectro en frecuencia pero entre 2 y 9 kHz porque esta banda de frecuencia es la que concentra el mayor valor.

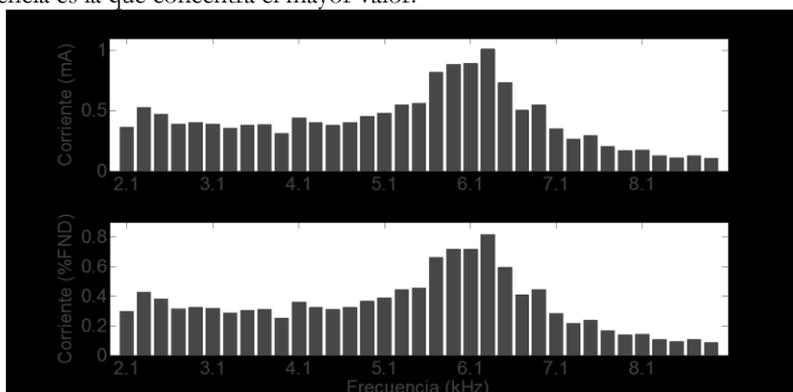


Figura 6-6. Espectro resultante de la corriente medida con agrupación en bandas de 200 Hz para la 1ª lámpara LED. Intervalo de 2-9 kHz.

Con esta última figura se puede ver que el espectro en torno a los 6,3 kHz es muy amplio, por lo que para analizar con más detalle la posible existencia de oscilaciones recurrentes alrededor de esta frecuencia, se examina la señal en el dominio del tiempo en

el rango de frecuencia después de la aplicación de un filtro pasa banda (2-150 kHz) con el fin de atenuar la fundamental.

La corriente filtrada de la Figura 6-7 se obtiene al aplicar un filtro Butterworth pasa banda (2-150 kHz) de segundo orden. La forma de onda de la corriente filtrada en el dominio del tiempo muestra oscilaciones recurrentes que se corresponden con los picos mostrados en la corriente sin filtrar (cercano a los pasos por cero de la fundamental de la tensión). En medio de las oscilaciones, la componente de banda ancha muestra una oscilación de alta frecuencia. Este fenómeno también aparece en [86], [85] y en [87] se describe con el término oscilaciones conmutadas, donde la frecuencia de dichas oscilaciones varía entre varios kHz hasta más de 10 kHz.

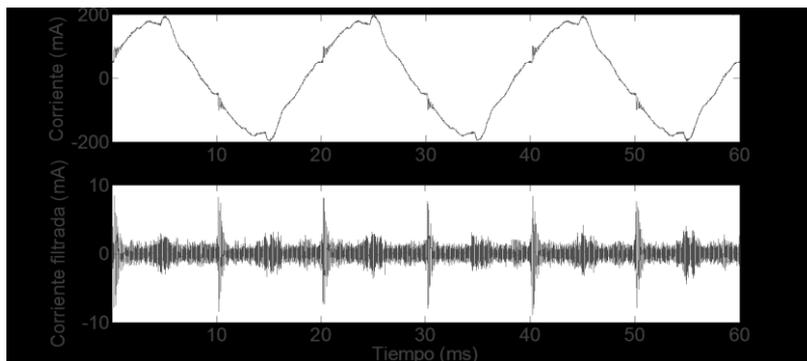


Figura 6-7. Corriente total en la lámpara LED (arriba) y versión filtrada de la misma (abajo) para la 1ª lámpara LED.

6.3.3. Cambios en el espectro interarmónico

A continuación se ha contemplado el estudio de los interarmónicos. Al igual que en los armónicos, pero en menor medida, se observa una aleatoriedad en el instante de incremento/decremento en el valor del interarmónico. Los interarmónicos 17 (850-900 Hz) y 19 (950-1000 Hz) poseen un elevado valor a la mitad de la medida (minuto 15), lo que provoca que aparezcan niveles más bajos (color azul) durante el resto del intervalo. El interarmónico 5 (250-300 Hz) posee niveles superiores al 3 (150-200 Hz) y 7 (350-400 Hz). Y cuanto mayor es la frecuencia, mayores valores se alcanzan. Por tanto, este tipo de lámparas también poseen interarmónicos a las altas frecuencias.

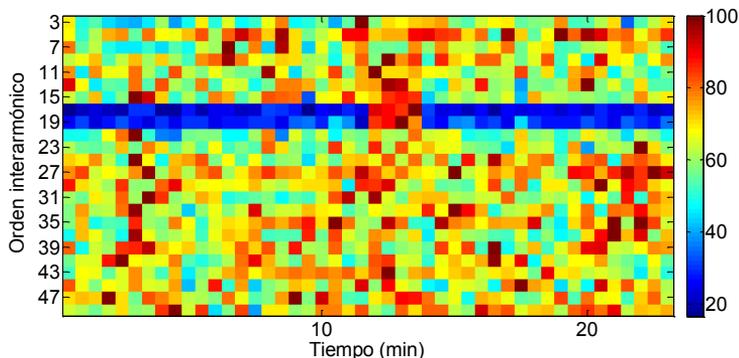


Figura 6-8. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para la 1ª lámpara LED.

Al igual que ocurrió con los balastos electromagnéticos, esa franja de elevado valor corresponde a otro equipo conectado en algún otro punto. Por lo que eliminando dichos elevados valores, y realizando el promedio del intervalo registrado, podemos extraer el patrón interarmónico de esta lámpara LED. Como se observa, prácticamente todos los órdenes poseen una magnitud de 0,2 mA. Si lo comparamos con lo ocurrido en los balastos electrónicos, estos poseían magnitudes que oscilaban entre 0,4 mA para los interarmónicos 9-39, y de 0,6 a 0,8 mA para los órdenes inferiores y superiores a los mencionados. Por lo tanto, es apreciable este menor contenido interarmónico, lo que supone otra ventaja del uso de LED.

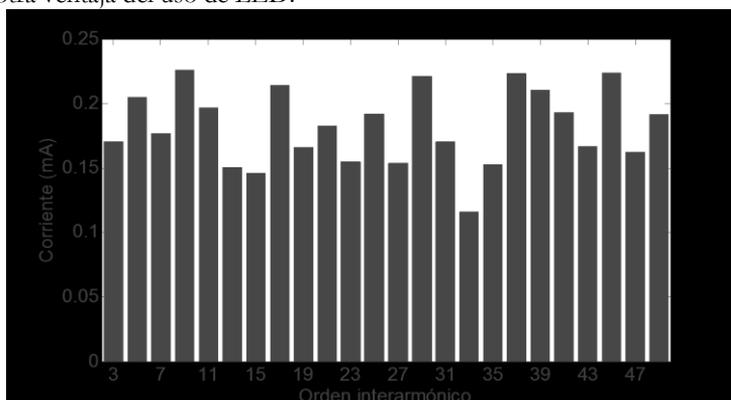


Figura 6-9. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para la 1ª lámpara LED.

6.3.4. Cambios en el espectro armónico no característico

Posteriormente, y para completar el estudio armónico, se representa la evolución de los armónicos no característicos (armónicos pares e interarmónicos). Lo primero que destaca son las dos franjas azules, correspondientes a los interarmónicos 17 (850-900 Hz) y 19 (950-1000 Hz) comentados en el apartado anterior. Lo que también se aprecia es que el pico que causaba el elevado valor de los anteriores interarmónicos, también aparece en los armónicos pares adyacentes a las anteriores frecuencias. Con respecto al resto de armónicos no característicos, se observa la misma aleatoriedad que se apreciaba en la Figura 6-3. Además, la aleatoriedad parece mantenerse en todos los órdenes, a baja y alta frecuencia.

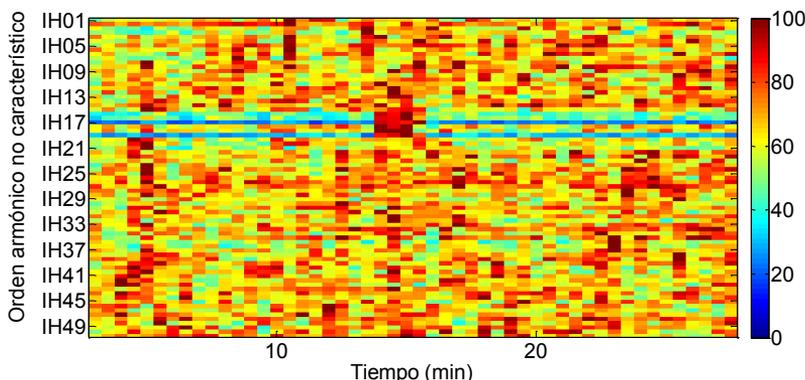


Figura 6-10. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del máximo valor) para la 1ª lámpara LED.

6.3.5. Cambios en el plano complejo

A continuación, y con perspectivas de análisis de agregación de múltiples lámparas LED, se han estudiado los valores del ángulo de fase de los principales órdenes armónicos (3°, 5°, 7°, y 9°) de corriente en forma de valores complejos.

Se ha decidido representar todos los valores complejos correspondientes a todas las muestras realizadas (55 muestras). Apenas hay variación en el ángulo, por lo que se puede extraer un promedio de los valores complejos para esta lámpara. El 3° armónico se encuentra en el 3° cuadrante con un ángulo de 216°; el 5° armónico en el 4° cuadrante con un ángulo de -43°; el 7° armónico de nuevo en el 3° con 200° de ángulo; y finalmente, el 9° armónico, con 267° se encuentra también en el 3°.

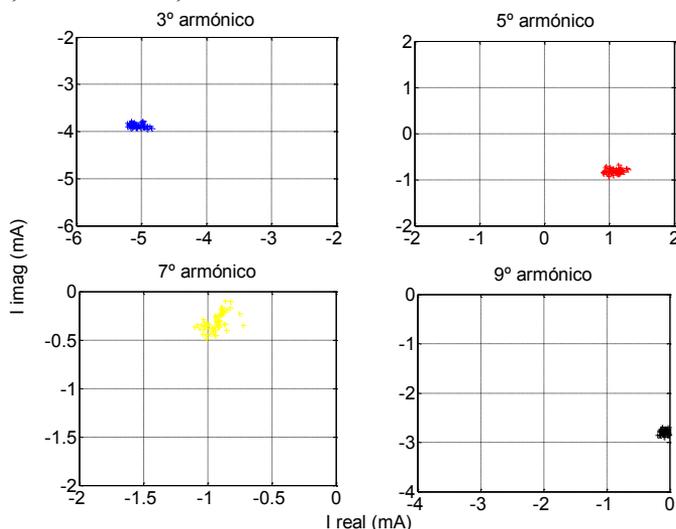


Figura 6-11. Valores del plano complejo (mA) del 3°, 5°, 7° y 9° armónicos de corriente frente al tiempo para la 1ª lámpara LED.

Destaca el bajo valor de la magnitud armónica, que ya se había observado en los anteriores apartados.

6.4. Experimento en laboratorio para otro tipo de LED

A continuación se ha estudiado otra lámpara LED. En este caso la luminaria posee una matriz de 30 LEDs, y el driver pertenece a la empresa UE Electronic (salida de 52 V, 0,7 A). Al alimentar con la tensión alterna de 230 V, la potencia total de entrada es de 42 W y la potencia de salida consumida por el LED es de 36 W, por lo que las pérdidas del driver son sólo de 6 W. Por tanto, se alcanza una elevada eficacia del 83,3%. Otros datos medidos en la lámpara son THDI 18,16% y DPF 0,961.

El equipo usado para la monitorización, de nuevo, fue Power Xplorer PX5 de Dranetz. En este caso, la monitorización duró prácticamente 3 h, con intervalo de muestreo de 30 s. Posteriormente se ha analizado el contenido armónico, y su variación con el tiempo, al igual que se hizo con la anterior lámpara LED.

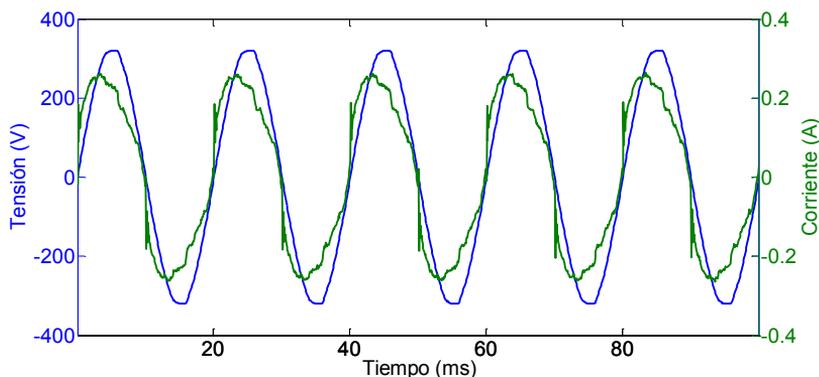


Figura 6-12. Formas de onda de tensión y corriente para la 2ª lámpara LED.

En este caso, la fundamental de la corriente es de 188 mA, y el pico de corriente absorbida (0,25 A) es algo mayor que en la anterior lámpara de LED de Thorn, que era 0,17 A (80 mA mayor). Por otro lado, el máximo de la tensión no coincide con el equivalente de la corriente, existe un pequeño desfase entre ambas. Los pasos por cero de la tensión y corriente, sin embargo, sí ocurren en el mismo instante.

6.4.1. Cambios en la potencia

Se ha examinado la estabilidad en el consumo de potencia que presentan estas lámparas, para estudiar la estabilidad temporal. Para ello la evolución de la tensión y corriente se ha monitorizado durante todo el periodo (3 h), calculándose posteriormente la potencia activa. Se observa una tendencia exponencial decreciente con una variación de un 4% entre el principio y el final del periodo; por lo que tras hora y media (la mitad de la gráfica) no es aún estable, y la potencia continúa decreciendo. Al igual que se comentó en la anterior LED, esto no repercute en la calidad de suministro, y puede deberse a la disminución de la tensión directa en el diodo con la temperatura [83].

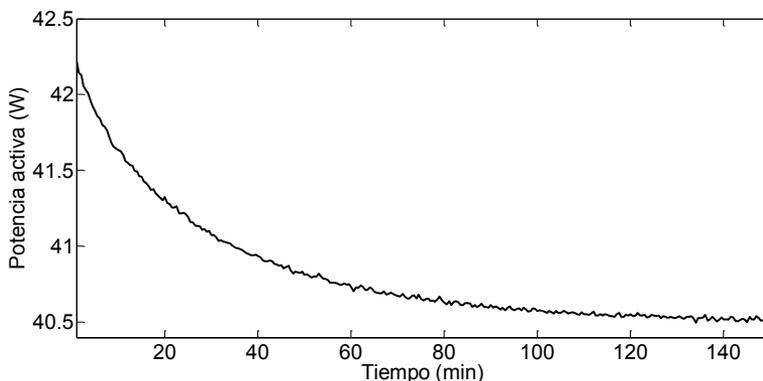


Figura 6-13. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para la 2ª lámpara LED.

Si lo comparamos con la evolución en la anterior LED de Thorn (Figura 6-2), en ella la variación de la potencia activa era de 2,6% durante 30 min; ahora, la variación es del 4% durante 3 h.

6.4.2. Cambios en el espectro armónico

Una vez conocida la forma de onda de ambas magnitudes tensión y corriente, se ha registrado y visualizado durante 3 h (con intervalo de muestreo de 30 s), las formas de onda de las mismas. De igual manera al procedimiento seguido en el apartado anterior, la representación temporal de los armónicos se hace como tanto por ciento del valor máximo de cada armónico para todos los instantes de tiempo.

Tras la agrupación indicada en UNE-EN 61000-4-7 [58], se ha calculado el contenido armónico hasta el orden 50 y se aprecia que es muy estable desde el principio para la mayoría de los órdenes armónicos, tanto para bajas como para altas frecuencias. En el caso de los órdenes hasta el 15, observamos que predomina el color rojo, lo que significa el 100%, por lo que no existe prácticamente variación en el contenido de dichos órdenes, estando todo el intervalo cercano al mismo valor. Algo más de variación se da en los órdenes del 19 hasta el 49, ya que se observa menor homogeneidad en las tonalidades.

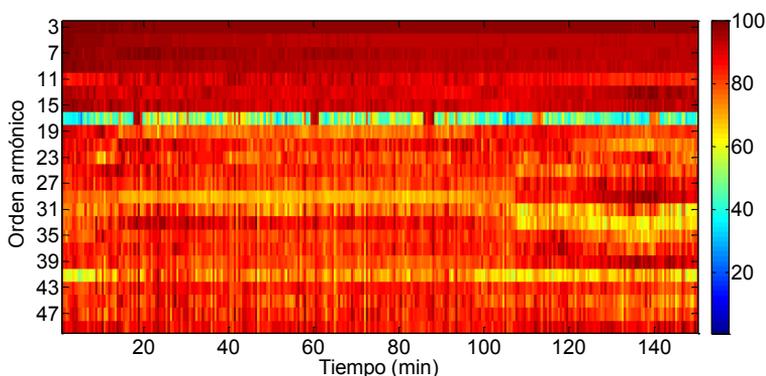


Figura 6-14. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para la 2ª lámpara LED.

La excepción se da en el orden 17. Se analiza en detalle la evolución de dicho armónico, resultando en un valor medio de 0,87 mA, y un máximo de 1,4 mA alcanzado en periodos constantes (tras aproximadamente 25 min). Claramente, igual que en casos anteriores, otra carga está causando dichos incrementos. Se obviarán para la extracción de un patrón armónico.

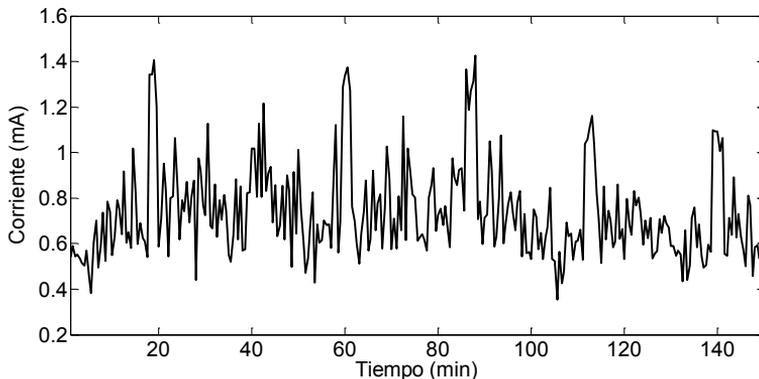


Figura 6-15. Evolución del orden armónico 17 (mA) para la 2ª lámpara LED.

A continuación se muestran los armónicos de corriente en miliamperios y en porcentaje de la fundamental, añadiendo además el THDI para ver la magnitud de los armónicos con respecto a la distorsión total. Todas las magnitudes de los armónicos son mayores en esta lámpara que en la anterior Thorn, tanto en valor absoluto como en porcentaje de la fundamental.

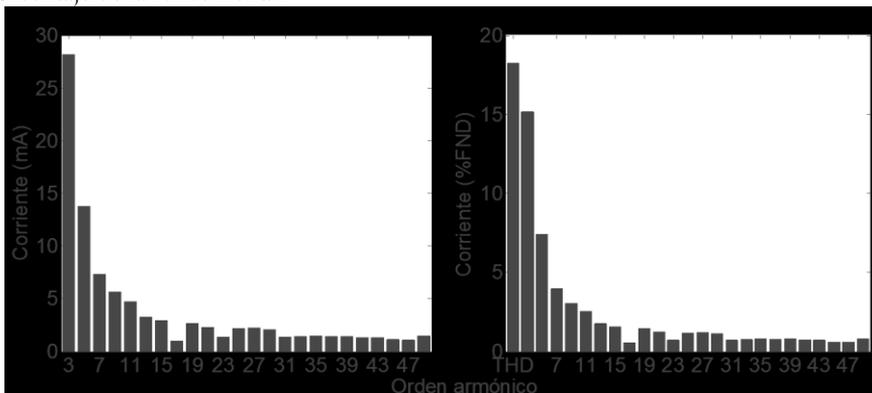


Figura 6-16. Espectro de los armónicos de corriente (mA y %FND) para la 2ª lámpara LED.

Mientras que en la Thorn la magnitud del 3º armónico era de 6,5 mA; en este caso alcanza 28 mA (15% de la FND); lo mismo ocurre con los armónicos 5 y 7, los cuáles, en la anterior lámpara eran de 1 mA, mientras que ahora alcanzan 15 mA y 7 mA (7% y 4% de la FND respectivamente). Otra importante diferencia es que en la Figura 6-4 se puede ver que tras el elevado valor del 3º armónico, los otros órdenes salvo alguno de ellos, se encuentran en torno a 1 mA. Sin embargo, en esta lámpara, hasta aproximadamente el armónico 21 no se produce esta estabilización.

A pesar de estos comentarios, en general la emisión armónica corresponde, como en la anterior lámpara, a un espectro de banda ancha, con un relativo alto valor del 3º armónico, una decreciente tendencia desde este orden hasta el 15, seguido por una estabilización alrededor de 2,5 mA. La emisión posee un mínimo en los armónicos 17 y 23. No hay una razón específica de esto, sino que es una característica común de los rectificadores de diodos [54].

6.4.3. Cambios en el espectro interarmónico

A continuación se muestra el espectro interarmónico que resulta de aplicar los métodos de agregación incluidos en la norma UNE-EN 61000-4-7 [58] y recogidos en el capítulo 2.7 sobre medida de armónicos e interarmónicos.

Coincidiendo con los intervalos en los que el orden armónico 17 (850 Hz) de la Figura 6-15 presentaba los incrementos, los interarmónicos 17 (850-900 Hz) y 19 (950-1000 Hz) poseen valores elevados ciertos instantes de tiempo, por lo que aparece todo el intervalo azul excepto dichos instantes. Pero además, y a diferencia de la Figura 6-14 en la que sólo se apreciaba en el orden armónico 17, ahora es posible ver dichos incrementos en prácticamente todos los órdenes interarmónicos, pero con mayor magnitud en los mencionados 17 y 19.

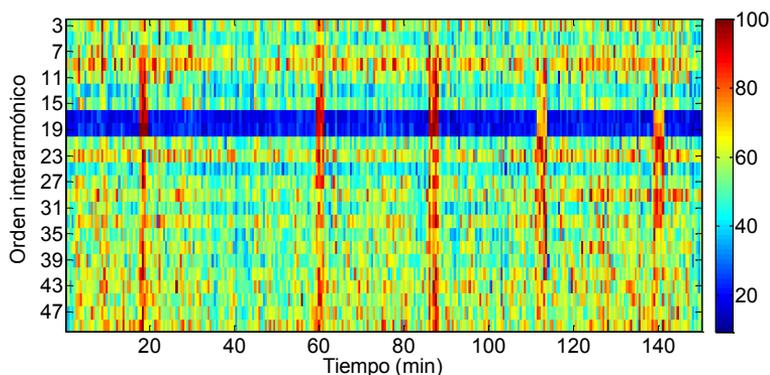


Figura 6-17. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para la 2ª lámpara LED.

Para ver concretamente el incremento de dichos órdenes, se representa la evolución en miliamperios de todos los órdenes interarmónicos. En este caso los colores representan cada una de las muestras hasta las 300 (correspondientes a las 3 h). Se aprecia que el incremento se da entre 0,3 mA de promedio y 1,2 mA alcanzado en los picos. Como se vio en la Figura 6-17, los órdenes 17 y 19 son los que presentan un mayor incremento, aunque de la Figura 6-18 se observa que el mismo fenómeno ocurre también desde el interarmónico 11 en adelante.

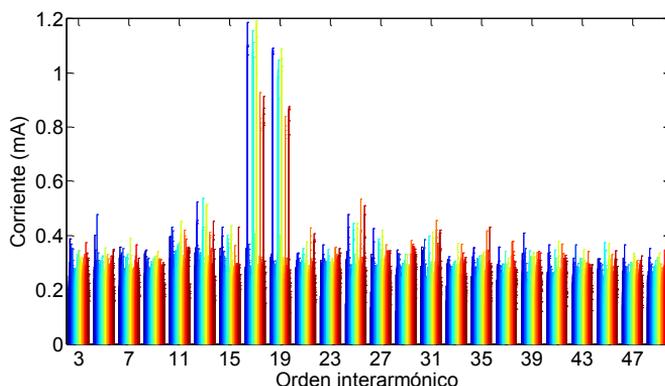


Figura 6-18. Evolución de los interarmónicos de corriente (A) para la 2ª lámpara LED.

Se puede, por tanto, concluir que una carga exterior provoca un gran aumento en el intervalo de frecuencias 850-1000 Hz, así como en las frecuencias adyacentes, aunque con menor intensidad.

Si eliminamos esos elevados valores que no corresponden a la lámpara tal y como se comprobó en las anteriores ocasiones, y calculamos el promedio, queda el patrón interarmónico de esta lámpara LED.

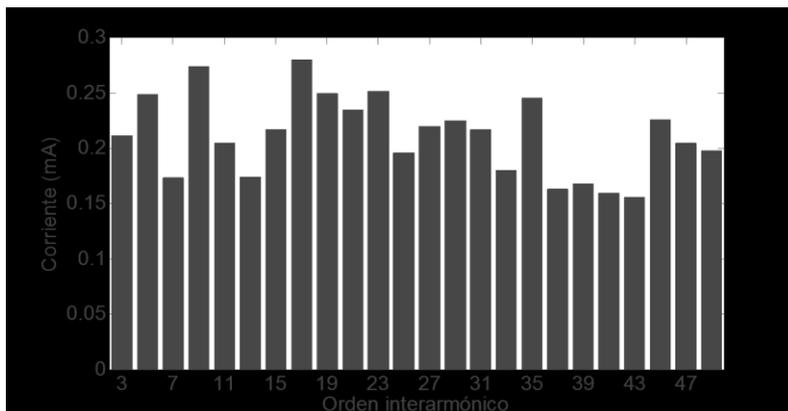


Figura 6-19. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para la 2ª lámpara LED.

Si comparamos estos valores con los obtenidos en la otra lámpara de LED de Thorn, observamos que prácticamente el contenido interarmónico es igual, en torno a 0,2 mA; con la diferencia de que ahora, ciertos interarmónicos alcanzan valores ligeramente superiores a este 0,2 mA, como es el caso del 9 (450-500 Hz), 17 (850-900 Hz) y 39 (1950-2000 Hz). Pero las variaciones son de 0,1 mA (de 0,2 a 0,3 mA).

Y si ahora los comparamos con los valores típicos de una vivienda, y recogidos en el apartado 2.6 sobre caracterización de la emisión armónica e interarmónica, el orden 3 (150-200 Hz) oscilaba en aquel caso entre 9-30 mA, siendo ahora 0,2 mA; el orden 5 (250-300 Hz) oscilaba entre 5-12 mA, y ahora 0,25 mA; y desde el orden 21 (1050-1100 Hz) era prácticamente 2,5 mA como máximo, siendo también ahora 0,2 A. De esto podemos concluir que la emisión de una LED de alumbrado público es mucho menor que la emisión armónica de una vivienda típica.

6.4.4. Cambios en el espectro armónico no característico

Si ahora tenemos en cuenta los armónicos pares y los interarmónicos en una misma gráfica, es lo que hemos denominado armónicos no característicos. Se sigue el mismo empleo de colores que hasta ahora se ha seguido.

Al igual que sucedía con los interarmónicos, los anteriores picos aparecen también en algunos órdenes pares. Además se siguen visualizando los picos en los interarmónicos 17 y 19. Es característica la aleatoriedad durante todo el intervalo, propia de los LED. Además, dicha aleatoriedad es independiente de altas o bajas frecuencias.

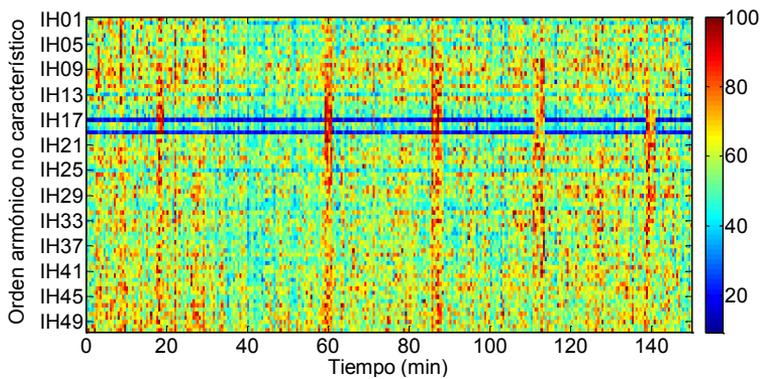


Figura 6-20. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo) para la 2ª lámpara LED.

6.4.5. Cambios en el plano complejo

Para finalizar con esta lámpara, a continuación se muestran los ángulos de fase. Para ello visualizamos en el plano complejo los principales órdenes armónicos de corriente (3, 5, 7, y 9) en mA. Para ver la estabilidad en los ángulos de los anteriores órdenes, se han representado todas las muestras, observándose poca variación en los mismos.

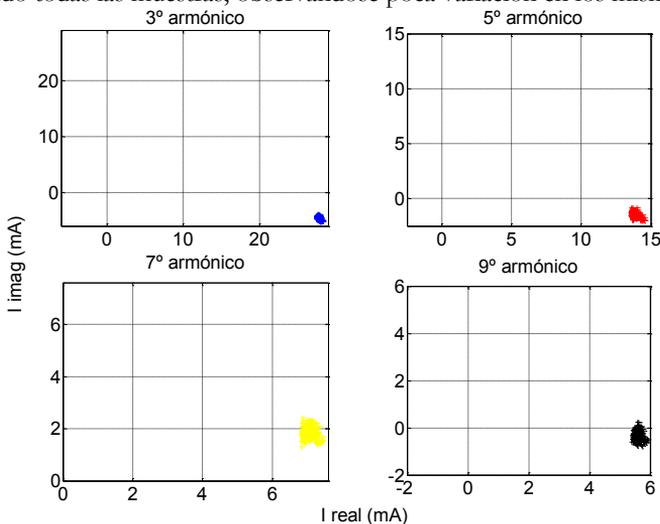


Figura 6-21. Valores del plano complejo (mA) del 3º, 5º, 7º y 9º armónicos de corriente frente al tiempo para la 2ª lámpara LED.

En el plano complejo encontramos en el 4º cuadrante el armónico 3 con un ángulo medio de -10° y los armónicos 5 y 9 con un ángulo medio de -5° , y en el primer cuadrante el armónico 7 con un ángulo medio de 15° .

Si los comparamos con la anterior lámpara LED de Thorn, vemos que existe total disparidad en los ángulos de fase, excepto en el 5º armónico, ya que en ambos casos se encuentra en el 4º cuadrante. Esto se corresponde con [88], en el que se miden 4 tipos de lámparas de LED y se observa una gran diversidad en la emisión. Esta diversidad de

fase ocasionará una cancelación y un menor contenido armónico que el correspondiente a la suma de cada uno por separado.

6.5. Agregación de lámparas

Una vez analizadas cada una por separado, se han conectado ambas al mismo punto eléctrico para su examen de calidad de suministro. Para ello se ha registrado, de nuevo la tensión y corriente, durante 1 h muestreando, en este caso, cada segundo. Al disminuir el anterior intervalo de muestreo de 30 s a 1 s se pretende descubrir algún cambio significativo en la evolución armónica. El registrador utilizado ha sido Power Xplorer PX5 de Dranetz.

6.5.1. Cambios en la potencia

Se ha registrado la tensión y corriente en el punto de conexión, y posteriormente, calculado la potencia activa durante todo el periodo. Al igual que ocurrió cuando monitorizamos cada una de las lámparas de forma independiente, la potencia activa disminuye cuanto más tiempo estén encendidas. Concretamente, en este caso cuando están las dos conectadas, la variación es del 3,8% (cuando para cada una de manera individual era 2,6 y 4% - con menores tiempos de registro). También se observa que la potencia activa es la adición de las potencias individuales de las lámparas (25,5 y 40 W respectivamente).

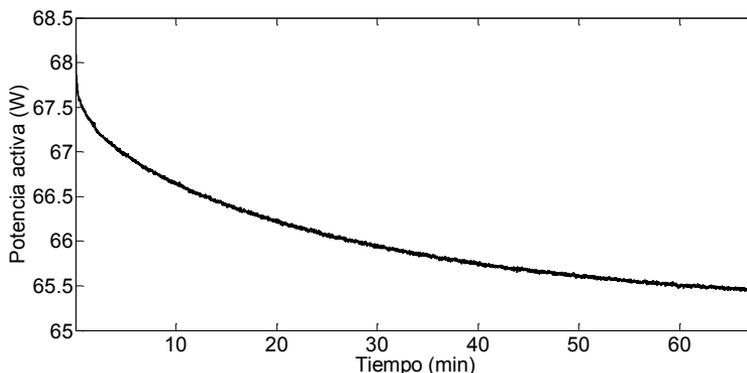


Figura 6-22. Evolución de la potencia activa (W) frente al tiempo para dos lámparas LED.

6.5.2. Cambios en el espectro armónico

Como en todos los casos anteriores, se ha procedido al cálculo y posterior agregación según la norma UNE-EN 61000-4-7 [58] de los armónicos de corriente derivados de la aplicación de la FFT a la onda de corriente medida. La representación es también en tanto por ciento del valor máximo alcanzado por cada armónico individual durante toda la medida. Se pretende analizar la estabilidad en la emisión armónica, muestreando para ello durante 1 hora ambas lámparas conectadas.

Hasta el armónico de orden 11, el 21, 27 y 29 no presentan prácticamente variación en su magnitud. Igual que se manifestó en cada uno de los LED de manera

independiente, el armónico 17 sufre importantes variaciones debido a una carga externa al laboratorio.

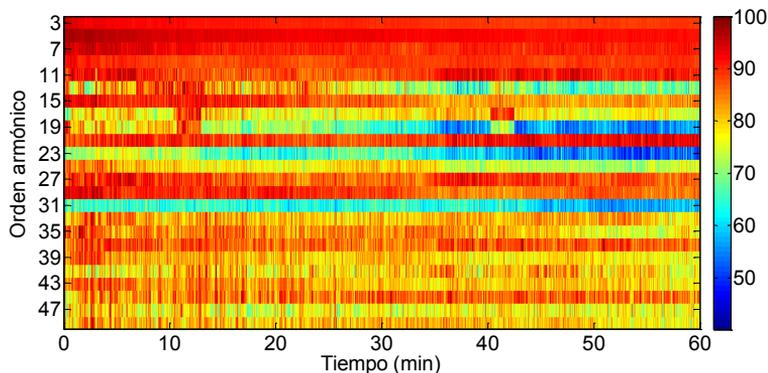


Figura 6-23. Valores de los armónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.

Para ver las magnitudes reales, se analiza la variación de cada orden en miliamperios, y viendo que es prácticamente constante en todo el periodo, se muestra directamente el patrón armónico de 2 lámparas de LED conectadas al mismo punto (como promedio de todo el intervalo). Esto se representa en la Figura 6-24 con el color rojo. Además en esta gráfica se muestra el espectro de cada una por separado, apreciando que el contenido final es menor que la suma individual tal y como se derivó del estudio en el plano complejo.

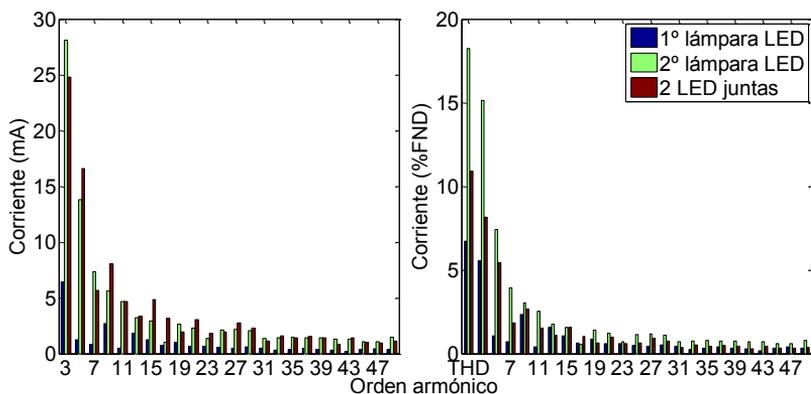


Figura 6-24. Espectro de los armónicos de corriente (mA y %FND) para cada LED individual y las dos simultáneas.

La componente fundamental es de 0,3 A. Mientras que en la 1ª lámpara la magnitud del 3º armónico era de 6,5 mA, y en la 2ª lámpara alcanzó 28 mA (15% de la FND); ahora las dos juntas alcanzan 25 mA (menor que la suma aritmética, debido a la diversidad en los ángulos de fase detallada en los apartados 6.3.5 para la 1ª LED y 6.4.5 para la 2ª).

Los armónicos 5 y 7, en la 1ª lámpara eran de 1 mA, y en la 2ª adquieren 15 mA (7% y 4% de la FND respectivamente), ahora con las dos conectadas alcanzan 16 mA. Hasta el armónico 21 no se produce la estabilización en la magnitud armónica, siendo 1 mA en cada una de las lámparas individuales, y ahora es de 1,6 mA.

De nuevo, al igual que de forma independiente, en general la emisión armónica corresponde, a un espectro de banda ancha, con un relativo alto valor del 3º armónico, una decreciente tendencia desde este orden hasta el 15, seguido por una estabilización alrededor de 1,6 mA.

Finalmente, en cuanto al THDI, el de las lámparas individuales eran de 19% y 7%, y ahora es de 11%, por lo que es menor que la mayor de las anteriores debido a la diversidad en el ángulo de fase.

De nuevo esto confirma lo incluido en [71] sobre cancelación. Por tanto, podemos decir que la conexión de lámparas LED de distintos fabricantes da un espectro en amperios menor que la suma aritmética, produciéndose cancelación.

6.5.3. Cambios en el espectro interarmónico

A continuación estudiamos la evolución de los interarmónicos con la misma forma de representación y agrupación que en los apartados anteriores. Al igual que ocurrió con los LED de manera individual, encontramos dos franjas con elevados valores interarmónicos, siendo, de nuevo, especialmente visibles el 17 (850-900 Hz) y 19 (950-1000 Hz), aunque ahora también el 13 (650-700 Hz) y 15 (750-800 Hz).

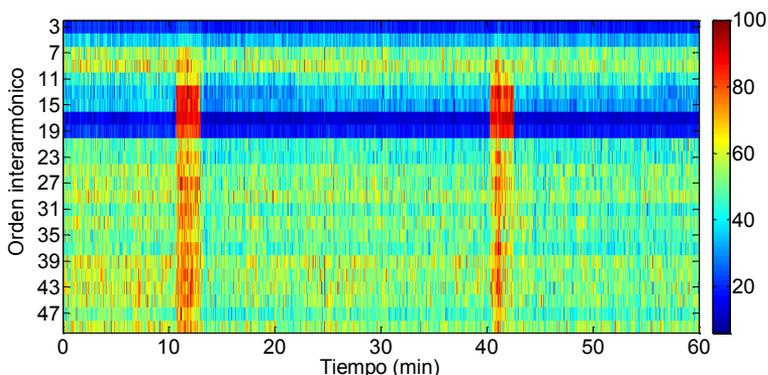


Figura 6-25. Valores de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.

Analizamos el incremento que suponen los anteriores picos. Para ello se visualizan los interarmónicos en magnitud durante todo el intervalo de visualización. Cada una de las barras de color representa cada una de las muestras (hasta las 3600 que hay correspondientes a los 3600 s muestreados). Es la misma carga que se veía en la 2ª LED porque ocurre en los mismos intervalos.

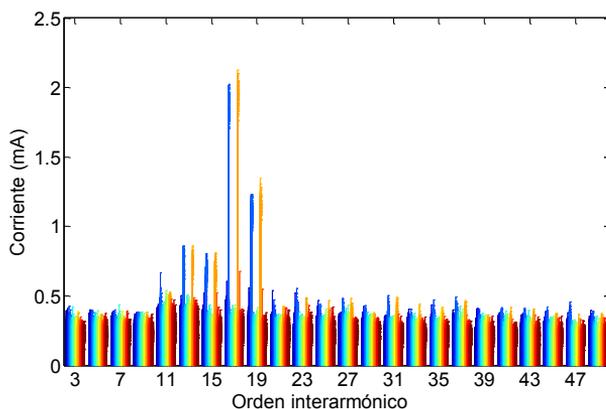


Figura 6-26. Evolución de los interarmónicos de corriente (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.

De manera independiente, cada LED poseía 0,2 mA de promedio en el contenido interarmónico, manteniéndose, de nuevo dicho valor. Por tanto, sí se produce agregación en los mismos, ya que no es la suma aritmética de los valores individuales.

Es también destacable que incluso dos lámparas de LED juntas poseen menor contenido interarmónico que sólo una de sodio de alta presión conectada a un balasto electrónico (0,4 mA).

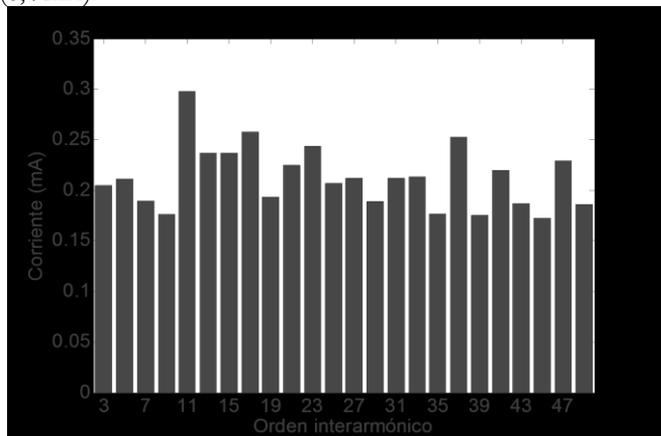


Figura 6-27. Espectro de los interarmónicos de corriente (mA) para dos lámparas LED.

6.5.4. Cambios en el espectro armónico no característico

Al igual que se ha realizado anteriormente, los armónicos pares e interarmónicos se han unificado para formar el contenido armónico no característico. La representación es en porcentaje del valor máximo alcanzado por cada orden en todo el periodo. Los colores representan la variación con respecto a ese máximo, siendo 100% (rojo) cuanto más cerca del máximo nos encontremos, y 0% (azul) cuanto más lejano de dicho valor.

Si a continuación comentamos la figura, vemos que no solo los interarmónicos, sino también los órdenes pares muestran valores más bajos hasta los 500 Hz. Posteriormente

nos encontramos con valores en torno al 60% en el rango de frecuencias en el que aparecían los elevados órdenes interarmónicos, y que también se observan en los pares. En torno al interarmónico 19 (950 Hz) de nuevo aparecen mayores valores y mayor aleatoriedad en el espectro.

No solo en los interarmónicos, sino también en los órdenes pares, se observan las franjas que revelan el alto contenido debido a una carga exterior al laboratorio.

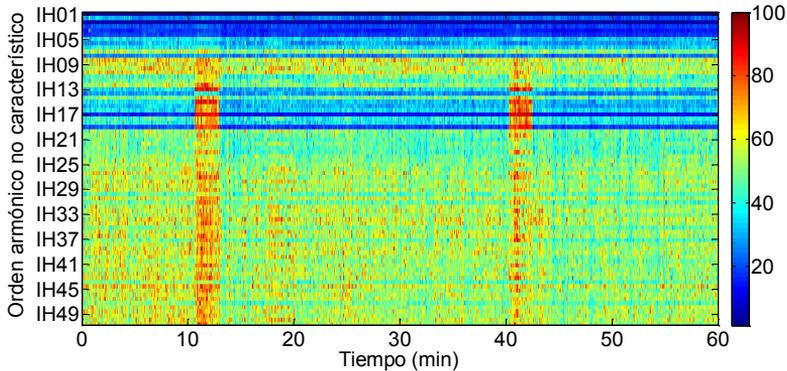


Figura 6-28. Valores de los armónicos de corriente no característicos (porcentaje del valor máximo) para dos lámparas LED.

6.5.5. Cambios en el plano complejo

A continuación estudiamos los cambios en el plano complejo derivados de conectar ambas LED juntas. Se representa en dicho plano los armónicos de corriente de órdenes 3, 5, 7 y 9 expresados en mA. En azul se representa el promedio de dichos armónicos para la lámpara LED que primero se ha examinado y en rojo el de la lámpara segunda. Finalmente, en verde, el resultado promedio de conectar ambas al mismo punto eléctrico.

Se puede observar cómo, al igual que en todos los casos hasta ahora examinados, el armónico resultante de la conexión de dos LED es prácticamente la suma de los valores complejos de los armónicos de corriente de cada una de las lámparas por separado. Por ejemplo, el 3º armónico en la 1ª lámpara LED posee un ángulo de -37° , y al añadirse a la otra lámpara LED que poseía $-9,77^\circ$, resulta un vector suma con ángulo de -18° (si el vector de la 1ª es $-5-3,8j$, al añadirle el de la 2ª que es $27-4j$ obtenemos una resultante de $22-7,8j$).

Lo mismo ocurre con el armónico de orden 5, donde el ángulo en el caso de la 1ª lámpara LED es de -40° y el de la 2ª es de -5° , por lo que al sumar ambos vectores complejos de los 5 armónicos de corriente obtenemos unos 3° (si el vector de la 1ª es $1-0,7j$, al añadirle el de la 2ª que es $13,73-1,2j$ arroja una resultante de $14,73-1,9j$). De esta diversidad en el plano complejo se demuestra un menor contenido en magnitud armónica.

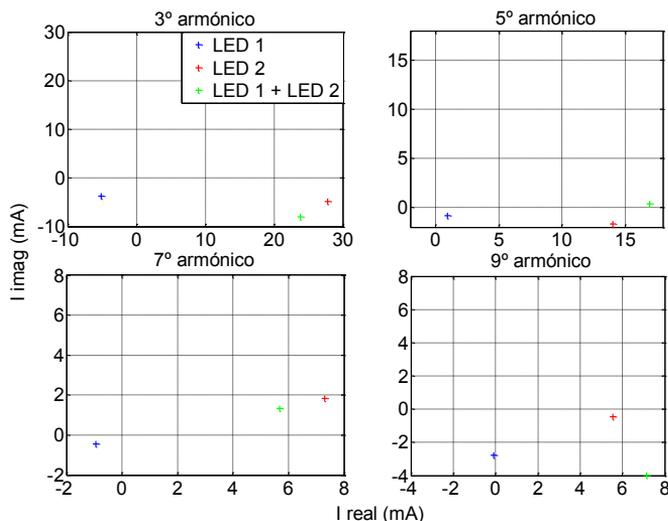


Figura 6-29. Valores del plano complejo (mA) del 3°, 5°, 7° y 9° armónicos de corriente para cada LED individual y las dos simultáneas.

En este capítulo se ha estudiado el comportamiento de los LED en alumbrado público. Se comienza con una introducción teórica en la que se indican las principales ventajas y desventajas de la mencionada tecnología. Posteriormente, y al igual que en los capítulos anteriores se detallan los experimentos realizados con las mismas, siendo en este caso examinadas dos lámparas LED diferentes.

Parámetros como potencia activa, DPF, THDI, armónicos e interarmónicos entre otros han sido medidos. Al igual que en los casos anteriores se ha examinado el tiempo de estabilización de estas lámparas, dando lugar, en el caso de la potencia activa, a una curva exponencial decreciente, por lo que nunca se obtiene la estabilización. Se ha demostrado que esta desestabilización en potencia activa no repercute a la calidad de suministro.

En el caso de los armónicos e interarmónicos, su estudio temporal también se ha realizado para cada una de las lámparas de forma independiente. En el caso de los armónicos, tanto bajas como altas frecuencias han sido analizadas. El estudio de las altas frecuencias muestra dos picos, y en general, un espectro de banda ancha. Además, alrededor de uno de los picos se ha detectado la presencia de oscilaciones recurrentes.

Finalmente, en cuanto al estudio derivado de la agregación de lámparas, sólo se ha podido realizar con dos lámparas simultáneamente. La magnitud del espectro armónico e interarmónico es inferior a la suma aritmética de cada una de las componentes por separado. Por tanto, al conectar varios LED de distinto fabricante se produce cancelación, arrojando una magnitud menor que la suma. Esto hace difícil la predicción en función del número de lámparas conectadas. Sin embargo, teniendo en cuenta la representación en el plano complejo, en el que magnitud y fase intervienen, se puede predecir el contenido resultado de la conexión de sucesivas lámparas, pero sería necesaria su medida.

7 Discussion

In the previous chapters 4, 5 and 6, several experiments have been done with various types of lamps used for street lighting. The current chapter has a discussion of all those three technologies in order to analyze the main differences between them. Their current and voltage waveforms, THDI for different frequency ranges, and active power have been calculated as it is indicated in UNE-EN 61000-4-7 [58].

In the below table it is possible to compare some important parameters among the different used technologies. More concretely, the fundamental of the current, reactive and active power, and the displacement power factor have been measured. The higher power is consumed by the sodium lamp with electronic ballast set to 100% of arc power level; but this load has not the higher harmonic distortion. In fact, this value is reached by the electromagnetic ballast (which has roughly the same active power). On the other hand, the second LED lamp has not a high power (36 W), but higher current harmonic distortion (18.16%) compared with electronic ballast (12.83%).

Table 7-1. Power quality parameter for the lamps.

	I_{1rms} (A)	S (VA)	P (W)	DPF
LED one	0.12	26.57	25	0.96
LED two	0.19	43	36	0.961
Electronic ballast (100%)	0.33	79	77	0.9745
Electromagnetic ballast	0.28	64.7	65	0.9989

In terms of active power, the stabilization of different lamps and technologies has been observed through continuous measurements of voltage and current during several minutes. In the case of electromagnetic ballasts connected to HPS lamps, the active power was calculated and 6 minutes were required in order to achieve the stabilization in the mentioned power. After those minutes, there is hardly any variation in this parameter. However, electronic ballasts connected to HPS lamps takes only 4 minutes for the stabilization in active power.

It is interesting to note, however, that the active power in LED lamps follows an exponential decreasing curve. The first lamp was monitored during 30 minutes, and after this time, the lamp didn't achieve the stabilization (the variation is relatively low, 2.6% from the beginning to the end). The second LED lamp, even after 140 minutes, the stabilization was not achieved, and the variation is in this case 4%. In spite of those comments, it should be noted that this decreasing tendency has no impact on power quality, because the difference is small, even more so because these lamps usually operate for several hours.

As far as harmonic current is concerned, different approaches have been taken into account, such as magnitude and phase angle. Starting with the magnitude study, the latter can also be divided into low and high frequency analysis. In the following figure it is possible to see the harmonic differences up to 2500 Hz between LED,

electromagnetic and electronic ballasts, the last one set to three dimming steps 60%, 76% and 100%. As shown in Figure 7-1, the emission of electronic ballast with power set to 100% is 65% less than the emission of electromagnetic ballast. Even when the quantity of harmonic distortion is lower in the case of electronic ballast, such as at 60% of the load, the difference is double (46%). This pattern is almost the same for all the harmonic order except for 5th order, which is between 76% and 100% of the electronic ballast.

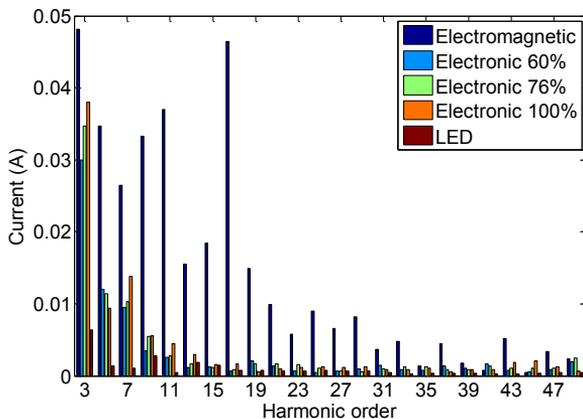


Figure 7-1. Comparison of harmonic current spectra.

Not only the harmonic, but also the interharmonic spectra have been studied for all the technologies used in the previous experiments. The opposite as it happened with the harmonic spectra, the interharmonic magnitudes are lower for electromagnetic ballast connected to HPS lamps than any other technology, up to 7th harmonic. From this order onwards up to 35th order, the latter has the higher interharmonic content, followed by electronic, and the LED has the lowest interharmonic content.

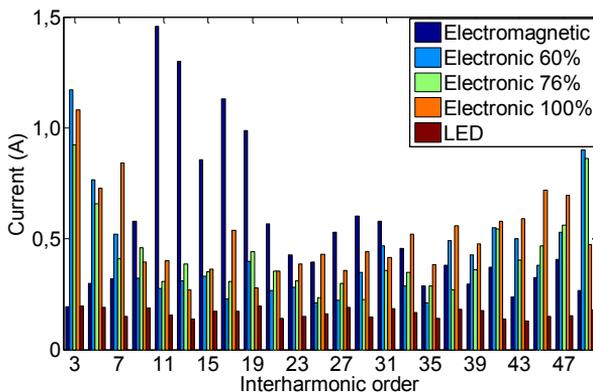


Figure 7-2. Comparison of interharmonic current spectra.

The higher interharmonic magnitudes in electromagnetic ballasts connected to HPS lamps appear to be from 11th to 19th interharmonic orders.

Studies have also been performed of the harmonic spectrum within the high frequency distortion (from 9 to 150 kHz) for all the technologies. Frequency aggregation has been taken into account as UNE-EN 61000-4-7 [58] indicates within Annex B for

frequencies up to 9 kHz. The highest current peak is reached by both electronic and electromagnetic ballasts connected to HPS lamps, and in electronic ballast is 3 mA (around 1% of FND) and 6 mA in electromagnetic (2% of the FND). However, the LED lamp has a 1 mA peak (0.8% of FND) overall showing a broadband spectrum.

The trend followed by the two high frequency spectra from electronic ballast and LED lamp show a peak (one around 2.8 kHz and the other around 6.1 kHz), whereas the trend of the electromagnetic shows a decreasing tendency without any peak because the system does not have any switching component.

In order to evaluate the total harmonic content, the THDI (see Table 7-2 and Figure 7-3) has been calculated for all the technologies. This magnitude has been preferred for comparison among them in Amps instead of percentage of fundamental. Moreover, it is convenient to distinguish between different frequency ranges. From 0-2 kHz, the lamp with electromagnetic ballast has the higher total harmonic distortion, three times higher than with electronic ballast at whatever arc power level. The lower value is reached by the LED lamp (13 mA).

The total harmonic distortion of the current has also been calculated over the frequency bands 2-9 kHz and 9-150 kHz. In the range 2-9 kHz, the differences in emission between the technologies are smaller. But even here, the highest emission is produced by the lamp with electromagnetic ballast and the lowest by the LED lamp. The LED has the highest efficiency and the lowest emission.

However within the frequency range 9-150 kHz, the lamp with electromagnetic ballast has a lower emission than the one with electronic ballast. Also in this frequency range the LED lamp has the highest emission. The measurements also show that the arc power level for the lamp with electronic ballast has only a small impact on the emission, in any of the frequency ranges.

Table 7-2. Total harmonic distortion for different frequency ranges.

	THDI (mA) from 0-2 kHz	THDI(mA) from 2-9 kHz	THDI (mA) from 9-150 kHz
Electronic 60%	34.2	6.5	4.4
Electronic 76%	38.7	6.4	4.2
Electronic 100%	42.5	6.9	3.8
Electromagnetic	119.7	15.2	1.9
LED	13.0	2.9	0.703

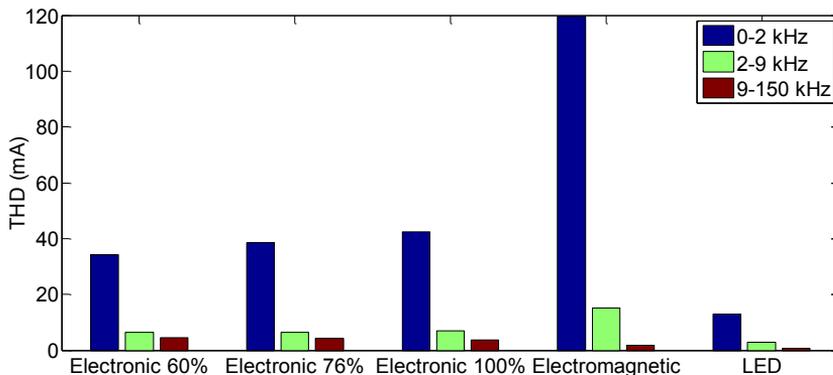


Figure 7-3. Comparison of THDI among all the technologies within different frequency ranges.

Finally, another aspect studied with all the technologies is the impact due to load aggregation. Then, several measurements have been done in order to characterize this phenomenon. For example, in the case of electronic ballasts connected to HPS lamps, up to five lamps have been connected and harmonic spectra have been calculated. No aggregation has been observed in this case. This means that there is no cancellation between individual lamps. The harmonic spectrum for n lamps is n times the spectrum from 1 lamp so the emission is linear with the number of lamps.

The same was observed for LED for indoor lighting: up to 12 lamps were connected and measured, giving the same relative harmonic content independently of the number of connected lamps. However, with LED street lights the behavior is not the same mainly because they are from different manufacturers and they differ in phase angle content, therefore giving lower harmonic content. There is cancellation between them.

8 Conclusions and future work

8.1 Conclusions

The harmonic emission from individual devices (outdoor and indoor lamps) and from a complete installation (lamps connected to other devices) has been studied focused on the use of harmonic phase angles in combination with the amplitude of the harmonic current. The use of the phase angle as an additional parameter gives much more information and understanding than only the magnitude. In fact, the magnitude is what matters for the impact on the grid and on other network users. Furthermore, the complex harmonic current can help to understand how a device contributes to the total harmonic emission. Interharmonic and non-characteristic harmonic as well as active power have also been studied.

The changes of all the previous magnitudes have been studied through time domain, and a pattern has been observed. Even more, in the case of electronic ballasts connected to HPS lamps, different dimming levels have been also taken into account.

Some common conclusions found on this thesis are that adding the magnitude spectra (low and high order harmonics) from individual devices can greatly overestimate the emission from an installation with mixed load. This phenomenon has been deeply studied in common household equipment connected to lamps, and in outdoor lighting. This lead to the necessity of doing more measurement in order to accurately estimate the emission from mixed load.

The load aggregation has also been observed. From the study with LED indoor lamps, it can be concluded that there is no cancellation between individual lamps from the same manufacturer up to 12 measured lamps. The same happens in HPS lamps connected to electronic ballasts, the harmonic spectra for n lamps is n times the spectrum from 1 lamp. Therefore the emission is linear with the number of lamps. However, in LED street lamps (from different manufacturers) there is cancellation due to differences in phase angles among the lamps. The harmonic spectra are lower than the algebraic sum of individual spectrum.

Although there are common conclusions, they must be divided into indoor lighting and outdoor lighting. Regarding *indoor lighting*, energy-efficient lamps (CFL and LED) take a small current, so that despite their high relative distortion, the contribution to the total emission from a domestic customer is small. In fact, it has been noticed that the impact strongly depends on which other equipment is connected and that devices like TV, computer and microwave have a much bigger impact than the lamps.

After this analysis it can be seen the more devices are connected, the higher the spread in emission in the complex plane, as a result there will be some cancellation between different customers. The impact of LED lamps is smaller, for most harmonics, than for CFLs for the same amount of lumen because LED lamps take less fundamental current. Moreover, when LEDs are involved the harmonic contributions are less noticeable.

Several of the observations show a shift towards emission at higher frequencies with the introduction of LED lamps. The presence of CFL and LED creates less damping of interharmonics from other equipment than incandescent lamps. Also interharmonic and even-harmonic levels appear to increase with the introduction of LED lamps. Although no adverse impacts of this are yet to be expected a further study of the phenomenon is warranted, among others to decide if existing planning levels might require changes.

Overall, the measurements presented in this thesis confirm the conclusion from other studies that there is some increase in harmonic emission due to the replacement of incandescent lamps by CFLs and LED lamps, but that there is no reason for concern. Also, the diversity in harmonic phase angle between individual devices, and the resulting diversity between the scenarios and variation with time within each scenario explain why the field measurements [89] did not show any noticeable increase in total emission due to the replacement of incandescent lamps by LED lamps.

On the other hand, regarding *outdoor lighting*, a harmonic analysis on modern and old fashioned street lights has been developed. The main benefit for reducing the THDI in street light lamps is because street lamps are always connected in groups, so the total emission can still be rather big.

LED and HPS not only have higher efficiency, they also emit fewer harmonic into the grid at lower frequencies. Even in % LED and HPS have lower emission. There is thus no risk that a higher emission level per street-lamp feeder will occur because more lamps can be connected on one feeder.

The switch on time of the LEDs and their drives is definitely shorter than of the HPS lamps. After some tens of milliseconds the lamps are working with full illumination (almost no warm up time).

The results obtained are partially similar to others made by different authors over LED and HPS lamps, i.e., the decrease in the harmonic value as increase the harmonic order, and also the decrease in the harmonic value at half load (60%) compared with full load (100%). But the pattern isn't the same because it changes at higher harmonic orders.

This study also found that THDI is lower with HPS lamps connected to electronic ballast than to electromagnetic. But the lowest value reached by THDI belongs to LED lamps. Different small LEDs have rather different spectra. The same could occur for big LEDs (street lamps). Thus more measurements are needed. The harmonic current distortion in a single type load is highly dependent on the loading level because is higher at half load (60%) than at full load (100%).

Regarding the high frequency spectrum, two peaks have been observed in LED lamp and sodium lamp connected to electronic ballast. Those peaks are due to the switching frequency of the active power factor correction circuit. This is not the case of sodium lamp but connected to electromagnetic ballast, because there is not any

switching device. In addition to this, a broadband spectrum has been observed in the LED lamps.

Although the technical features of a lighting installation are the first determinant of power efficiency, the ultimate determinant is effective operation management. The operation of lighting installations presents unique features that, besides being geographical spread, make the right management difficult.

8.2 Future work

The work presented in this thesis concerns the power quality measurements, mainly focused on harmonics, of different lamps technologies. Both indoor and outdoor lamps have been measured. There are still a number of questions that needs to be studied.

A further study is needed on measuring the recurrent oscillations observed in LED street lamps. There are model-based methods to estimate the frequency and amplitude of the mentioned recurrent oscillations.

Another aspect which requires a deeper study is the influence of interharmonic due to the connection of lamps. Moreover, more measurements are needed in order to confirm the harmonic forecast according to the number of lamps.

Regarding the harmonic model, some simulations can be added in order to verify the model proposed in the thesis.

The experiment on indoor lights includes different combinations of lamp technologies. Different combinations are also proposed in street lights, by mixing LED with HPS connected to electronic ballasts. Moreover, the experiment should be repeated for other types of electronic ballasts.

9 Bibliografía

- [1] Comisión de las Comunidades Europeas, "Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Abordar el reto de la eficiencia energética mediante las tecnologías de la información y la comunicación," 2008.
- [2] General Electric. (2009, Smart Grid: Standing the test of time. Available: <http://www.narucmeetings.org/Presentations/09%200715%20Bob%20Gilligan%20GE%20Smart%20Grid%20Collaborative.pdf>
- [3] "Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (UNFCCC). Protocolo de Kyoto,1997.," Kyoto, Japón, 1997.
- [4] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, "Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012" (E4). Plan de Acción 2008-2012," 2007, p. 233.
- [5] "RD 1890/2008 (BOE nº 279 de 19/11/2008), de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07," 2008.
- [6] Cátedra BP de Desarrollo Sostenible de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid, "Informe anual Observatorio de energía y desarrollo sostenible en España," 1 ed. Madrid, 2004, p. 361.
- [7] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, "La energía en España 2009," ed. Madrid: Centro de Publicaciones, 2009, p. 329.
- [8] Agencia Andaluza de la Energía (AAE), "Datos energéticos de Andalucía 2009," ed. Andalucía, 2009.
- [9] Agencia Valenciana de la Energía (AVEN), "Balance energético de la Comunidad Valenciana 2007," ed. Valencia: AGE CAM, Agencia Regional de la Energía de Castilla-La Mancha, S.A. , 2007.
- [10] Agencia de Gestión de la Energía de Castilla-La Mancha (AGECAM), "Estadística energética de Castilla La Mancha 2009," ed. Castilla-La Mancha, 2009.
- [11] Agencia Provincial de la Energía de Burgos (AGENBUR), "Estructura y Balance energético de la provincia de Burgos 2006," ed. Burgos, 2006.
- [12] Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) et al, "Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías," ed. Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica, 2008, p. 193 p.
- [13] J. Keirstead, "Towards urban energy system indicators," ed. London: Imperial College London, 2007, p. 62.
- [14] A. Phdungsilp, "Energy analysis for sustainable mega-cities," Licentiate thesis, Department of Energy Technology, KTH Industrial Engineering and Management, Estocolmo, 2006.

- [15] W. T. Tsai and Y. H. Chou, "Overview of environmental impacts, prospects and policies for renewable energy in Taiwan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 9, pp. 119-147, 2005.
- [16] A. de Montmollin and D. Altwegg, "Sustainable Development in Switzerland. Factors for an indicator system," ed. Neuchatel: Swiss Federal Statistical Office (SFSO) 2000, p. 44.
- [17] M. Jovanović, N. Afgan, P. Radovanović, and V. Stevanović, "Sustainable development of the Belgrade energy system," *Energy*, vol. 34, pp. 532-539, 2009.
- [18] N. H. Afgan and M. G. Carvalho, "Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants," *Energy*, vol. 27, pp. 739-755, 2002.
- [19] S. D. Pohekar and M. Ramachandran, "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, pp. 365-381, 2004.
- [20] Agencia Provincial de la Energía de Córdoba, "Estudio Situación Energética de la Provincia," Córdoba 2009.
- [21] A. Gil-de-Castro, A. Moreno Muñoz, M. A. Lopez Rodriguez, and J. J. G. de la Rosa, "Energy supply for sustainable regional development in Cordoba," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on*, 2010, pp. 6-9.
- [22] A. Gil-De-castro, A. Moreno-Munoz, and J. J. G. De La Rosa, "Sustainable development in the province of Cordoba," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, pp. 48-53, 2010.
- [23] A. Gil-de-Castro, A. M. Muñoz, M. A. L. Rodriguez, and J. J. G. de la Rosa, "Sustainable development solved by using multicriteria," in *Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium*, 2010, pp. 1-5.
- [24] A. Moreno-Muñoz, *Power quality : mitigation technologies in a distributed environment*. London: Springer, 2007.
- [25] F. L. Tofoli, S. M. R. Sanhueza, and A. de Oliveira, "On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 971-978, 2006.
- [26] T. Key and L. Jih-Sheng, "Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 890-897, 1998.
- [27] P. Caramia, G. Carpinelli, A. La Vitola, and P. Verde, "On the economic selection of medium voltage cable sizes in nonsinusoidal conditions," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 1-7, 2002.
- [28] Comité Español de Iluminación et al, "Guía de gestión energética en el alumbrado público," ed. Madrid, 2006, p. 272.
- [29] "UNE-EN 61000-3-2:2006/A1:2010 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase).", Abril 2010.
- [30] N. A. M. Ali, S. F. S. Fadzil, and B. L. Mallya, "Improved Illumination Levels and Energy Savings by Uplamping Technology for Office Buildings," in *Computer Science and Information Technology - Spring Conference, 2009. LACSITSC '09. International Association of*, 2009, pp. 598-603.
- [31] P. C. Box, "Freeway Accidents And Illumination," *Highw Res Rec*, pp. 10-20, 1972.
- [32] M. S. Griffith, "Comparison of safety lighting options on urban freeways," *Public Works*, vol. 126, 1995.

- [33] T. D. Baenziger, "Management of public lighting," in *Energy Efficient Lighting, 2002. 5th International Conference on Nice, France, 2002*, pp. 3-8.
- [34] A. Collins, T. Thurrell, R. Pink, and J. Feather, "Dynamic dimming: The future of motorway lighting?," *Lighting Journal (Rugby, England)*, vol. 67, p. 25, 2002.
- [35] H. S. H. Chung, N. M. Ho, S. Y. R. Hui, and W. Z. Mai, "Case study of a highly-reliable dimmable road lighting system with intelligent remote control," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005, pp. 1 pp.-P.10.
- [36] F. Rubinstein, S. Treado, and P. Petter, "Standardizing communication between lighting control devices: a role for IEEE P1451," in *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, 2003, pp. 805-811 vol.2.
- [37] P. Tae-Jin and H. Seung-Ho, "Experimental Case Study of a BACnet-Based Lighting Control System," *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 322-333, 2009.
- [38] Z. Yufang, L. Huadong, and W. Mingguang, "Research of feedback control of lighting system based on DALI," in *Industrial Informatics, 2009. INDIN 2009. 7th IEEE International Conference on*, 2009, pp. 396-401.
- [39] E. Koch and F. Rubinstein, "Evaluation of Alternative Field Buses for Lighting Control Applications," 2005, p. 85.
- [40] "EN 62386-101:2009. Interfaz de iluminación direccional digital. Parte 101: Requisitos generales. Sistema.," Abril 2010.
- [41] F. Domingo-Perez, A. Gil-de-Castro, J. M. Flores-Arias, F. J. Bellido-Outeirino, and A. Moreno-Munoz, "Low-rate wireless personal area networks and DALI protocol applied to street lighting," vol. 121 LNEE, 2011, pp. 465-472.
- [42] F. J. Bellido-Outeirino, J. M. Flores-Arias, F. Domingo-Perez, A. Gil-De-Castro, and A. Moreno-Munoz, "Building lighting automation through the integration of DALI with wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, pp. 47-52, February 2012 2012.
- [43] F. J. Bellido Outeiriño, F. Domingo-Perez, A. D. R. Gil-De-Castro, J. Flores Arias, and A. Moreno-Munoz, "In-building lighting management system with wireless communications," in *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2012, pp. 83-85.
- [44] F. Domingo-Pérez, A. Gil-De-Castro, J. M. Flores-Arias, F. J. Bellido-Outeiriño, and A. Moreno-Muñoz, "Lighting control system based on DALI and wireless sensor networks," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012*, 2012, pp. 1-6.
- [45] Echelon, "Oslo Street Lighting System Slashes Energy Use with LONWORKS Network," 2006.
- [46] Echelon, "City Cuts Energy Use, CO2 Emissions with LONWORKS Technology," 2007.
- [47] "RD 1955/2000 (BOE nº 310 de 27/12/2000), de 1 de diciembre por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica," 2000.
- [48] "UNE EN 50160: 2008. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución," 2008, p. 22.
- [49] M. S. Kandil, S. A. Farghal, and A. Elmitwally, "Refined power quality indices," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 148, pp. 590-596, 2001.

- [50] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco, P. Ribaldone, and C. Vercellino, "The impact of public lighting on voltage distortion in low voltage distribution systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 752-757, 2001.
- [51] S. Rios, R. Castaneda, and D. Veas, "Harmonic distortion and power factor assessment in city street gas discharge lamps," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 1013-1020, 1996.
- [52] B. Acarkan, S. Zorlu, and O. Kilic, "Nonlinear Resistance Modeling using MATLAB and Simulink in Estimation of City Street Lighting Harmonic Activity," in *Computer as a Tool, 2005. EUROCON 2005. The International Conference on*, 2005, pp. 1251-1254.
- [53] S. K. Ronnberg, M. H. J. Bollen, and M. Wahlberg, "Interaction Between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2034-2039, 2011.
- [54] M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Signal processing of power quality disturbances*: IEEE Press, 2006.
- [55] "CEI/TR 61000-2-1:1990. Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 2: Entorno - Sección 1: Descripción del entorno - Entorno electromagnético para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes generales de alimentación," 1990.
- [56] J. C. G. Targarona, *Calidad de potencia para usuarios y empresas eléctricas*, 1ª ed. Buenos Aires, 2005.
- [57] S. K. Ronnberg, M. Wahlberg, and M. H. J. Bollen, "Harmonic emission before and after changing to LED lamps - Field Measurements for an urban area," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 15th International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [58] "UNE-EN 61000-4-7:2004/A1:2010 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.," Febrero 2010.
- [59] "UNE-IEC/TR 61000-3-6:2006 IN Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3, Límites. Sección 6, Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión : publicación básica CEM (IEC/TR 61000-3-6:1996)," Julio 2006.
- [60] "UNE-EN 61000-3-12:2006 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-12: Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada > 16 A y ≤ 75 A por fase.," Marzo 2006.
- [61] G. W. Massey, "Estimation methods for power system harmonic effects on power distribution transformers," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 485-489, 1994.
- [62] T. Weinian and V. I. John, "Nonlinear fluorescent systems: their impact on power quality," in *Electrical and Computer Engineering, 1994. Conference Proceedings. 1994 Canadian Conference on*, 1994, pp. 144-147 vol.1.
- [63] J. Arrillaga, N. R. Watson, and S. Chen, *Power system quality assessment*. Chichester, Eng. ; New York: Wiley, 2000.
- [64] "IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.," 1992.
- [65] G. Nicholson, "Investigation of data reporting techniques & analysis of continuous power quality data in the vector distribution network," M. Eng.

- thesis, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering - Faculty of Informatics, University of Wollongong, Wollongong, 2006.
- [66] "UNE-EN 61000-2-2:2003 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.," Julio 2003.
- [67] "CEI 61000-3-4:1998 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-4: Límites. Limitación de las emisiones de corrientes armónicas en las redes de baja tensión para equipos con corriente asignada superior a 16 A.," 1998.
- [68] M. H. Rashid, *Power electronics handbook*. San Diego: Academic Press, 2001.
- [69] H. S. H. Chung, H. Ngai-Man, Y. Wei, T. Pok Wai, and S. Y. Hui, "Comparison of Dimmable Electromagnetic and Electronic Ballast Systems - An Assessment on Energy Efficiency and Lifetime," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 3145-3154, 2007.
- [70] E. R. Manzano, M. Carlorosi, and M. Tapia Garzón, "Performance and measurement of power quality due to harmonics from street lighting networks," in *Renewable Energies and Power Quality, 2009. ICREPQ 2009. International Conference on 2009*.
- [71] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, and M. J. Samotyj, "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 467-473, 1995.
- [72] A. Mansoor, W. M. Grady, P. T. Staats, R. S. Thallam, M. T. Doyle, and 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, pp. 2001-2006, 1995.
- [73] A. Gil-de-Castro, A. Moreno-Munoz, J. J. G. de la Rosa, J. M. F. Arias, and V. Pallares-Lopez, "Study of harmonic generated by electromagnetic and electronic ballast used in street lighting," in *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 425-430.
- [74] CISPR 15: límites y métodos de medida de las características relativas a la perturbación radioeléctrica de los equipos de iluminación y similares, 2002.
- [75] "UNE-EN 60929:2011. Balastos electrónicos alimentados en corriente alterna y/o corriente continua para lámparas fluorescentes tubulares. Requisitos de funcionamiento," Noviembre 2011.
- [76] OSRAM. Available: <http://www.osram.com>
- [77] Philips Lighting. Available: <http://www.lighting.philips.com>
- [78] S. Rönnberg, M. Bollen, and A. Larsson, "A simple model for interaction between equipment at a frequency of come tens to kHz," in *Electricity Distribution - Part 1, 2011. CIRED 2011. 21st International Conference and Exhibition on*, 2011, pp. 1-4.
- [79] Navigant Consulting Inv., "Energy Savings Estimates of Light Emitting Diodes in Niche Lighting Applications," ed. U.S. Department of Energy, 2011, p. 88.
- [80] U.S. Department of Energy. *Solid State Lighting*. Available: <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/index.html>
- [81] P. E. Mary Matteson Bryan, "LED Street Lighting. Host Site: City of San Francisco, California," San Francisco December, 2008.

- [82] E. Kovacs and A. S. Varadine, "Investigation of LED street lighting's disturbances," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, 2010, pp. 1808-1811.
- [83] R. Lenk and C. Lenk, *Practical Lighting Design with LEDs*: John Wiley & Sons, 2011.
- [84] X. Luo, T. Cheng, W. Xiong, Z. Gan, and S. Liu, "Thermal analysis of an 80 W light-emitting diode street lamp," *Optoelectronics, IET*, vol. 1, pp. 191-196, 2007.
- [85] E. O. A. Larsson, M. H. J. Bollen, M. G. Wahlberg, C. M. Lundmark, and S. K. Rönnerberg, "Measurements of High-Frequency (2-150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1749-1757, 2010.
- [86] A. Larsson, "On high-frequency distortion in low-voltage power systems," PhD, Luleå University of Technology, 2011.
- [87] C. Unger, K. Kruger, M. Sonnenschein, and R. Zurowski, "Disturbances due to voltage distortion in the kHz range - Experiences and mitigation measures," in *Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on*, 2005, pp. 1-4.
- [88] S. Rönnerberg and M. Bollen, "Emission from Four Types of LED Lamps at frequencies up to 150 kHz," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 15th International Conference on*, 2012.
- [89] S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, and M. H. J. Bollen, "Harmonic emission before and after changing to LED and CFL - Part II: Field measurements for a hotel," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*, 2010, pp. 1-6.

Anexo

LED Street lighting: A power quality comparison among Street light technologies

The paper presented in this appendix is published in *Lighting Research and Technology* (doi: 10.1177/1477153512450866)

Harmonics from a Domestic Customer with Different Lamps Technologies.

The paper presented in this Appendix is published in the 15th *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Hong Kong 17-20 June 2012.

Comparative study of electromagnetic ballasts – an assessment on harmonic emission.

The paper presented in this appendix is published in PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)

Study of harmonic generated by electromagnetic and electronic ballast used in Street Lighting.

The paper presented in this appendix is published in 20th *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Gdansk; 27-30 June 2011 (DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984196)

Harmonic Effect in Street Lighting.

The paper presented in this appendix is published in *7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, CPE 2011, 1-3 June 2011* (DOI:10.1109/CPE.2011.5942200)