



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Flujo de cargas en redes eléctricas de distribución
con cargas no-lineales**

Autor: Íñigo Solís Hevia

Tutor: Carlos Hiram Rojas García

Oviedo, julio de 2021



Agradecimientos

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mi profesor y tutor en este trabajo D. Carlos Hiram Rojas García por la gran ayuda y constante dedicación prestadas durante su desarrollo, sin las cuales no hubiese sido posible.

Me gustaría agradecer también a mis compañeros y nuevas amistades del Máster por su apoyo a lo largo de este camino, en especial a mis amigos de “La Élite”.

Finalmente, a mis familiares, sobre todo a mis padres, ya que sin su ayuda y empeño a lo largo de todos estos años no hubiese llegado hasta aquí.



Índice

1.	Introducción	8
1.	Objetivos	9
2.	Distorsión armónica.....	10
3.	Distorsión armónica en los sistemas eléctricos	15
3.1.	Problemas asociados a la distorsión armónica	15
3.2.	Estudio de la distorsión armónica.....	19
3.3.	Tipos de cargas no lineales de uso frecuente	24
3.4.	Medidas para el control de los armónicos	28
3.5.	Normativa para la distorsión armónica.....	30
4.	Calidad de la energía.....	42
4.1.	Compatibilidad electromagnética.....	42
4.2.	Normativa asociada.....	45
5.	Estudio del flujo de cargas	47
5.1.	Flujo de cargas convencional	47
5.2.	Flujo de cargas armónico.....	52
6.	Simulación y análisis del funcionamiento de la red de distribución.....	56
6.1.	Introducción al software OpenDSS.....	56
6.2.	Modelado de la red con el software OpenDSS.....	56
6.3.	Resultados de la simulación	64
6.3.1.	Caída de tensión.....	64
6.3.2.	Perfil de las cargas PHEV	71
6.3.3.	Distorsión Armónica	78
6.3.4.	Pérdidas de potencia	84
6.3.5.	Factor de potencia.....	87
6.3.6.	Intensidad de corriente por el conductor neutro	88
7.	Conclusiones.....	91
8.	Referencias	93



Índice de Tablas

Tabla 1. Características de las componentes armónicas	11
Tabla 2. Problemas asociados a la distorsión armónica	18
Tabla 3. Límites de distorsión armónica de tensión según la norma IEEE Std 519-2014	31
Tabla 4. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV según la norma IEEE Std 519 - 2014.....	31
Tabla 5. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de 69 kV a 161 kV según la norma IEEE Std 519 – 2014.....	32
Tabla 6. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de más de 161 kV según la norma IEEE Std 519 - 2014.....	32
Tabla 7. Límites de distorsión armónica de tensión en redes de distribución de baja y media tensión según la norma UNE-EN 50160.....	33
Tabla 8. Límites de distorsión armónica de tensión en redes industriales de baja tensión según la norma UNE-EN IEC 61000-2-4.....	34
Tabla 9. Primer límite de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente superior a 16 A según la norma IEC 61000-3-4.	35
Tabla 10. Segundo límite de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente superior a 16 A según la norma IEC 61000-3-4.....	36
Tabla 11. Límite de emisión de corriente para equipos que no sean trifásicos equilibrados según la norma UNE-EN 61000-3-12.....	37
Tabla 12. Límite de emisión de corriente para equipos trifásicos equilibrados según la norma UNE-EN 61000-3-12.....	37
Tabla 13. Límite de emisión de corriente para equipos trifásicos equilibrados en condiciones especificadas (a, b, c) según la norma UNE-EN 61000-3-12	38
Tabla 14. Límite de emisión de corriente para equipos trifásicos equilibrados en condiciones especificadas (d, e, f) según la norma UNE-EN 61000-3-12	39
Tabla 15. Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A según la norma UNE-EN IEC 61000-3-2	40
Tabla 16. Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C según la norma UNE-EN IEC 61000-3-2	41
Tabla 17. Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C según la norma UNE-EN IEC 61000-3-2	41
Tabla 18. Normativa sobre Compatibilidad Electromagnética CEM	46
Tabla 19. Datos e incógnitas en función del tipo de barra.....	48
Tabla 20. Niveles de carga considerados del vehículo eléctrico Nissan LEAF.....	60
Tabla 21. Espectro armónico del cargador de un vehículo eléctrico Nissan LEAF [47].....	60
Tabla 22. Valor eficaz de tensión en cada barra considerada por fase.....	68
Tabla 23. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica sin cargas PHEV conectadas	69
Tabla 24. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica con las cargas PHEV conectadas en el primer nivel de carga	69



Tabla 25. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica con las cargas PHEV conectadas en el segundo nivel de carga	70
Tabla 26. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica con las cargas PHEV conectadas en el tercer nivel de carga	70
Tabla 27. Tasa armónica de distorsión global en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga	79
Tabla 28. Tasa armónica de distorsión individual en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga	79
Tabla 29. Tasa armónica de distorsión global en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga	80
Tabla 30. Tasa armónica de distorsión individual en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga	81
Tabla 31. Tasa armónica de distorsión global en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga.....	82
Tabla 32. Tasa armónica de distorsión individual en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga	82
Tabla 33. Pérdidas de potencia para los distintos estados de carga del sistema.....	84
Tabla 34. Potencia reactiva para los distintos estados de carga del sistema	87
Tabla 35. Factor de potencia sin cargas PHEV conectadas a la red.....	88
Tabla 36. Factor de potencia con cargas PHEV conectadas a la red en sus distintos niveles de carga.....	88
Tabla 37. Intensidad de corriente que retornan por el neutro en las cargas PHEV en su tercer nivel de carga	90

Índice de Figuras

Fig. 1. Onda senoidal y onda distorsionada.....	10
Fig. 2. Secuencia de rotación de las fases. De izquierda a derecha: secuencia directa, inversa y homopolar.....	11
Fig. 3. Onda con contenido armónico [3].....	13
Fig. 4. Espectro de frecuencias de la onda de la Fig. 3 [3].....	13
Fig. 5. Secuencia de ondas senoidales de fase de un sistema trifásico equilibrado.....	15
Fig. 6. Circulación de corrientes de tercer orden por el neutro de la red trifásica [6]	16
Fig. 7. Esquema de un convertidor de frecuencia alimentando a un motor eléctrico [20]	24
Fig. 8. Esquema de un convertidor de frecuencia alimentando a un motor eléctrico [22]	25
Fig. 9. Forma de onda típica de una lámpara fluorescente con balasto magnético [14]	26
Fig. 10. Forma de onda típica de una lámpara fluorescente con balasto electrónico [14]	26
Fig. 11. Niveles de perturbación soportados por un dispositivo [3].....	45



Fig. 12. Circuito equivalente de Norton para una carga no lineal.....	53
Fig. 13. Perfil horario de potencia de una carga lineal del modelo utilizado en la simulación.....	58
Fig. 14. Diagrama unifilar de la red eléctrica utilizada en la simulación	59
Fig. 15. Demanda horaria de potencia de la red eléctrica utilizada en la simulación....	61
Fig. 16. Diagrama unifilar de la red eléctrica utilizada en la simulación resaltando las cargas PHEV no lineales.....	62
Fig. 17. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea sin cargas PHEV.....	65
Fig. 18. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea conectando cargas PHEV en su primer nivel de carga.....	66
Fig. 19. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea conectando cargas PHEV en su segundo nivel de carga	66
Fig. 20. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea conectando cargas PHEV en su tercer nivel de carga	67
Fig. 21. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga.	71
Fig. 22. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga ..	72
Fig. 23. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga.....	72
Fig. 24. Descomposición de la onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga	72
Fig. 25. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV7 en su segundo nivel de carga	73
Fig. 26. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su segundo nivel de carga	73
Fig. 27. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV7 en su segundo nivel de carga.	74
Fig. 28. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV1 en su tercer nivel de carga ..	74
Fig. 29. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV7 en su tercer nivel de carga ..	75
Fig. 30. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV14 en su tercer nivel de carga	75
Fig. 31. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV1 en su tercer nivel de carga ...	75
Fig. 32. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su tercer nivel de carga ...	76
Fig. 33. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV14 en su tercer nivel de carga .	76
Fig. 34. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV1 en su tercer nivel de carga.....	76
Fig. 35. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV7 en su tercer nivel de carga.....	77
Fig. 36. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV14 en su tercer nivel de carga....	77
Fig. 37. Espectro armónico en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga	78
Fig. 38. Onda de corriente en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga	79
Fig. 39. Onda de tensión en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga	80
Fig. 40. Espectro armónico en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga	80
Fig. 41. Onda de corriente en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga	81
Fig. 42. Onda de tensión en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga	81
Fig. 43. Espectro armónico en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga	82



Fig. 44. Onda de corriente en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga	83
Fig. 45. Onda de tensión en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga	83
Fig. 46. Potencia activa consumida por las cargas en los distintos estados de carga del sistema	86
Fig. 47. Intensidades de corriente a la salida del transformador sin cargas PHEV conectadas ..	89



1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia, la red que supe de energía a un amplio número de cargas, residenciales comerciales e industriales, fue diseñada y operada hasta hace poco tiempo como una red lineal con cargas lineales. La linealidad consiste en el consumo de corrientes eléctricas senoidales por parte de cargas que son alimentadas a tensión también senoidal.

Esta característica ha cambiado fundamentalmente debido al uso, cada vez más extendido, de la electrónica de potencia (equipos alimentados y/o regulados mediante dispositivos electrónicos). La proliferación de cargas no lineales en la red eléctrica es un hecho constatado. Hace años, este tipo de cargas se encontraba fundamentalmente en aplicaciones industriales muy específicas. Hoy en día, las cargas no lineales, no solo siguen estando presentes en la industria, sino que se pueden encontrar prácticamente en cualquier hogar, en todos los equipos electrónicos conectados a la red.

En los sistemas eléctricos la corriente se distribuye en forma de onda senoidal periódica, pero las cargas no lineales no consumen corriente eléctrica senoidal pura, y además su demanda no es continua en el tiempo. Esto hace que se generen distorsiones de la onda fundamental que alimenta al sistema, tras adaptarse a la demanda de éstas. Esta nueva onda está compuesta por la onda fundamental, de 50 Hz en España, y por una serie de ondas llamadas armónicos, múltiplos de la primera.

Todo esto ha supuesto graves problemas en los últimos años debido a las consecuencias que este tipo de cargas provocan en la red eléctrica, y, aunque hoy en día existen muchas soluciones que casi eliminan el problema por completo, la búsqueda de nuevas soluciones para mitigar los efectos producidos por la generación de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia es un tema de elevado interés.

En el marco de este proyecto se pretende hacer una aproximación al estudio de los flujos de carga en la red eléctrica, incluyendo cargas no lineales.

La red objeto de estudio, es una propuesta por el Electrical Power Research Institute (EPRI) con topología coincidente con las redes de distribución de uso en Europa. Respondiendo a la máxima actualidad, como carga no lineal se modelarán diferentes modos de cargadores de batería de vehículos eléctricos (PHEV).



1. Objetivos

Como objetivo general, se plantea una aproximación al problema de la distorsión armónica en las redes eléctricas de distribución: sus causas, problemas asociados y métodos de análisis.

El proyecto no se centra en las cargas sino en el funcionamiento del sistema. Por lo que se pretende analizar la red tanto en condiciones de linealidad como en presencia de distorsión armónica.

Como objetivos particulares se proponen los siguientes:

- Comprender el fenómeno de la distorsión armónica, sus causas y problemas técnicos asociados.
- Entender la metodología de la *Transformada de Fourier* como herramienta de análisis de las ondas eléctricas distorsionadas.
- Analizar las características de los armónicos de la corriente y tensión eléctrica y su influencia sobre el funcionamiento de la red según su orden, frecuencia, secuencia.
- Identificar las cargas *no lineales* causantes de la perturbación de la red, en particular, los cargadores de baterías de coches eléctricos.
- Estudiar la normativa técnica asociada, los índices de evaluación de la distorsión armónica y la normativa técnica asociada a la compatibilidad electromagnética.
- Construir y poner en marcha un modelo de una red de distribución utilizando el programa OpenDSS.
- Simular el funcionamiento de la red de distribución con cargas lineales en una serie temporal.
- Simular el funcionamiento de la red de distribución con cargas no lineales y analizar su efecto, en comparación con la misma red funcionando sin contaminación armónica.

2. Distorsión armónica

Se conoce por *distorsión armónica* al grado de deformación de la onda sinusoidal de corriente o de tensión de un sistema respecto de la senoide pura (Fig. 1). En la mayoría de los casos, la distorsión armónica tiene su origen en la onda de corriente, y como consecuencia de ello, se producen deformaciones en la onda de tensión del sistema debido a las caídas de tensión. Esta distorsión es producida tras el paso de la onda limpia por los diferentes tipos de cargas no lineales del sistema, las cuales demandan una corriente distorsionada o no senoidal debido a la variación de su impedancia en función de la tensión aplicada [1].

Algunos ejemplos comunes de este tipo de cargas son las lámparas fluorescentes, las fuentes de alimentación conmutada, los convertidores electrónicos de potencia, las máquinas eléctricas rotativas, los hornos de arco eléctrico, los variadores de velocidad, los sistemas de carga de baterías o los hornos de inducción. Algunos de ellos se explicarán más en detalle en apartados posteriores.

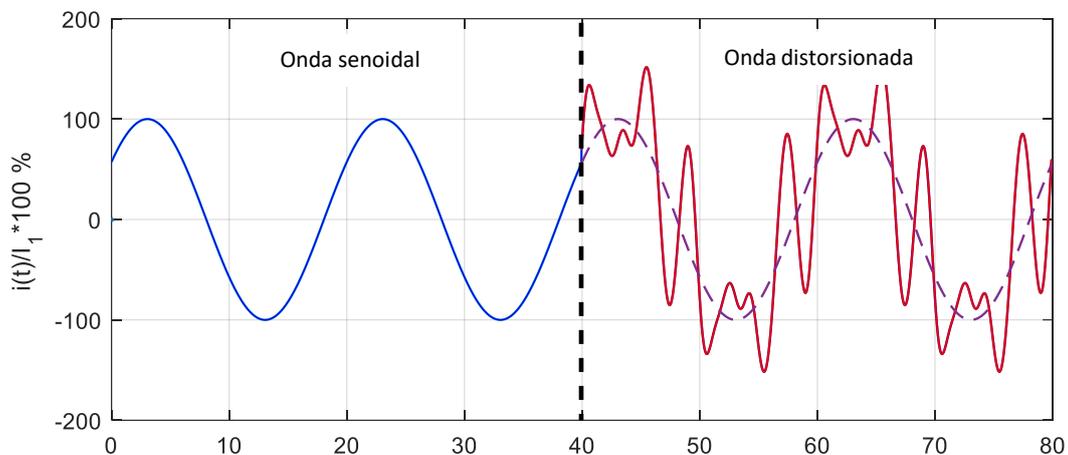


Fig. 1. Onda senoidal y onda distorsionada

ARMÓNICOS

Se denominan armónicos de una onda de corriente o tensión, a los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la onda [2]. El armónico fundamental de un sistema es el de mayor amplitud y corresponde a la frecuencia industrial de 50 Hz en España y en el resto de Europa. En Estados Unidos, por ejemplo, la frecuencia de la onda fundamental es de 60 Hz. El resto de armónicos serán por tanto ondas con valores múltiplos de los



50Hz de la fundamental, y su amplitud será menor cuanto mayor sea el grado del armónico. El rango u orden de los armónicos se corresponde con la relación existente entre su frecuencia (f_n) y la frecuencia fundamental (f_1), esto es:

$$k = \frac{f_n}{f_1} \quad (1)$$

En la siguiente tabla se resume la progresión de frecuencias de los sucesivos armónicos para una onda fundamental de 50Hz, así como su secuencia, la cual puede ser directa, inversa u homopolar.

Tabla 1. Características de las componentes armónicas

Orden	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	N
Frecuencia (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	N·50
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	...

En el caso de los armónicos con secuencia directa o positiva, estos tienen la misma dirección que el fundamental. Los armónicos con secuencia inversa o negativa tienen la dirección opuesta a la fundamental. Finalmente, la dirección de los armónicos homopolares o de secuencia cero no depende de la fundamental, estando las tres componentes en fase.

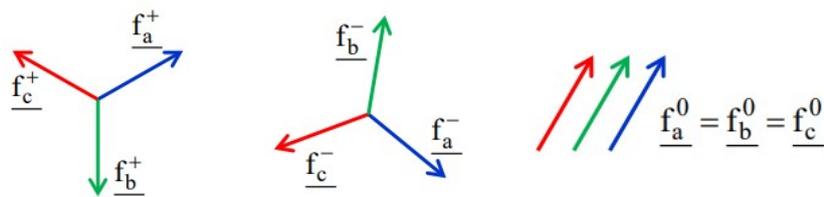


Fig. 2. Secuencia de rotación de las fases. De izquierda a derecha: secuencia directa, inversa y homopolar

La fórmula que define la forma de una onda senoidal cualquiera de corriente o de tensión viene dada por:

$$f(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (2)$$

Donde:



- $A \rightarrow$ Amplitud de la onda
- $\omega \rightarrow$ Pulsación o velocidad angular
- $\theta \rightarrow$ Ángulo inicial de fase
- $V_{ef} \rightarrow$ Valor eficaz de corriente o tensión

Para estudiar cómo resultaría la secuencia de fases en un sistema trifásico equilibrado, es posible particularizar la ecuación anterior para cada una de sus fases como sigue. Suponiendo una secuencia de fases directa (r s t), y tomando la fase r como referencia:

$$f_r(t) = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (3)$$

Al tratarse de un sistema equilibrado, se cumple que las ondas de tensión y corriente están desfasadas entre sí $2\pi/3$, luego:

$$f_s(t) = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) \quad (4)$$

$$f_t(t) = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta\right) \quad (5)$$

Evaluando el comportamiento de cada onda armónica individualmente, es posible obtener su secuencia de fases, tal y como se incluyó en la [Tabla 1](#). Habrá que tener en cuenta que:

$$\omega = \omega_k = k \cdot \omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_k \quad (6)$$

Cuando en la onda del sistema hay presencia de armónicos, es posible, mediante la Transformada de Fourier, desarrollada a fondo más adelante, aproximar la onda distorsionada a una onda formada por la suma de la fundamental y las distintas ondas armónicas presentes en ella.

A continuación, se representa gráficamente, a modo de ejemplo, una onda periódica de 50Hz en el dominio del tiempo con la presencia del armónico de orden 3, de secuencia homopolar, y su descomposición en el espectro de frecuencias.

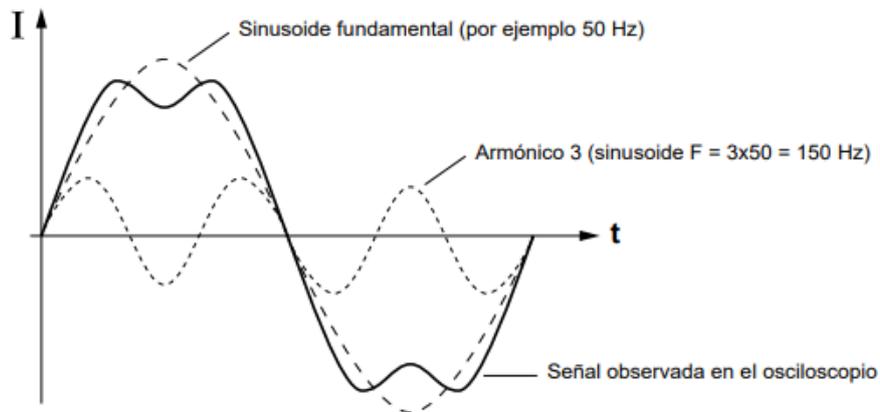


Fig. 3. Onda con contenido armónico [3]

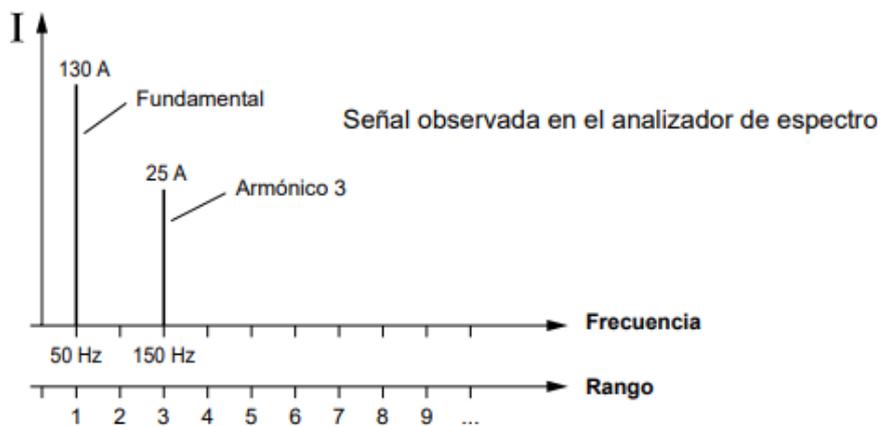


Fig. 4. Espectro de frecuencias de la onda de la Fig. 3 [3]

En la práctica, en los sistemas eléctricos de alterna no existen armónicos pares debido a la integración en un período completo de la componente fundamental; solo aparecen cuando en la forma de onda no hay simetría [4]. Estos solo se tendrán en cuenta en sistemas de corriente continua.

Cabe mencionar también la presencia de interarmónicos y subarmónicos en la red. Si los armónicos se han definido como múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema, los interarmónicos pueden definirse como ondas de tensión senoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, no siendo múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Los subarmónicos, por otro lado, son aquellos cuya



frecuencia es menor que la frecuencia fundamental. El tratamiento de estas componentes está fuera del alcance de este proyecto.



3. Distorsión armónica en los sistemas eléctricos

En este capítulo se aborda, de forma generalizada, la problemática de los armónicos en el sistema eléctrico, se analizarán algunas de las cargas no lineales más frecuentes conectadas a éste, se explican algunos de los procedimientos y parámetros tipo para el estudio de una onda distorsionada, y, por último, se comentan algunas de las medidas preventivas más comunes para su mitigación.

3.1. Problemas asociados a la distorsión armónica

La gran mayoría de los equipos conectados a la red eléctrica trabajan con tensiones senoidales, por lo que la presencia de armónicos que distorsionan la onda fundamental que se les suministra puede causar problemas en su funcionamiento.

Un sistema trifásico equilibrado es aquel en el que las corrientes que circulan por cada fase toman el mismo valor y sus fasores están desfasados simétricamente 120° . En un sistema equilibrado la corriente que pasa por el neutro es nula, ya que se anulan las componentes de corriente de las tres fases al estar desfasadas entre sí en cada instante de tiempo.

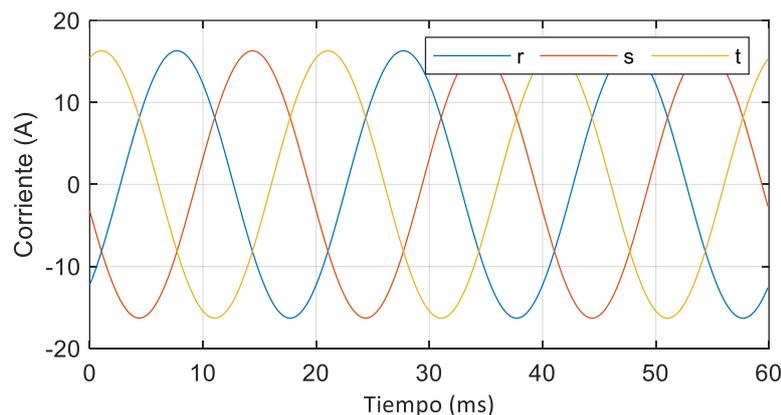


Fig. 5. Secuencia de ondas senoidales de fase de un sistema trifásico equilibrado

Por el contrario, en un sistema no equilibrado, los valores de ambas magnitudes no coinciden, invalidando las relaciones entre las variables trifásicas del sistema e induciendo dos tipos de corrientes por el conductor neutro.



- Corrientes o tensiones de desequilibrio: Se producen cuando en las tres fases de un sistema trifásico no circula el mismo módulo y cuando la separación angular entre sus fasores no es igual, es decir, es distinta de 120° . Una de las causas más comunes de este tipo de desequilibrio es la presencia de cargas monofásicas en el sistema [5].
- Corrientes armónicas: Este tipo de corrientes aparecen cuando en el sistema hay cargas no lineales y estas generan armónicos de tercer orden y múltiplos de tres. Al presentar secuencia homopolar, este grupo de armónicos se generan en cada una de las tres fases por igual, sin desfase entre ellas, lo que hace que se sumen y retornen por el conductor neutro.

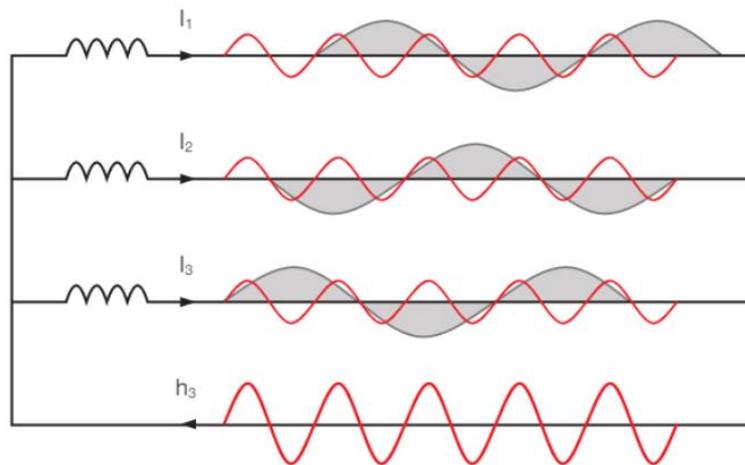


Fig. 6. Circulación de corrientes de tercer orden por el neutro de la red trifásica [6]

Cuando las cargas en un sistema trifásico son lineales y equilibradas, se cumple que [7]:

$$I_{neutro} = I_r + I_s + I_t = 0 \quad (7)$$

Sin embargo, cuando hay presencia de cargas no lineales que generan armónicos de tercer orden y múltiplos de tres impares, estos retornan por el conductor neutro con el triple de intensidad de corriente (Fig. 6). Esto se verifica particularizando la ecuación de intensidad de corriente para este conjunto de armónicos. Analizando únicamente el



aporte del tercer armónico y teniendo en cuenta que el ángulo de fase es nulo, por ser este de secuencia homopolar:

$$I_{neutro} = I_r + I_s + I_t = 3 \cdot I_3 \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega_1 \cdot t) \quad (8)$$

En sistemas trifásicos de tres hilos, en los que no hay conductor neutro, no es posible que aparezcan corrientes con secuencia homopolar, de modo que no se generan armónicos de tercer orden y múltiplos de tres [8]. Estos tampoco aparecen por tanto en cargas trifásicas conectadas en triángulo [6].

Como se comentó anteriormente, las ondas distorsionadas por la presencia de este tipo de armónicos viajan de nuevo a la fuente de alimentación del sistema, causando modificaciones en el valor eficaz y valor pico de las ondas fundamentales que alimentan al sistema de nuevo. Esto causa numerosos problemas en la red eléctrica y en los equipos conectados a ella. Entre los problemas más frecuentes cabe destacar: corrientes excesivas en el neutro, calentamiento de los distintos equipos conectados a la red, interrupciones de corriente por la fusión de fusibles, desequilibrios en las cargas conectadas a la red, problemas en motores, etc.

Los armónicos de secuencia inversa o negativa como el de orden 5 o el de orden 11 tienden a crear campos giratorios en las máquinas que son contrarios al sentido de giro, determinado por la onda fundamental (de secuencia directa). Esto es equivalente a sumar un par resistente al propio de la carga, por lo que aparecerá un efecto de freno que hará que aumente el consumo de energía por parte de la máquina.

Por otro lado, los armónicos de secuencia directa o positiva como el de orden 7 o el de orden 13 crean campos giratorios en el mismo sentido de giro de las máquinas, por lo que aparecerá un efecto de aceleración que conlleva un aumento de pérdidas.

En general, todos los armónicos aumentan las pérdidas del sistema y lo hacen más reactivo, provocando que haya una mayor caída de tensión y de corriente. También provocan un aumento de las pérdidas en los núcleos ya que estas dependen directamente de la frecuencia. Además, a partir de los 300 Hz los efectos provocados son audibles.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, en la práctica no existen armónicos pares en los sistemas eléctricos.



En la siguiente tabla se resumen varios de los posibles problemas ocasionados por los armónicos en función del tipo de elemento de la red eléctrica afectado, así como sus consecuencias: [9], [10], [11], [12]

Tabla 2. Problemas asociados a la distorsión armónica

Elemento	Problemas	Consecuencias
Conductor	Sobreintensidad.	Sobrecalentamiento de cables (Efecto Joule). Disparo de dispositivos de protección. Degradación prematura.
Conductor neutro	Circulación de los armónicos múltiples de tres. Sobreintensidad.	Sobrecalentamiento del conductor. Disparo de dispositivos de protección. Degradación prematura. Aumento de pérdidas. Reducción del factor de potencia.
Bobina	Aumento de la impedancia al aumentar la frecuencia. ($X_L = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$)	Mayores caídas de tensión. Mayor consumo de corriente eléctrica. Disminución en el rendimiento del sistema.
Condensador	Disminución de la impedancia al aumentar la frecuencia. ($X_C = -\frac{j}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$) Resonancia en paralelo con el sistema. Sumidero de armónicos.	Sobrecalentamiento de condensadores. Aumento de la tensión dieléctrica. Degradación prematura.
Transformador	Aumento de pérdidas en el cobre. Aumento de pérdidas en el hierro.	Aumento de pérdidas magnéticas. Sobrecalentamiento en los devanados. Pérdida de aislamiento térmico. Saturación magnética. Disminución en el rendimiento. Desclasificación.
Motor	Aumento de pérdidas en el cobre. Aumento de pérdidas en el hierro.	Aumento de pérdidas magnéticas. Sobrecalentamiento en los devanados. Pérdida de aislamiento térmico. Disminución en el rendimiento. Reducción del par. Vibraciones y oscilaciones.
Medidor	Onda distorsionada.	Medidas erróneas.



Todos estos efectos pueden presentar un amplio rango de características dependiendo del diseño previo de los sistemas eléctricos de potencia, del control que se realice sobre estos, y de las medidas que se tomen, entre otras cosas.

3.2. Estudio de la distorsión armónica.

Para estudiar la distorsión de una onda con presencia de armónicos es posible aproximarla a otra formada por la superposición de la onda fundamental del sistema y por los diferentes armónicos presentes en ella, múltiplos de la frecuencia fundamental mediante su desarrollo en serie de Fourier [13]. Esto solo será válido para ondas periódicas. Las ondas no periódicas, que afortunadamente son las menos frecuentes, se estudian con métodos estadísticos por lo que no se pueden descomponer.

La función Transformada de Fourier para el análisis de una onda periódica no senoidal viene dada por: [14]

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} ak \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t) + bk \cdot \text{sen}(k \cdot \omega_1 \cdot t) \quad (9)$$

Donde el término, que equivale a la onda fundamental, viene dado por:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (10)$$

El término que equivale a los armónicos pares viene dado por:

$$ak = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t) dt \quad (11)$$

Y, el término que equivale a los armónicos impares por:

$$bk = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \text{sen}(k \cdot \omega_1 \cdot t) dt \quad (12)$$



Cuando $k = 1$, se hace referencia a la onda fundamental y, cuando $k > 1$, se hace referencia al resto de armónicos. Según la normativa, será necesario como mucho realizar los cálculos hasta el armónico de orden 50 [8], aunque normalmente el límite de cálculo es bastante inferior.

La Transformada de Fourier se puede expresar de una forma más simplificada, en función del seno, como:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \text{sen}(k \cdot \omega_1 \cdot t + \theta_k) \quad (13)$$

Las frecuencias que se buscan a la hora de analizar una señal tienen valores específicos, ya que solo interesan valores enteros, en concreto aquellos que sean múltiplos de la onda fundamental, de modo que el análisis se realiza mediante la Transformada de Fourier Discreta, y en su forma compleja.

En primer lugar, la ecuación de análisis es:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-\frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n}{N}} \quad (14)$$

Donde:

- $X(k)$ → Vector de números complejos
- $x(n)$ → Vector de números reales
- k → Frecuencia del armónico
- N → Número de muestras

Esta forma de la transformada de Fourier permite pasar del dominio del tiempo en una onda cualquiera al dominio de la frecuencia [15].

Despejando en la ecuación anterior, se obtiene la Transformada Inversa de Fourier, para la síntesis:

$$x(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{\frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n}{N}} \quad (15)$$



La ecuación de síntesis permite el camino inverso, es decir, pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo [15].

En la práctica, la implementación de la transformada de Fourier para el tratamiento de ondas se efectúa mediante el algoritmo conocido como FFT (Fast Fourier Transform). Dicho algoritmo viene implementado en la mayoría de los equipos de medida y softwares informáticos.

En una onda distorsionada en régimen permanente, se cumple que la energía disipada debido al efecto Joule, es la suma de todas las componentes armónicas, esto es:

$$Q = R \cdot I^2 = R \cdot \sum_{k=1}^n I_k^2 \quad (16)$$

Se puede deducir de la expresión anterior que el cuadrado de la suma de la intensidad total es equivalente a la suma del cuadrado de cada intensidad armónica.

$$I_{eff}^2 = \sum_{k=1}^n I_k^2 \quad (17)$$

De igual forma se cumple que:

$$U_{eff}^2 = \sum_{k=1}^n U_k^2 \quad (18)$$

A la hora de estudiar el nivel de distorsión armónica aparecen dos conceptos: la tasa de distorsión armónica individual y la tasa de distorsión armónica global de la onda [2]. Ambas expresiones se aplican para estimar tanto el nivel de distorsión de la intensidad de corriente como el de la tensión de la onda.

En primer lugar, con la tasa de distorsión armónica individual se establece la relación entre el valor eficaz de la amplitud del armónico de rango n y el valor de la fundamental.

$$d_H (\%) = \frac{h_n}{h_1} \cdot 100 \quad (19)$$



Donde:

- h_n : Valor de intensidad o de tensión del armónico.
- h_1 : Valor de intensidad o de tensión de la onda fundamental.

Por otro lado, la tasa de distorsión armónica global (THD) se calcula como el cociente del valor eficaz de los armónicos presentes en la onda y el valor de la fundamental.

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n h_k^2}}{h_1} \cdot 100 \quad (20)$$

Donde:

- h_k : Valor de intensidad o de tensión del armónico de orden N.
- h_1 : Valor de intensidad o de tensión de la onda fundamental.

Generalmente, para calcular la distorsión de la intensidad de corriente se utiliza la denominada Distorsión de Demanda Total (TDD), siendo esta el cociente entre el valor eficaz de los armónicos y la intensidad de corriente correspondiente a la capacidad máxima de carga del sistema [16].

$$TDD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n h_k^2}}{I_L} \cdot 100 \quad (21)$$

Donde:

- I_L : Intensidad de corriente para la capacidad de carga máxima.

Como se mencionó anteriormente, la presencia de armónicos produce una reducción del factor de potencia provocado por la distorsión. El factor de potencia se define como el cociente entre la potencia activa que absorbe una carga y la potencia aparente suministrada. Esto significa, que cuanto mayor sea el factor de potencia en una instalación, una mayor parte de la energía consumida se transformará en energía útil. Por el contrario, cuanto menor sea su valor, peor resultará esta conversión.



El factor de potencia viene dado como:

$$f_{dp} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} \cdot I_{eff}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (22)$$

Cuando hay presencia de armónicos, es importante definir el factor de potencia verdadero o total (True Power Factor) como la relación entre la potencia activa y reactiva en la toma de corriente [17]. Este viene dado por el producto del factor de potencia de desplazamiento y el factor de potencia de distorsión.

Se puede definir el factor de potencia de desplazamiento como la relación entre la potencia activa fundamental que absorbe una carga lineal alimentada por un generador de tensión senoidal y la potencia aparente fundamental [18].

$$FP_{Desplazamiento} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \quad (23)$$

Por otro lado, se habla de factor de potencia de distorsión cuando en el sistema hay equipos con cargas no lineales, y se define como la relación entre la intensidad de corriente para la frecuencia fundamental y su valor real.

$$FP_{Distorsión} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (24)$$

Finalmente, el FPV se define como:

$$FPV = \frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (25)$$

También se ha hecho hincapié en que las pérdidas de potencia se ven aumentadas notablemente con la presencia de armónicos en la red. Las pérdidas de potencia en una línea vienen dadas por:

$$P_p = R \cdot I^2 \quad (26)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (17) y la ecuación (20), las pérdidas de potencia cuando hay presencia de armónicos se pueden calcular como:

$$Pp = R \cdot \sum_{k=1}^n I_k^2 = R \cdot \left(I_1^2 + \sum_{k=2}^n I_k^2 \right) = R \cdot I_1^2 \cdot (1 + THD_f^2) \quad (27)$$

Las pérdidas de potencia de una línea trifásica se calculan como la suma de las pérdidas en cada una de las fases y las pérdidas en el conductor neutro.

$$Pp = 3 \cdot R_f \cdot I_f^2 + R_N \cdot I_N^2 \quad (28)$$

3.3. Tipos de cargas no lineales de uso frecuente

A continuación, se describen algunos de los equipos con cargas no lineales más frecuentes y sus efectos sobre la red eléctrica.

Variadores de velocidad o frecuencia:

Los variadores de frecuencia son un tipo de fuente de alimentación conmutada, que transforman la corriente alterna de la red en corriente alterna adaptada a las necesidades del sistema. Son cargas trifásicas en los que predomina la generación de los armónicos de orden 5, 7, 11 y 13. Son dispositivos utilizados para regular la velocidad de giro de los motores eléctricos, mediante la variación de su frecuencia de alimentación. Esto permite, entre otras cosas para un mejor control de los procesos, una optimización energética y de funcionamiento y una disminución del estrés mecánico [19].

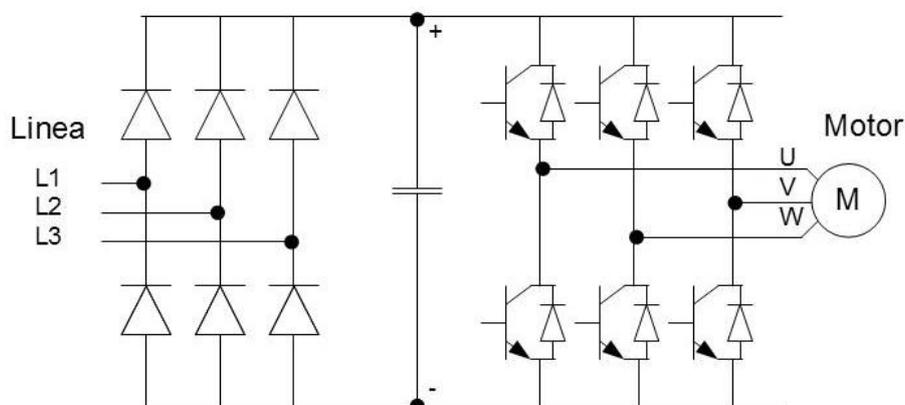


Fig. 7. Esquema de un convertidor de frecuencia alimentando a un motor eléctrico [20]



Un variador de frecuencia consta de:

- Rectificador: Formado por diodos en paralelo que solo permiten el paso de la corriente en un sentido, transformándola en corriente continua.
- Filtro de CC: Formado por un capacitor, tiene el objetivo de suavizar la onda de corriente continua para que esta apenas sea variante con el tiempo.
- Inversor: Se transforma la corriente continua de nuevo en corriente alterna, pero controlada en función de las necesidades de frecuencia y voltaje.
- Circuito de control

Fuente de alimentación conmutada AC-DC

Otro tipo de fuente de alimentación conmutada es aquella que transforma la corriente alterna suministrada por la red en corriente continua, necesaria para muchos de los dispositivos electrónicos utilizados en el día a día. También son conocidas como SMPS (Switch Mode Power Supplies). Algunos de ellos son los ordenadores personales, los cargadores de smartphones, o las televisiones.

En esencia, una fuente de alimentación conmutada consta de:

- Transformador: Reduce la amplitud de la onda de entrada al dispositivo.
- Rectificador: Transforma la corriente alterna en corriente continua.
- Filtro de CC: Suaviza la onda de corriente continua para disminuir su variación con el tiempo.
- Regulador: Suaviza aún más la onda de corriente y mantiene una tensión constante a la salida [21].

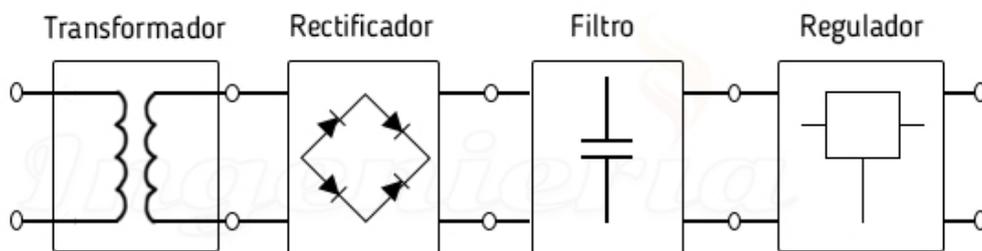


Fig. 8. Esquema de un convertidor de frecuencia alimentando a un motor eléctrico [22]



Luminaria:

Algunos equipos de iluminación como las lámparas fluorescentes y lámparas de descargas basan su funcionamiento en la avalancha de electrones que circula a través de un gas, produciendo una característica no lineal de la corriente que consumen. Las lámparas LED tienen componentes electrónicos en su interior, por lo que son fuentes de armónicos.

Cada vez un mayor número de las lámparas fluorescentes utilizadas en la actualidad funcionan con el llamado balasto electrónico, un circuito electrónico auxiliar que limita la corriente de cada lámpara, proporcionando la tensión de arranque necesaria y de funcionamiento en régimen permanente. Esto se logra, entre otras cosas, con un rectificador y un inversor que adaptan la corriente alterna de la red. Los balastos electrónicos presentan numerosas ventajas con respecto al balasto tradicional como la eliminación del parpadeo y de ruido audible, y el ajuste de la intensidad lumínica de la lámpara. Además aumentan el rendimiento y la vida útil de la lámpara [23]. Por otro lado, el balasto electrónico genera una mayor cantidad de armónicos que el magnético.

Los tubos fluorescentes son cargas monofásicas en las que predomina la generación de armónicos de orden 3, y de orden 5 en menor medida. Se comparan a continuación dos ondas típicas de este tipo de cargas con balasto magnético y balasto electrónico.

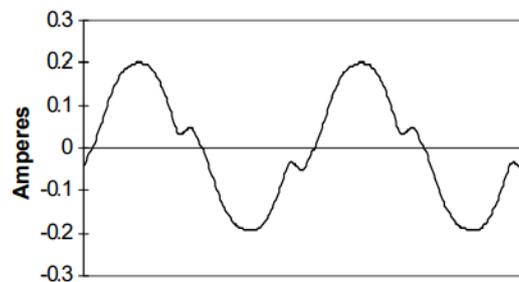


Fig. 9. Forma de onda típica de una lámpara fluorescente con balasto magnético [14]

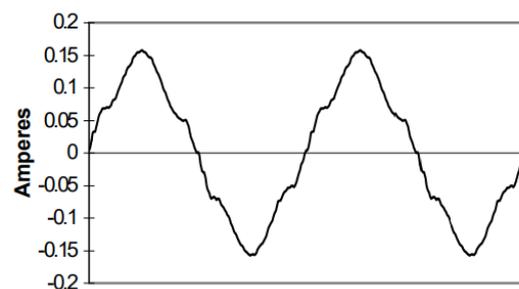


Fig. 10. Forma de onda típica de una lámpara fluorescente con balasto electrónico [14]



Por otro lado, las lámparas LED también son cargas generadoras frecuentes de armónicos. Este tipo de luminaria, junto a las lámparas fluorescentes con balasto electrónico, son las más eficientes y duraderas de las que se utilizan en la actualidad. Al igual que estas, el circuito electrónico de las lámparas LED consta, entre otros componentes, de un rectificador para transformar la corriente alterna de la red en corriente continua y ajustarla a la que necesita la lámpara [24]. Como ya se mencionó anteriormente, estas modificaciones en la onda de tensión senoidal del sistema provocan su distorsión. En las lámparas LED predomina también la generación de armónicos de orden 3, y de orden 5 y 7 en menor medida.

Hornos de arco eléctrico:

En los hornos de arco eléctrico predomina la generación de los armónicos de orden 3, 5 y 7. Estos equipos actúan como cargas transitorias [14], no periódicas, que pueden ser de corriente continua o alterna. Se caracterizan por tener un consumo aleatorio y elevado de potencia reactiva, por una fuerte generación de armónicos e interarmónicos y efecto flicker en la onda de tensión, y por la asimetría de la carga en las tres fases. Los armónicos son el resultado de las variaciones aleatorias durante el establecimiento del arco eléctrico. La variación de la longitud del arco eléctrico provoca variaciones aleatorias de la corriente absorbida por este, y esto causa variaciones de tensión aguas arriba del horno [25]. Las grandes variaciones de tensión hace que se generen además frecuencias interarmónicas de entre 0,1 y 30 Hz a cada lado de los armónicos múltiplos de la fundamental [26]. En este tipo de equipos predomina la generación de los armónicos de orden 3, 5 y 7.

Cargadores de batería de vehículos eléctricos PHEV

Por último, cabe mencionar los cargadores de batería de vehículos eléctricos como ejemplo de fuente de alimentación conmutada AC/DC, ya que será el tipo de carga no lineal utilizada en la simulación de este proyecto. Este tipo de cargas pueden ser monofásicas o trifásicas y su componente principal es el rectificador, encargado de transformar la corriente alterna en la corriente continua con la que se alimentan las baterías de los vehículos. En los cargadores de vehículos eléctricos predomina la generación de armónicos de orden 3, 5 y 7 fundamentalmente.



3.4. Medidas para el control de los armónicos

Actualmente el control total de los armónicos en una instalación no tiene una solución clara y totalmente efectiva y es por lo que, antes que nada, se han de tomar medidas preventivas en el diseño de la red eléctrica. Algunas de las medidas más comunes son:

- **Sobredimensionado del conductor neutro:** Como ya se ha mencionado anteriormente, la presencia de algunos armónicos en el sistema hace que estos retornen por el conductor neutro. Es por esto que conviene dimensionar el neutro de forma que tenga la misma o mayor capacidad que cada uno de los conductores de las tres fases [27]. El dimensionado de los conductores de una instalación suele realizarse en la fase del diseño de la instalación, de modo que, si aparecen problemas más adelante, una nueva redimensión resulta complicada y costosa económicamente. Es aquí donde entran soluciones a posteriori como los filtros de frecuencia.
- **Conductores neutros separados:** Para aumentar la capacidad de soportar cargas armónicas en los circuitos de derivación es recomendable instalar conductores neutros independientes para cada circuito, en vez de neutros compartidos. Por el contrario, se podrían producir acumulaciones de armónicos de los diferentes circuitos en el neutro. Habrá que tener en cuenta que los conductores neutro de la fuente de alimentación y del tablero han de sobredimensionarse [27].
- **Fuentes de alimentación CC:** No existe generación de corrientes armónicas en circuitos de corriente continua, y es por esto que en algunos casos sería interesante dotar a ciertos sistemas de una transformación CA-CC previa, en vez de ser realizada esta por cada equipo. Un ejemplo son los Data Center [27].
- **Transformadores factor K:** Este tipo de transformadores soportan cargas adicionales producidas por la distorsión armónica generada en la instalación. El factor K mide la capacidad del equipo para alimentar a las cargas no lineales [28]. Permite estimar por tanto la capacidad del transformador para soportar los efectos térmicos producidos por los armónicos. Muchos de los transformadores de distribución que alimentan cargas industriales, en uso actualmente, han sido



diseñados solo para soportar aumentos de temperatura producidos por corrientes parásitas y presentan un factor $K=1$ [29]. Este factor puede llegar incluso a valores de $40 < K < 50$ [27].

- **Diferenciales superinmunizados:** En esencia, este tipo de interruptores diferenciales son capaces de diferenciar una derivación de corriente eléctrica a tierra de una alteración provocada por la presencia de equipos electrónicos en la instalación. Esto es posible gracias a los filtros que incorporan que permiten detectar altas frecuencias [30].
- **Filtros pasivos de armónicos:** Permiten absorber los armónicos emitidos por las cargas no lineales evitando que lleguen al circuito de alimentación. El filtrado se realiza utilizando inductancias y condensadores conectados con una configuración resonante en el orden de las frecuencias armónicas que mitigan, y se conectan en paralelo con la carga no lineal. Este tipo de filtros solo permiten una reducción parcial de las corrientes armónicas y también se limitan a una serie de armónicos, generalmente a los de 5, 7, y 11 orden, no cubriendo el tercer armónico. Además, requieren de un estudio detallado de la instalación debido a sus limitaciones al mitigar la distorsión presente [31].
- **Filtros/Compensadores activos de armónicos:** Al igual que los filtros pasivos, permiten mitigar las corrientes armónicas, pudiendo evitar que lleguen al circuito de alimentación y neutralizando la distorsión de tensión ya presente en el sistema de alimentación, en función de su configuración en paralelo o serie. Generalmente, es la configuración en paralelo la más utilizada [32]. Esto se realiza mediante la utilización de un dispositivo electrónico de potencia que genera los armónicos requeridos por las cargas no lineales, de modo que la fuente de alimentación solo *emite* la onda de corriente fundamental. Este tipo de filtros abarca todo el rango de bajas frecuencias, hasta el armónico de orden 25 y reduce las corrientes armónicas en un 90%. La medición de la corriente que circula por la carga no lineal se mide continuamente con un transformador de corriente y es analizada por un procesador de señales digitales. Con esta información el generador de potencia es capaz de replicar la corriente armónica requerida por la carga en el siguiente ciclo de la onda fundamental [33].



- **Filtros híbridos:** Este tipo de equipo es una combinación de los filtros activos y los pasivos, mencionados anteriormente. La forma de aplicación consiste en utilizar un filtro pasivo para mitigar las frecuencias armónicas predominantes, junto con un filtro activo que neutralice el resto de armónicos. La utilización del filtro pasivo específicamente para un orden de frecuencia permite cubrir rangos de potencia mayores. Con este tipo de filtros se combina el bajo coste económico de los filtros pasivos y la precisión y versatilidad de los filtros activos [31].

3.5. Normativa para la distorsión armónica

Para controlar los efectos producidos por los armónicos en los sistemas eléctricos, existen una serie de normativas internacionales que, por un lado, limitan las emisiones de armónicos por parte de las cargas no lineales y, por otro, establecen niveles de referencia en la distorsión para el control del lado del suministro. En este capítulo se abordarán las distintas normativas existentes sobre el control de los armónicos en las instalaciones.

Estas normas son elaboradas por organismos como el IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), el IEC (International Electrotechnical Commission), y por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), miembro español de la IEC [34].

En primer lugar, la normativa desarrollada por el IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) que regula el control de los armónicos en los sistemas eléctricos de potencia es la **IEEE Std 519-2014** (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems) [35].

La norma establece una serie de límites recomendados para la distorsión armónica individual y total de la tensión para distintos niveles de tensión medida en el PCC (Punto Común de Acoplamiento), siendo este el punto de una red pública más próximo al cliente considerado y en el que están o pueden conectarse otros clientes [36].



Tabla 3. Límites de distorsión armónica de tensión según la norma IEEE Std 519-2014

Tensión V del bus en el PCC	Tasa de distorsión armónica individual (%)	Tasa de distorsión armónica global THD (%)
$V \leq 1$ kV	5,0	8,0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV $< V \leq 161$ kV	1,5	2,5
161 kV $< V$	1,0	1,5 ^a

Se especifica que:

- ^a Los sistemas de alta tensión (161 kV $< V$) pueden llegar a un límite de distorsión del 2% cuando la causa es un dispositivo de transporte de corriente continua de alta tensión cuyos efectos hayan sido atenuados en los puntos de la red donde se conectan los usuarios.

También se establecen limitaciones para la distorsión armónica individual y total de la intensidad de corriente, medida en el PCC en función de la relación I_{sc}/I_L . Siendo I_{sc} la corriente máxima de cortocircuito en el PCC, e I_L el valor máximo de corriente demandada por las cargas en el PCC. Estos límites se establecen en función de la tensión del sistema, distinguiéndose tres rangos:

- Sistemas de 120 V a 69 kV:

Tabla 4. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV según la norma IEEE Std 519 - 2014

Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de I_L						
Orden armónico (armónicos impares) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0



- Sistemas de 69 kV a 161 kV:

Tabla 5. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de 69 kV a 161 kV según la norma IEEE Std 519 – 2014

Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de I_L						
Orden armónico (armónicos impares) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$20 < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
$50 < 100$	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
$100 < 1000$	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

- Sistemas de más de 161 kV:

Tabla 6. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de más de 161 kV según la norma IEEE Std 519 - 2014

Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de I_L						
Orden armónico (armónicos impares) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
$20 < 50$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Se especifica que:

- ^a Los armónicos pares se han de limitar a un 25% de los valores para los armónicos impares recogidos en las tablas.
- ^b No se permiten distorsiones de corriente que provoquen desplazamientos de la onda de corriente (DC offset).
- ^c Se indica además que todos los equipos de generación quedan limitados a los valores mínimos en cada intervalo de tensión, independientemente de su relación I_{sc}/I_L .



En la norma **UNE-EN 50160** (Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución) se especifican las características que ha de tener la tensión suministrada por una red pública de distribución de baja y media tensión en condiciones normales de funcionamiento.

Se establece que, para cada período de una semana, el 95% de los valores eficaces de cada tensión armónica individual, los cuales se promedian cada 10 minutos, han de estar limitados según los valores contenidos en la siguiente tabla:

Tabla 7. Límites de distorsión armónica de tensión en redes de distribución de baja y media tensión según la norma UNE-EN 50160

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden	Distorsión armónica (%)	Orden	Distorsión armónica (%)	Orden	Distorsión armónica (%)
5	6,0	3	5	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	> 6	0,5
13	3,0	21	0,2		
17	2,0	> 21	0,2		
19	1,5				
23	1,5				

También se establece que la Tasa de Distorsión Armónica Global (THD) incluyendo en el cálculo los armónicos hasta el de orden 40), debe ser $\leq 8\%$ en condiciones normales de explotación.

En la norma **UNE-EN IEC 61000-2-4** (Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales) se establecen los niveles de compatibilidad para los armónicos de tensión en redes industriales de baja tensión en el punto de conexión interno (PCI).

Se hace distinción entre los niveles de compatibilidad estableciendo las siguientes clases:



- C1: Entornos industriales sensibles protegidos con niveles de compatibilidad inferiores a las redes públicas.
- C2: Entornos industriales equivalentes a los de las redes públicas.
- C3: Entornos industriales severos con niveles de compatibilidad superiores a las redes públicas.

Siendo los valores de distorsión armónica individual en función de la clase:

Tabla 8. Límites de distorsión armónica de tensión en redes industriales de baja tensión según la norma UNE-EN IEC 61000-2-4

Armónicos impares no múltiplos de 3				Armónicos impares múltiplos de 3				Armónicos pares			
Orden	Distorsión armónica (%)			Orden	Distorsión armónica (%)			Orden	Distorsión armónica (%)		
	C1	C2	C3		C1	C2	C3		C1	C2	C3
5	3,0	6,0	8,0	3	3,0	5,0	6,0	2	2,0	2,0	3,0
7	3,0	5,0	7,0	9	1,5	1,5	2,5	4	1,0	1,0	1,5
11	3,0	3,5	5,0	15	0,3	0,3	2,0	6	0,5	0,5	1,0
13	3,0	3,0	4,5	21	0,2	0,2	1,75	8	0,5	0,5	1,0
17	2,0	2,0	4,0	> 21	0,2	0,2	1,0	10	0,5	0,5	1,0
19	1,5	1,5	4,0					> 10	0,2	0,2	1,0
23	1,5	1,5	3,5								
25	1,5	1,5	3,5								

Se ha de verificar en base al tipo de entorno:

- C1 – THD (%) \leq 5%
- C2 – THD (%) \leq 8%
- C3 – THD (%) \leq 10%

En la norma **IEC 61000-3-4**, cuya equivalencia es la norma **UNE 21000-3-4** (Limitación de las emisiones de corrientes armónicas en las redes de baja tensión para equipos con



corriente asignada superior a 16 A) se establecen los límites de emisión de corrientes armónicas en equipos con corrientes superiores a 16 A conectados al sistema eléctrico.

Se define la relación de potencias de cortocircuito como:

$$R_{cc} = \frac{S_{cc}}{S_n} \quad (29)$$

Donde:

- S_{cc} → Potencia de cortocircuito en el punto de conexión
- S_n → Potencia aparente nominal del equipo

Siendo $R_{cc} > 33$, los equipos han de cumplir los siguientes límites de emisión de corrientes:

Tabla 9. Primer límite de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente superior a 16 A según la norma IEC 61000-3-4.

Orden	Límite de corriente (%)
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	...
Armónicos pares	$\leq 8/k$ ó $\leq 0,6$

En el caso de no cumplir estos límites, siempre y cuando $R_{cc} > 33$, podrán ser aceptados los equipos que cumplan los siguientes límites:



Tabla 10. Segundo límite de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente superior a 16 A según la norma IEC 61000-3-4

R_{cc}	Factores de distorsión máximos		Corrientes armónicas máximas (%)			
	THD	PWHD	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
66	16,0	25,0	14,0	11,0	10,0	8,0
120	18,0	29,0	16,0	12,0	11,0	8,0
175	25,0	33,0	20,0	14,0	12,0	8,0
250	35,0	39,0	30,0	18,0	13,0	8,0
350

Cuando un equipo no satisfaga los límites establecidos anteriormente, este podrá ser conectado al sistema bajo el consentimiento de los gestores del sistema eléctrico, de acuerdo con su nivel de potencia.

En la norma **UNE-EN IEC 61000-4-30** (Métodos de medida de la calidad de suministro), se definen los métodos de medida y se interpretan los resultados de los parámetros que establecen la calidad del suministro eléctrico en sistemas eléctricos de potencia de 50 y 60 Hz. Se hace referencia a la norma **UNE-EN IEC 61000-4-7** (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) para la medición de los armónicos e interarmónicos de tensión.

En la norma **UNE-EN IEC 61000-3-12** (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) sobre compatibilidad electromagnética, se establecen una serie de requisitos y límites de emisión armónica para los distintos equipos conectados a la red de baja tensión (50 Hz y 230/400 V) [36].

Se establecen en primer lugar los límites de emisión de corriente para aquellos equipos que no sean trifásicos equilibrados, teniendo en cuenta que I_{ref} es la corriente de referencia e I_h es la componente armónica de corriente. El valor de R_{sce} se determina previamente y corresponde a la relación de cortocircuito.



Tabla 11. Límite de emisión de corriente para equipos que no sean trifásicos equilibrados según la norma UNE-EN 61000-3-12

R_{sce} mínimo	Corriente armónica individual admisible I_h/I_{ref} (%)						Parámetros armónicos admisibles (%)	
	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	THC/ I_{ref}	PWHC/ I_{ref}
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2,0	23,0	23,0
66	24,0	13,0	8,0	5,0	4,0	3,0	26,0	26,0
120	27,0	15,0	10,0	6,0	5,0	4,0	30,0	30,0
250	35,0	20,0	13,0	9,0	8,0	6,0	40,0	40,0
≥ 350	41,0	24,0	15,0	12,0	10,0	8,0	47,0	47,0

Se especifica que:

- Los valores relativos de los armónicos pares de orden ≤ 12 no deben sobrepasar el 16%.
- Los armónicos pares de orden < 12 se tienen en cuenta en el cálculo del THC y del PWHC de igual forma que los de orden impar.
- La interpolación lineal entre valores sucesivos de R_{sce} está permitida.

Para equipos trifásicos equilibrados se establecen los siguientes límites de emisión armónica.

Tabla 12. Límite de emisión de corriente para equipos trifásicos equilibrados según la norma UNE-EN 61000-3-12

R_{sce} mínimo	Corriente armónica individual admisible I_h/I_{ref} (%)				Parámetros armónicos admisibles (%)	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	THC/ I_{ref}	PWHC/ I_{ref}
33	10,7	7,2	3,1	2,0	13,0	22,0
66	14,0	9,0	5,0	3,0	16,0	25,0
120	19,0	12,0	7,0	4,0	22,0	28,0
250	31,0	20,0	12,0	7,0	37,0	38,0
≥ 350	40,0	25,0	15,0	10,0	48,0	46,0



Se especifica que:

- Los valores relativos de los armónicos pares de orden ≤ 12 no deben sobrepasar el 16%.
- Los armónicos pares de orden < 12 se tienen en cuenta en el cálculo del THC y del PWHC de igual forma que los de orden impar.
- La interpolación lineal entre valores sucesivos de R_{sce} está permitida.

Para equipos trifásicos equilibrados, en alguno de los siguientes casos:

- a) Las corrientes armónicas de órdenes 5 y 7, medidas sobre el periodo de observación total del ensayo, son inferiores al 5% de la corriente de referencia.
- b) El ángulo de fase de la corriente armónica de orden 5 puede tomar cualquier valor en el intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$, no teniendo ningún valor preferente en el tiempo.
- c) El ángulo de fase de la corriente armónica de orden 5 en relación a la tensión de fase fundamental, medido sobre el período de observación total, está comprendido en el intervalo $[90^\circ, 150^\circ]$.

Tabla 13. Límite de emisión de corriente para equipos trifásicos equilibrados en condiciones especificadas (a, b, c) según la norma UNE-EN 61000-3-12

R_{sce} mínimo	Corriente armónica individual admisible I_h/I_{ref} (%)				Parámetros armónicos admisibles (%)	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	THC/ I_{ref}	PWHC/ I_{ref}
33	10,7	7,2	3,1	2,0	13,0	22,0
≥ 120	40,0	25,0	15,0	10,0	48,0	46,0

Se especifica al igual que en el caso anterior, que:

- Los valores relativos de los armónicos pares de orden ≤ 12 no deben sobrepasar el 16%.
- Los armónicos pares de orden < 12 se tienen en cuenta en el cálculo del THC y del PWHC de igual forma que los de orden impar.
- La interpolación lineal entre valores sucesivos de R_{sce} está permitida.



Por último, para equipos trifásicos equilibrados, en alguno de los siguientes casos:

- d) Las corrientes armónicas de órdenes 5 y 7, medidas sobre el periodo de observación total del ensayo, son inferiores al 3% de la corriente de referencia.
- e) El ángulo de fase de la corriente armónica de orden 5 puede tomar cualquier valor en el intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$, no teniendo ningún valor preferente en el tiempo.
- f) El ángulo de fase de la corriente armónica de orden 5 en relación a la tensión de fase fundamental, medido sobre el período de observación total, está comprendido en el intervalo $[150^\circ, 210^\circ]$.

Tabla 14. Límite de emisión de corriente para equipos trifásicos equilibrados en condiciones especificadas (d, e, f) según la norma UNE-EN 61000-3-12

R_{sce} mínimo	Corriente armónica individual admisible I_h/I_{ref} (%)											Parámetros armónicos admisibles (%)		
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	I_{17}	I_{19}	I_{23}	I_{25}	I_{29}	I_{31}	I_{35}	I_{37}	THC/ I_{ref}	PWHC/ I_{ref}
33	10,7	7,2	3,1	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	13,0	22,0
≥ 250	25,0	17,3	12,1	10,7	8,4	7,8	6,8	6,5	5,4	5,2	4,9	4,7	35,0	70,0

Se especifica que:

- Cuando $R_{sce} = 33$, los valores relativos de los armónicos pares de orden ≤ 12 no deben sobrepasar el 16%, y los valores relativos de los armónicos $14 \leq h \leq 40$ no representados en la tabla no deben sobrepasar el 1% de I_{ref} .
- Cuando $R_{sce} \geq 250$, los valores relativos de los armónicos pares de orden ≤ 12 no deben sobrepasar el 16%, y los valores relativos de los armónicos $14 \leq h \leq 40$ no representados en la tabla no deben sobrepasar el 3% de I_{ref} .
- La interpolación lineal entre valores sucesivos de R_{sce} está permitida.

En la norma **UNE-EN IEC 61000-3-2** (Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase), sobre compatibilidad electromagnética, se establecen los límites de emisión de corrientes armónicas en equipos con corrientes inferiores a 16 A conectados al sistema eléctrico. Se consideran distintos tipos de equipos, en función de su clase, conectados a la red de baja tensión (50/ 60 Hz y 220/380 V, 230/400 V, 240/415 V) [37].



Según su clase, los equipos se clasifican en:

- Clase A: Equipos trifásicos equilibrados, equipos electrodomésticos (excepto aquellos considerados Clase D), herramientas (excepto las portátiles), reguladores de luz para lámparas de incandescencia, equipos de audio, y cualquier otro equipo no perteneciente al resto de clases.
- Clase B: Herramientas portátiles y equipos de soldadura por arco (excepto equipos profesionales).
- Clase C: Equipos de iluminación.
- Clase D: Equipos con una potencia especificada inferior o igual a 600 W de tipo ordenadores personales y pantallas de ordenadores personales y receptores de televisión.

Se establecen en primer lugar los límites para los equipos de Clase A.

Tabla 15. Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A según la norma UNE-EN IEC 61000-3-2

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible (A)
Armónicos impares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \cdot (15/n)$
Armónicos pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \cdot (8/n)$



Los límites para los equipos de Clase B son los de la Tabla 15, correspondientes a los equipos de Clase A, pero multiplicados por el factor 1,5.

Para los equipos de Clase C se aplican los siguientes límites, siendo λ el factor de potencia del circuito:

Tabla 16. Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C según la norma UNE-EN IEC 61000-3-2

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

Finalmente, los límites para los equipos de Clase D son:

Tabla 17. Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase C según la norma UNE-EN IEC 61000-3-2

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible por vatio (mA/W)	Corriente armónica máxima admisible (A)
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (armónicos impares)	$3,85/n$	Véase Tabla 15



4. Calidad de la energía

Como se explicó en apartados anteriores, los sistemas electrónicos utilizados en la actualidad, tanto a nivel doméstico como a nivel industrial, actúan como cargas no lineales, lo cual provoca problemas en la red debido a la generación de armónicos. En general, los armónicos son solo un tipo de perturbación electromagnética generados en los sistemas eléctricos de potencia: en concreto, una perturbación de tipo conducido.

Se define como *Calidad de la Energía* al suministro continuo, fiable, de la energía eléctrica a tensión constante, con forma de onda puramente senoidal de amplitud y frecuencia nominales. En resumidas cuentas, el concepto de calidad de la energía establece el derecho del usuario a disponer de una fuente de energía limpia, segura y libre de interrupciones.

Los parámetros que caracterizan la calidad del suministro eléctrico son los siguientes:

- a. Amplitud de la tensión de fase o de línea.
- b. Frecuencia de suministro (específicamente la frecuencia fundamental).
- c. Equilibrio entre las tensiones de suministro.
- d. Forma de onda de las tensiones de suministro.

En un sistema eléctrico, la responsabilidad está compartida tanto por los suministradores como por los usuarios finales. Las perturbaciones producidas por los dispositivos utilizados por los usuarios entran en el sistema afectando así al suministro del resto de usuarios. Es por esto que por un lado se han de poner límites en su generación del lado de la red que comprende a los usuarios, y por otro se han de tomar medidas para disminuir la distorsión de la tensión del lado del suministro, actuando sobre la red [10]. Es aquí donde entra el concepto de compatibilidad electromagnética sobre el que se enfoca este capítulo.

4.1. Compatibilidad electromagnética

Se define la Compatibilidad Electromagnética (CEM) como la capacidad que presenta un dispositivo o sistema para funcionar en un entorno electromagnético concreto de forma satisfactoria, sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro dispositivo que se encuentre en el mismo entorno [3]. Cuando se habla



de sistema se engloba a todos los elementos que interactúan en la red, incluyendo por ejemplo las conexiones entre equipos o las alimentaciones eléctricas. Una perturbación electromagnética consiste en cualquier fenómeno electromagnético capaz de degradar el correcto funcionamiento de un dispositivo o sistema (ruidos electromagnéticos, señales o modificaciones en el medio de propagación) o de afectar a la materia viva o inerte. Estas se producen en los centros de generación y pueden modificar cualquier parámetro de la onda fundamental (frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría entre las fases) [38].

La compatibilidad electromagnética ha cobrado cada vez más importancia en los últimos años debido a numerosas razones, como: [39]

- Aumento de equipos electrónicos industriales y domésticos.
- Equipos más grandes y complejos.
- Aumento de los sistemas de telecomunicación.
- Disminución de la tensión de trabajo de los sistemas digitales.
- Aumento de la frecuencia de trabajo de los equipos.

El origen de las perturbaciones electromagnéticas puede ser distinto [40]. En primer lugar, estas pueden originarse en un circuito eléctrico o electrónico, siendo lo más habitual que perturbación e impacto tengan lugar en circuitos distintos, aunque también pueden tener lugar en el mismo circuito. Las perturbaciones también pueden originarse fuera de un circuito eléctrico o electrónico, por causas como descargas atmosféricas, impulsos electromagnéticos o por el movimiento de cuerpos con presencia de carga eléctrica y descargas de electricidad estática.

Se puede hablar también de fuentes de interferencias naturales y fuentes debido a la acción del hombre [39]. Algún ejemplo de fuentes naturales serían las descargas atmosféricas o la radiación. Entre las fuentes artificiales o provocadas por la acción del hombre se pueden encontrar las descargas electrostáticas, los efectos producidos por los sistemas eléctricos y electrónicos, los pulsos electromagnéticos o los efectos producidos por los sistemas de telecomunicaciones.

Pueden clasificarse los tipos de perturbaciones electromagnéticas en función de su mecanismo de propagación [39], pudiendo ser por:



- **Conducción:**

Propagadas a través de todo tipo de cableado de la instalación. La energía conducida puede ser elevada y, como consecuencia, los equipos pueden llegar a averiarse [3]. Pueden ser causadas por armónicos, interarmónicos, caídas de tensión, transitorios de tensión, descargas electrostáticas, o variaciones de frecuencia o desequilibrios, entre otros [8].

- **Acoplamiento:**

Pueden ser por acoplamiento capacitivo o inductivo.

- **Capacitivo:**

Producidas por el efecto de campo eléctrico. Aparecen cuando en un circuito, el campo eléctrico generado por una tensión entre dos conductores atraviesa otro conductor cercano, induciéndose en este una corriente parásita, y a su vez una tensión.

- **Inductivo:**

Producidas por efecto de campo magnético. Aparecen cuando en un circuito, un conductor genera un campo magnético e induce una fuerza electromotriz sobre otro conductor, de modo que las cargas de este se moverán generando también corrientes parásitas.

- **Radiación:**

Producidas por la generación de ondas electromagnéticas. Se consideran de este tipo y no por acoplamiento cuando la distancia entre el origen y el impacto es superior a la mitad de la longitud de onda de la perturbación, esto es:

$$d > \frac{\lambda}{2\pi} \quad (30)$$

La energía radiada por lo general es baja por lo que los equipos conectados a la red como mucho podrán sufrir errores de funcionamiento [3].



Generalmente, las perturbaciones por conducción y acoplamiento tienen lugar a frecuencias menores de 30MHz, mientras que las que se propagan por radiación tienen lugar a frecuencias mayores.

Es importante mencionar los conceptos de inmunidad electromagnética, siendo esta el rango en el que un dispositivo o sistema funciona correctamente sin deteriorar su calidad en presencia de una perturbación electromagnética [41], y susceptibilidad electromagnética, siendo esta el nivel de perturbación a partir del cual un dispositivo o sistema comienza a funcionar de forma errónea [3]. Los niveles de funcionamiento de un dispositivo en base a la compatibilidad electromagnética se resumen en la Fig. 11.

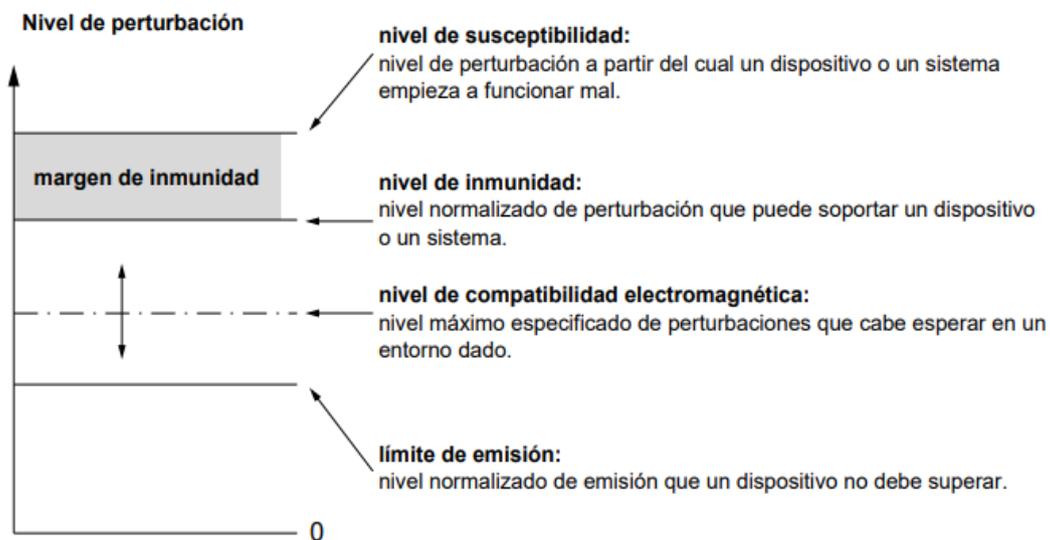


Fig. 11. Niveles de perturbación soportados por un dispositivo [3]

4.2. Normativa asociada

En general, la normativa UNE que regula y limita la compatibilidad electromagnética es el conjunto formado por la norma UNE-EN 61000 denominado *Compatibilidad Electromagnética CEM*. La siguiente tabla recoge algunas de las normas más destacadas sobre la CEM.



Tabla 18. Normativa sobre Compatibilidad Electromagnética CEM

Código de la Norma	Título
UNE 21000-1-1 IN	Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 1. Generalidades. Sección 1: aplicación e interpretación de definiciones y términos fundamentales.
UNE-EN IEC 61000-2-4	Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 2-4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales.
UNE-EN IEC 61000-2-2 2003	Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 2-2. Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en y la transmisión de señales en las redes de suministro público en media baja tensión.
UNE-EN IEC 61000-3-2 2001	Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 3-2. Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corrientes de entrada ≤ 16 A por fase).

A nivel europeo, esto se regula en la Directiva 2014/30/UE de 26 de febrero de 2014 sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética. En España, esta se adopta en el Real Decreto 186/2016, de 6 de mayo, por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos.

El objeto es regular la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos con el fin de garantizar el funcionamiento del mercado interior de la Unión Europea, exigiéndose que los equipos cumplan un nivel adecuado de compatibilidad electromagnética [42].



5. Estudio del flujo de cargas

Para estudiar el comportamiento de operación de un sistema eléctrico de potencia, es necesaria la obtención en régimen permanente de las tensiones fundamentales de funcionamiento para un estado de carga dado [43]. La forma común de estudiar esto es mediante la resolución del problema del flujo de cargas, lo cual permite conocer una serie de parámetros de funcionamiento como pueden ser las tensiones de barra, las potencias en las líneas, las corrientes circulantes, las caídas de tensión, las pérdidas, etc.

El flujo de cargas de un sistema resulta de gran utilidad y es una herramienta muy utilizada en el control y diseño de los sistemas de potencia de cara a la seguridad de los mismos, ejecutándose periódicamente para identificar posibles sobrecargas o valores de tensión no deseados consecuencia de las cargas de la red [8].

5.1. Flujo de cargas convencional

Para realizar un análisis de flujo de cargas, lo primero es simplificar el esquema del sistema en una representación unifilar, denominada precisamente *diagrama unifilar*. Esto se hace debido a la complejidad de realizar una representación de las diferentes fases. El diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia incluye las principales conexiones entre sus elementos, los cuales se representan con símbolos particulares. También se hace una simplificación de las unidades del sistema, trabajando en el *por unidad*.

El principal elemento de conexión entre los elementos de una red eléctrica son las barras. En el estudio del flujo de cargas convencional se distinguen tres tipos de barras:

- Barra Slack: Se toma como barra de referencia del sistema, y generalmente es la barra principal de generación o una barra de interconexión con el exterior de la red. Su tensión y ángulo toman siempre valores fijos independientemente de los flujos de potencia. Se conoce el valor de tensión y su ángulo (0°), y las incógnitas son la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q).



- Barras PV: Comprenden el resto de barras de generación del sistema. Se conocen los valores de potencia activa y de tensión, y las incógnitas son el ángulo de la tensión y la potencia reactiva.
- Barras PQ: Pueden definirse como las barras de carga o consumo del sistema. Se conocen los valores de potencia activa y potencia reactiva, y las incógnitas son la tensión y su ángulo.

Esto se resume en la siguiente tabla:

Tabla 19. Datos e incógnitas en función del tipo de barra

Tipo de barra	Datos	Incógnitas
Slack	V, θ	P, Q
PV	P, V	Q, θ
PQ	P, Q	V, θ

La forma de resolver un problema de flujo de cargas convencional comienza planteando un sistema de ecuaciones no lineales que dependen de las características de la red, y finalmente resolviendo este sistema de forma iterativa. Este planteamiento se desarrolla a continuación [8].

Sabiendo que en una barra cualquiera de la red la potencia es:

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \quad (31)$$

Aplicando la Ley de Ohm generalizada, se puede obtener la Ley de Ohm en función de la admitancia en vez de la impedancia.

$$\underline{V} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \rightarrow \underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{V} \quad (32)$$

Adaptando la expresión para la i-ésima barra:

$$I_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot V_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (33)$$



Sustituyendo en la ecuación de la potencia aparente:

$$S_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* \cdot V_k^* \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (34)$$

Sabiendo que:

$$V_i \cdot V_k = |V_i| \cdot |V_k| \langle \theta_i + \theta_k = |V_i| \cdot |V_k| \cdot (\cos(\theta_{ik}) + j \operatorname{sen}(\theta_{ik})) \quad (35)$$

Y que:

$$Y_{ik} = G_{ik} - jB_{ik} \quad (36)$$

Sustituyendo en la expresión de la potencia aparente anterior:

$$S_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| \cdot (\cos(\theta_{ik}) + j \operatorname{sen}(\theta_{ik})) \cdot (G_{ik} - jB_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (37)$$

Separando en parte real y parte imaginaria, se obtienen las ecuaciones del flujo de carga en forma polar.

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| \cdot |V_k| \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \operatorname{sen}(\theta_{ik})) \quad (38)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| \cdot |V_k| \cdot (G_{ik} \cdot \operatorname{sen}(\theta_{ik}) - B_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik})) \quad (39)$$

Se construirá a continuación la matriz de admitancias de barra del sistema, necesaria para obtener los valores de conductancia y susceptancia. Sustituyendo en la Ley de Ohm en función de la admitancia:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \bar{I}_i \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \cdots & \bar{Y}_{1i} & \cdots & \bar{Y}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Y}_{i1} & \cdots & \bar{Y}_{ii} & \cdots & \bar{Y}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \cdots & \bar{Y}_{ni} & \cdots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \vdots \\ \bar{U}_i \\ \vdots \\ \bar{U}_n \end{bmatrix}$$



A continuación, se definen las potencias especificadas como, la diferencia entre la potencia generada y la potencia demandada, y a su vez, estas han de ser coincidentes con las potencias calculadas previamente. Entonces:

$$P_i^{especific.} = P_{Gi} - P_{Di} = P_i \quad (40)$$

$$Q_i^{especific.} = Q_{Gi} - Q_{Di} = Q_i \quad (41)$$

Se obtiene finalmente un sistema con el mismo número de ecuaciones que de incógnitas, que serán las tensiones de barra y los ángulos faltantes. Es posible calcular la potencia activa y reactiva de las barras sustituyendo los valores obtenidos en las expresiones de potencia del flujo de cargas.

Los flujos de potencia para un elemento entre dos barras se pueden calcular como:

$$P_{ik} = V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik})) - G_{ik} \cdot V_i^2 \quad (42)$$

$$Q_{ik} = V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik}) - B_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik})) + V_i^2 \cdot (B_{ik} - b_{ik}) \quad (43)$$

Al tratarse de un sistema de ecuaciones no lineal, el método comúnmente utilizado en su resolución es iterativo, concretamente el método iterativo de Newton-Raphson, pero con ciertas modificaciones. Esto es debido a que el método exacto en redes eléctricas muy grandes lleva consigo tiempos de cálculo elevados. Generalmente se resuelve mediante software especializado cuyos algoritmos se basan en este método.

A continuación, se explica el procedimiento de resolución del sistema obtenido por medio del método iterativo de Newton-Raphson. El planteamiento del problema iterativo es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(w)} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{(w)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^{(w)} \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(w+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(w)} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(w)} \quad (45)$$



La matriz Jacobiana del sistema está dividida en submatrices, siendo:

- $H_{ik} = \partial P_i / \partial \theta_k$
- $M_{ik} = \partial Q_i / \partial \theta_k$
- $N_{ik} = V_k \cdot \partial P_i / \partial V_k$
- $L_{ik} = V_k \cdot \partial Q_i / \partial V_k$

Es posible simplificar los cálculos anteriores, ya que, cuando $i \neq k$:

- $H_{ik} = L_{ik} = V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik}) - B_{ik} \cdot \text{cos}(\theta_{ik}))$
- $N_{ik} = M_{ik} = V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \text{cos}(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik}))$

Cuando $i = k$:

- $H_{ii} = -Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2$
- $M_{ii} = P_i - G_{ii} \cdot V_i^2$
- $N_{ii} = P_i + G_{ii} \cdot V_i^2$
- $L_{ii} = Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2$

El proceso de iteración seguirá el siguiente orden:

1. Se comienza la iteración con arranque plano, esto es un valor de tensión de 1 (0ª pu y en las tensiones no especificadas (en las barras de consumo), o bien utilizando las soluciones de un caso anterior.
2. Se calcula $[\Delta P \mid \Delta Q]$. Se detendrá el proceso si todos los elementos del vector son menores que ϵ . En caso contrario, se calculará el Jacobiano.
3. Resolver el sistema, obteniendo $[\Delta \theta \mid \Delta V/V]$.
4. Actualizar el vector $[\theta \mid V]$ y volver al segundo paso.

Consideraciones:

- Los ángulos obtenidos en las sucesivas iteraciones están expresados en radianes.
- Se considerará que el método converge cuando $\epsilon < 10^{-3}$.



5.2. Flujo de cargas armónico

Aunque en las redes eléctricas predominen los elementos lineales, los efectos de las cargas no lineales son muy notorios y precisan un análisis aparte. Este estudio se denomina flujo armónico de cargas. Este no deja de ser una extensión del problema anterior pero con una serie de modificaciones para obtener, para un estado de carga dado, información sobre [43]:

- Las tensiones fundamentales en todos los nodos de la red.
- Las tensiones armónicas en los nodos.
- Los parámetros que caracterizan el estado de los elementos no lineales.

En redes con cargas no lineales, además de las incógnitas a frecuencia fundamental, es necesario obtener las tensiones y sus ángulos para cada una de las frecuencias armónicas en cada nodo.

Generalmente, para su resolución se distinguen tres tipos de técnicas [43]: métodos en el dominio del tiempo, métodos en el dominio de la frecuencia, y métodos híbridos que combinan ambos dominios. Los métodos más utilizados son los basados en el dominio de la frecuencia, ya que son una extensión del problema de flujo de cargas convencional. Algunos de los métodos existentes son [44]:

- Flujo armónico de cargas completo.
- Flujo armónico de cargas simplificado.
- Penetración armónica.
- Interacción armónica

La resolución en este tipo de sistemas puede llegar a ser muy compleja, y es por eso por lo que siempre se busca un balance entre la simplificación del problema y la fiabilidad de los resultados.

Este proyecto se centrará en el método de *Interacción armónica*, el cual se explicará en detalle a continuación [8].

En un sistema eléctrico con presencia de cargas no lineales, la corriente absorbida por una carga no lineal no solo depende de la tensión que esta demanda, sino que también



depende del resto de componentes armónicas presentes en la tensión de alimentación [8]. Básicamente, cuando una carga absorbe una corriente armónica I_k , esta es inyectada en la red provocando una caída de tensión U_k . Esta caída de tensión provoca una variación en todas las componentes armónicas de corriente del sistema, esto es:

$$I_k = I_k(U_1, \dots, U_k, \dots, U_n) \quad (46)$$

Para plantear este problema, se parte del circuito equivalente de Norton para una carga no lineal, en el que se considera a la carga como una impedancia en paralelo con una fuente de corriente armónica, generadora de armónicos.

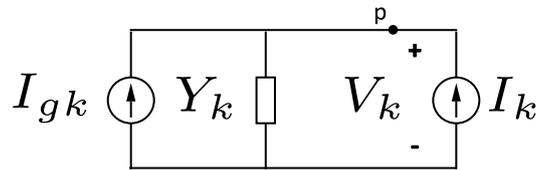


Fig. 12. Circuito equivalente de Norton para una carga no lineal

Se puede deducir del circuito equivalente que en el nudo P se cumple la siguiente igualdad:

$$I_{gk} - I_{Y_k} - I_k = 0 \quad (47)$$

$$I_{gk} - U_k \cdot Y_k - I_k(U_1, \dots, U_k, \dots, U_n) = 0; \quad k = 1, \dots, n \quad (48)$$

En la resolución del problema son conocidos los términos I_{gk} e Y_k , y las funciones que componen el término I_k , por lo que las incógnitas del problema serán precisamente las caídas de tensión provocadas por cada armónico.

Para que se cumpla la igualdad de la ecuación (5) será necesario realizar un proceso iterativo, en el que el error vendrá dado por:

$$\Delta I_k^w = I_k^w(U_1^k, \dots, U_k^w, \dots, U_n^w) - (I_{gk} - Y_k \cdot U_k^w) \quad (49)$$

Se buscará por lo tanto que ΔI_k sea lo más cercano a cero.



Para estudiar un sistema formado por N nodos con cargas no lineales conectadas, se particulariza la ecuación (49) como:

$$\Delta I_{kp}^w = I_{kp}^w(U_{1p}^w, \dots, U_{kp}^w, \dots, U_{np}^w) - (I_{gkp} - \sum_{q=1}^N Y_{kpq} \cdot U_{kq}^w) \quad (50)$$

donde p y q son índices para designar el nudo de interés que varían entre 1 y el número de nodos N .

Cuando en el problema la interacción armónica no es muy grande es posible resolverlo con el método de Gauss. En este caso se explicará su resolución por el método de Newton, adecuado para sistemas con una fuerte interacción armónica.

Se comienza planteando la ecuación:

$$[V]^{w+1} = [V]^w - [J^{-1}]^w \cdot [\Delta I]^w \quad (51)$$

Donde:

- $[V] = [\dots, V_{rkp}, V_{xkp}, \dots]^T$
- $[\Delta I] = [\dots, \Delta I_{rkp}, \Delta I_{xkp}, \dots]^T$

De modo que cada vector contiene $2nN$ términos, es decir, parte real (r) y parte imaginaria (x) de las n armónicos presentes en los N nudos. Se deduce además de la ecuación (49) que:

$$\Delta I_{rkp} = I_{rkp} - I_{grkp} + \sum_{q=1}^N G_{kpq} \cdot V_{rkq} - B_{kpq} \cdot V_{xkq} \quad (52)$$

$$\Delta I_{xkp} = I_{xkp} - I_{gxkp} + \sum_{q=1}^N B_{kpq} \cdot V_{rkq} + G_{kpq} \cdot V_{xkq} \quad (53)$$

La matriz Jacobiana está formada por las derivadas parciales de las funciones ΔI_{rkp} y ΔI_{xkp} para el armónico de orden k en el nudo p con respecto a la tensión armónica de orden m en el nudo q . El tamaño de la matriz será cuadráticamente proporcional al número de nodos N . Sus términos pueden simplificarse del siguiente modo:



Cuando $p \neq q$ y $k \neq m$:

- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{rmq} = 0$
- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{xmq} = 0$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{rmq} = 0$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{xmq} = 0$

Cuando $p \neq q$ y $k = m$:

- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{rmq} = G_{kpq}$
- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{xmq} = -B_{kpq}$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{rmq} = B_{kpq}$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{xmq} = G_{kpq}$

Cuando $p = k$ y $k \neq m$:

- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{rmq} = \partial I_{rkp} / \partial V_{rmp}$
- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{xmq} = \partial I_{rkp} / \partial V_{xmp}$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{rmq} = \partial I_{xkp} / \partial V_{rmp}$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{xmq} = \partial I_{xkp} / \partial V_{xmp}$

Cuando $p = k$ y $k = m$:

- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{rmq} = \partial I_{rkp} / \partial V_{rkp} + G_{kpp}$
- $\partial \Delta I_{rkp} / \partial V_{xmq} = \partial I_{rkp} / \partial V_{xkp} - B_{kpp}$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{rmq} = \partial I_{xkp} / \partial V_{rkp} + B_{kpp}$
- $\partial \Delta I_{xkp} / \partial V_{xmq} = \partial I_{xkp} / \partial V_{xkp} + G_{kpp}$

Se toman como valores de arranque de las tensiones armónicas:

- $k = 1 \rightarrow U_1 = 1 \text{ } \langle 0^\circ \text{ pu}$
- $k \neq 1 \rightarrow U_k = 0,01 \text{ } \langle 0^\circ \text{ pu}$

Consideraciones:

- El método converge cuando $\Delta I_k \approx 0$



6. Simulación y análisis del funcionamiento de la red de distribución

Como uno de los principales objetivos de este trabajo, se construye y se pone en marcha un modelo de una red de distribución utilizando el software OpenDSS. Con esto se pretende realizar la simulación de su funcionamiento con presencia de cargas no lineales y analizar su efecto, comparándolo con la misma red funcionando sin contaminación armónica.

Se han escrito además varias rutinas en el programa MATLAB, con la finalidad de automatizar la simulación, extraer los resultados y procesarlos. Este programa sirvió de apoyo en la interpretación de los datos de las distintas simulaciones realizadas.

6.1. Introducción al software OpenDSS

OpenDSS es un software desarrollado por Electroteck Concepts, Inc. en el año 1997, y distribuido libremente por EPRI (Electric Power Research Institute a partir del año 2008, para el estudio de sistemas de distribución de energía eléctrica [45].

El software ofrece multitud de posibilidades como la búsqueda de fallos en una red eléctrica, el estudio del efecto del flicker, el análisis de cortocircuito, o el análisis armónico, entre otros. Una de sus principales ventajas es la posibilidad de integración con diferentes entornos de programación como Python, C++, Java o MATLAB [46].

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado la versión del software OpenDSS 9.2.0.1.

6.2. Modelado de la red con el software OpenDSS

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, el modelo utilizado en la simulación pertenece a uno propuesto por el Electrical Power Research Institute (EPRI) con topología coincidente con las redes de distribución de uso en Europa. Se trata de un modelo de red europea de baja tensión con alimentación a 416 V y una serie de



cargas con perfiles temporales de 24 horas con datos de demanda de potencia minuto a minuto, de forma que cada una de ellas simula las diferentes cargas presentes en una vivienda y la variación en la demanda del conjunto.

El modelo consta de una subestación formada por un transformador de potencia que convierte los 11 kV de tensión nominal de la red de transporte en los 416 V que alimentan a los usuarios, en concreto a un total de 55 cargas lineales.

Se comienza definiendo la alimentación del circuito, el cual comienza en la primera barra del sistema "Sourcebus", como una fuente de tensión con una impedancia, la cual viene dada por las corrientes de cortocircuito. Se fija la frecuencia fundamental en 50 Hz.

```
clear
New circuit.ModeloEU_LIN Basekv=11 angle=0 pu=1.05 phases=3 ISC3=5000 ISC1=5 frequency=50 bus1=Sourcebus
set BaseFrequency=50
set DefaultBaseFrequency=50
```

Seguidamente se define el transformador de potencia entre la barra "Sourcebus" y la barra 1, el cual reducirá la tensión de entrada de 11 kV a 416 V. El transformador tendrá dos devanados con conexión triángulo estrella.

```
New transformer.Tr1 phases=3 winding=2 conns='delta wye' buses={Sourcebus 1}
~ kvs="11 0.416" kvas={800 800} XHL=4 %R=0.4
```

A continuación, se definen las líneas y sus códigos, y las cargas y sus perfiles de potencia haciendo uso del comando *Redirect*. Esto permite importar directamente los ficheros de texto en los que se contienen sus datos.

```
Redirect LineCode_EU.txt
```

```
Redirect Line_EU.txt
```

```
Redirect LoadShapes_eu.txt
```

```
Redirect Loads_eu.txt
```

Se muestra a continuación parte de los ficheros que contienen esta información.

 LineCode_EU: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
New LineCode.2c_.007,nphases=3,3.97,0.099,3.97,0.099,0,0,km
New LineCode.2c_.0225,nphases=3,1.257,0.085,1.257,0.085,0,0,km
New LineCode.2c_16,nphases=3,1.15,0.088,1.2,0.088,0,0,km
New LineCode.35_SAC_XSC,nphases=3,0.868,0.092,0.76,0.092,0,0,km
```



*Line_EU: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
New Line.LINE1,1,2,Phases=3,1.098,units=m,LineCode=4c_70
New Line.LINE2,2,3,Phases=3,0.11511,units=m,LineCode=4c_70
New Line.LINE3,3,4,Phases=3,0.10784,Units=m,LineCode=4c_70
New Line.LINE4,4,5,Phases=3,0.094021,Units=m,LineCode=4c_70
```

LoadShapes_eu: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
New LoadShape.Shape_1,npts=1440,mininterval=1,csvfile=Load_profile_1.csv,UseActual=TRUE
New LoadShape.Shape_2,npts=1440,mininterval=1,csvfile=Load_profile_2.csv,UseActual=TRUE
New LoadShape.Shape_3,npts=1440,mininterval=1,csvfile=Load_profile_3.csv,UseActual=TRUE
New LoadShape.Shape_4,npts=1440,mininterval=1,csvfile=Load_profile_4.csv,UseActual=TRUE
```

Loads_eu: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
New load.LOAD1,Phases=1,Bus1=34.1,Kv=0.23,model=1,Conn=wye,kw=1,Pf=0.95,Daily=Shape_1
New load.LOAD2,Phases=1,Bus1=47.2,Kv=0.23,model=1,Conn=wye,kw=1,Pf=0.95,Daily=Shape_2
New load.LOAD3,Phases=1,Bus1=70.1,Kv=0.23,model=1,Conn=wye,kw=1,Pf=0.95,Daily=Shape_3
New load.LOAD4,Phases=1,Bus1=73.1,Kv=0.23,model=1,Conn=wye,kw=1,Pf=0.95,Daily=Shape_4
```

En la definición de las cargas se especifica la barra y fase a la que van conectadas. Los perfiles de potencia de las cargas se definen en los *LoadShapes*, y a su vez se llama a una serie de ficheros *Load_profile_x.csv* que contienen los datos horarios de potencia de cada una de las cargas. Estos valores, denominados multiplicadores, sustituirán al campo “kw=1” de cada una de las cargas con los valores horarios. A continuación, se muestra un ejemplo de perfil de potencia de una de las cargas.

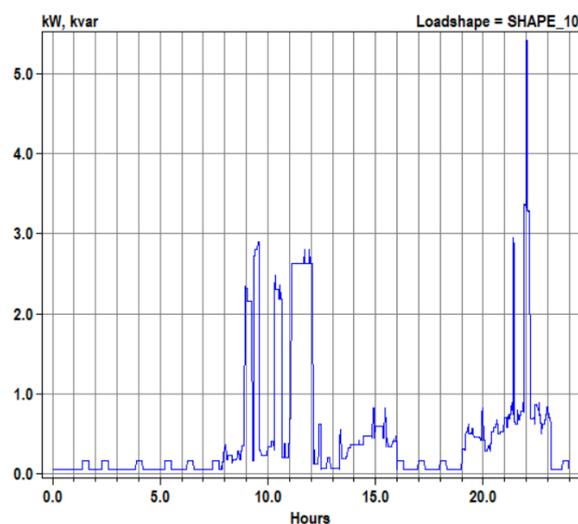


Fig. 13. Perfil horario de potencia de una carga lineal del modelo utilizado en la simulación

Una vez definidos todos estos elementos se ejecuta el comando *CalcV* para estimar la tensión de base de cada una de las barras del sistema.



```
Set tolerance = 0.001  
Set voltagebases=(11 0.416)  
calcV
```

A continuación, se definen las coordenadas de las distintas barras del sistema haciendo uso del comando específico para ello *BusCoords*, el cual importará un fichero *.csv* con esta información, y asociará cada coordenada a las barras ya definidas previamente.

```
BusCoords Buscoords.csv
```

Finalmente, se procede a la resolución del sistema en el modo *Daily* con intervalos de una hora. Esto permite realizar un análisis para cada hora del día. En este caso, al tratarse de un sistema no muy complejo se ha optado por aplicar un algoritmo de iteración normal, más rápido e igual de fiable en este tipo de sistemas, en vez del algoritmo de Newton apropiado para sistemas más complejos.

```
Set algorithm=normal  
Set mode=daily  
Set hour=0  
Set stepsize=1h  
Set number=1  
Solve
```

Una vez ejecutado el script es posible obtener el diagrama unifilar del sistema, mostrado a continuación.

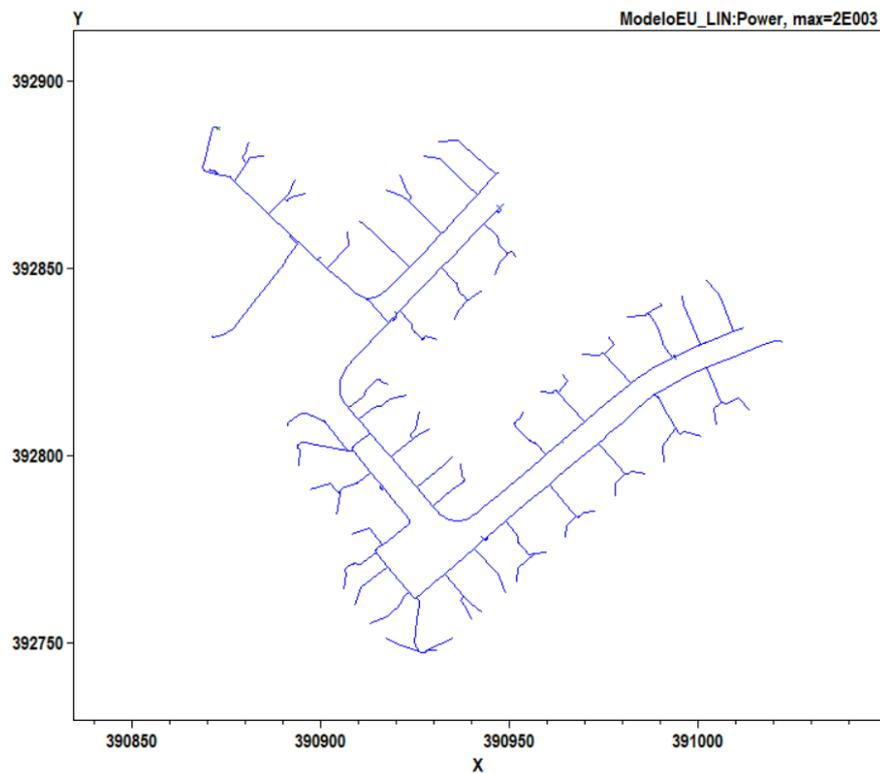


Fig. 14. Diagrama unifilar de la red eléctrica utilizada en la simulación



A continuación, se modificará la red conectando una serie de cargas no lineales correspondientes a cargadores de vehículos eléctricos (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicles). Se tomado como referencia un modelo del vehículo eléctrico Nissan LEAF.

Este modelo de vehículo eléctrico tiene varios modos de carga disponibles, en función de la potencia requerida. Para su implementación en la red se han escogido tres niveles de carga representativos, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 20. Niveles de carga considerados del vehículo eléctrico Nissan LEAF

Nivel	Tiempo (h)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Potencia (kW)	Tipo
1	6 – 8	8	240	1,92	Monofásico
2	3 – 4	32	240	7,68	Monofásico
3	2 – 3	16	400	11	Trifásico

También hay que considerar para el análisis el espectro de frecuencias tipo de este tipo de cargas. Concretamente, para un vehículo eléctrico Nissan LEAF este puede aproximarse a:

Tabla 21. Espectro armónico del cargador de un vehículo eléctrico Nissan LEAF [47]

Orden armónico	Magnitud (%)	Ángulo de desfase (°)
1	100,00	-26,00
3	25,00	-94,00
5	17,00	-96,00
7	14,20	-72,00
9	9,69	-68,00
11	5,04	-49,00
13	1,80	-49,00

Se han incorporado una serie de cargas PHEV en el modelo en sus tres niveles de carga disponibles y se han distribuido de forma espaciada en barras donde hay presencia de las cargas lineales del modelo.



Se han definido en primer lugar los perfiles de potencia de las cargas PHEV para cada nivel.

```
New LoadShape.Shape_PHEVL1,npts=48,mininterval=30,csvfile=Load_profile_PHEVL1.csv,UseActual=True  
New LoadShape.Shape_PHEVL2,npts=48,mininterval=30,csvfile=Load_profile_PHEVL2.csv,UseActual=True  
New LoadShape.Shape_PHEVL3,npts=48,mininterval=30,csvfile=Load_profile_PHEVL3.csv,UseActual=True
```

Para la construcción de los perfiles se ha considerado las 21:00 como hora común de puesta a carga del vehículo eléctrico. Esta hora equivale a la hora 22 de la simulación en el programa, ya que es la hora que va desde las 21:01 hasta las 22:00. Además, muchos de los resultados obtenidos después se centrarán precisamente en esta hora, al tratarse de una hora punta de consumo. En el siguiente gráfico se puede observar la demanda de potencia del modelo original previo a conectar las cargas PHEV.

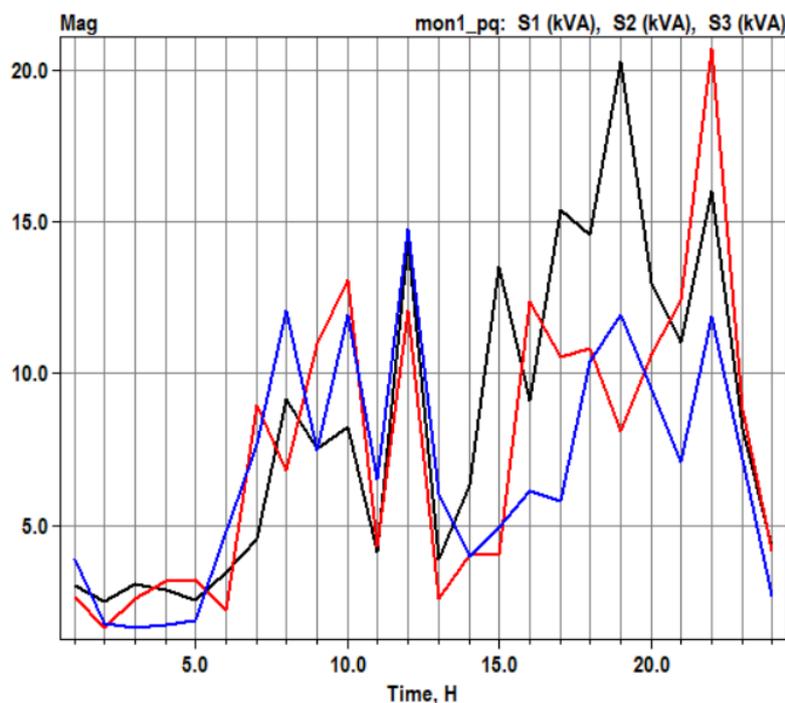


Fig. 15. Demanda horaria de potencia de la red eléctrica utilizada en la simulación

Seguidamente se han definido las cargas PHEV. Se ha decidido distribuir 15 cargas de este tipo, por lo que se ha definido un total de 45 cargas en el programa (15 líneas de código para cada nivel de carga). Para las cargas monofásicas (primer y segundo nivel) se ha tenido en cuenta la fase de conexión para no provocar desequilibrios en la red. Se muestra a modo de ejemplo el código para las cargas del primer nivel.



```
// Nivel 1  
New load.PHEV1_L1, Phases=1, Bus1=34.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV2_L1, Phases=1, Bus1=73.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV3_L1, Phases=1, Bus1=208.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV4_L1, Phases=1, Bus1=248.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV5_L1, Phases=1, Bus1=276.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV6_L1, Phases=1, Bus1=320.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV7_L1, Phases=1, Bus1=342.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV8_L1, Phases=1, Bus1=406.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV9_L1, Phases=1, Bus1=502.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV10_L1, Phases=1, Bus1=676.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV11_L1, Phases=1, Bus1=701.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV12_L1, Phases=1, Bus1=780.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV13_L1, Phases=1, Bus1=817.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV14_L1, Phases=1, Bus1=886.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1  
New load.PHEV15_L1, Phases=1, Bus1=900.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1, Pf=0.95, Daily=Shape_PHEVL1
```

En un primer lugar se ha realizado un análisis no armónico para observar el comportamiento horario del modelo original y la contribución lineal de las cargas no lineales en la red con el modo *Daily*. Por este motivo no se ha incluido en esta primera simulación el espectro armónico de estas cargas.

Se puede observar en la siguiente imagen la subestación de transformación, resaltada en verde, y la distribución de las cargas no lineales PHEV, resaltadas en rojo, en el diagrama unifilar de la red.

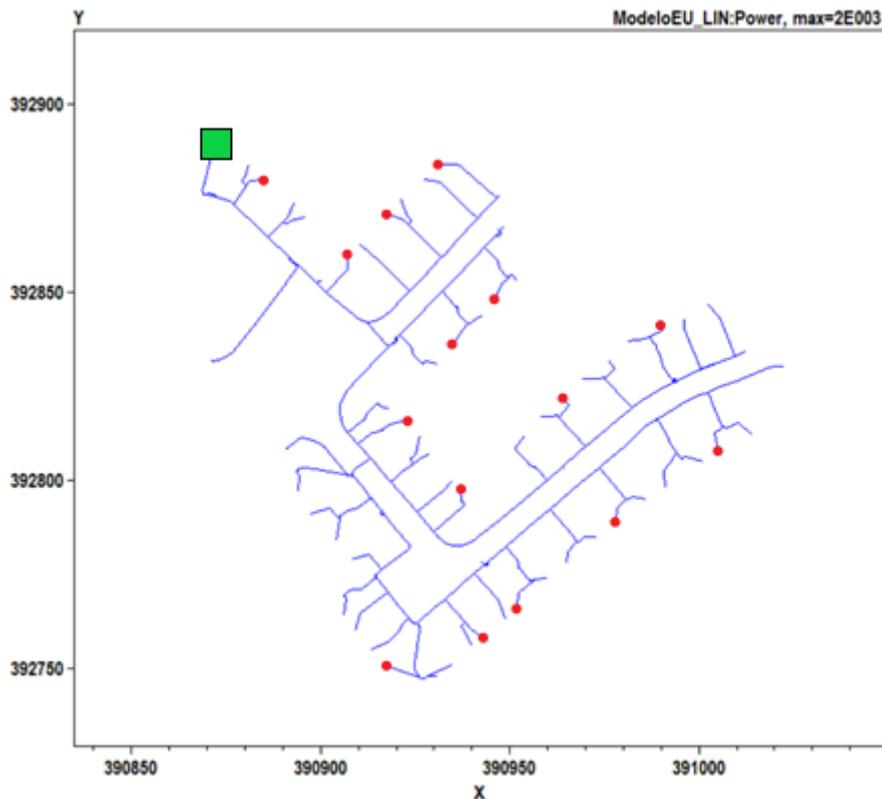


Fig. 16. Diagrama unifilar de la red eléctrica utilizada en la simulación resaltando las cargas PHEV no lineales



En el análisis armónico, la forma de elaborar la simulación difiere de la anterior, por lo que se han tenido que realizar modificaciones en el script. En primer lugar, la simulación ha sido estática en el tiempo, por lo que no se han tenido en cuenta los perfiles de potencia de las cargas. Para comparar valores con el caso lineal de la simulación anterior, se han modificado en primer lugar las cargas del modelo original y se les ha asignado un valor de potencia constante, correspondiente al demandado en la hora 22.

Se ha añadido el espectro armónico de las cargas no lineales PHEV.

```
New Spectrum.Spec_PHEV
~ Numharm=7
~ Harmonic=[1 3 5 7 9 11 13]
~ %mag=[100.00 25.00 17.00 14.20 9.69 5.04 1.80]
~ Angle=[-26.00 -94.00 -96.00 -72.00 -68.00 -49.00 -49.00]
```

Se han redefinido las cargas no lineales eliminando el perfil de potencia, añadiendo una potencia constante del valor de la especificada en los niveles de carga, e incluyendo el espectro armónico definido previamente. Se muestra a modo de ejemplo el código para las cargas del primer nivel.

```
// Nivel 1
New load.PHEV1_L1, Phases=1, Bus1=34.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV2_L1, Phases=1, Bus1=73.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV3_L1, Phases=1, Bus1=208.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV4_L1, Phases=1, Bus1=248.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV5_L1, Phases=1, Bus1=276.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV6_L1, Phases=1, Bus1=320.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV7_L1, Phases=1, Bus1=342.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV8_L1, Phases=1, Bus1=406.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV9_L1, Phases=1, Bus1=502.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV10_L1, Phases=1, Bus1=676.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV11_L1, Phases=1, Bus1=701.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV12_L1, Phases=1, Bus1=780.3, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV13_L1, Phases=1, Bus1=817.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV14_L1, Phases=1, Bus1=886.2, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
New load.PHEV15_L1, Phases=1, Bus1=900.1, Kv=0.24, model=1, Conn=wye, kw=1.92, Pf=0.95, Spectrum=Spec_PHEV
```

Finalmente, se procede a la resolución del sistema con el modo *harmonics*. Es necesario inicializar una solución previa con el modo *snapshot* que hace que el problema converja.

```
Set algorithm=normal
Set mode=snapshot
Solve
Set mode=harmonics
Solve
```

En ambos tipos de análisis se han colocado una serie de medidores distribuidos en puntos estratégicos de la red, para obtener los resultados de interés en la simulación. Se ha colocado, por un lado, un *Energymeter* en cabecera de la red, concretamente en la línea 1, para poder estudiar la caída de tensión en función de la distancia, y por otro varios *Monitors* en líneas y en cargas para extraer los valores de potencia, intensidad de corriente y tensión en estos puntos.



Adicionalmente, se ha elaborado un programa en MATLAB capaz de procesar e interpretar los ficheros de datos .csv de los monitores exportados desde el OpenDSS, para poder obtener los gráficos del espectro armónico de las cargas PHEV, sus ondas de tensión y corriente, y también para automatizar cálculos a partir de esos datos como el valor de corriente y tensión eficaces o la tasa de distorsión armónica.

Todos los resultados de la simulación se realizarán considerando que todas las cargas PHEV funcionan en un mismo nivel de carga simultáneamente, es decir, jamás se mezclarán unos niveles de carga con otros. Esto tiene como objetivo comparar las condiciones más extremas de la red. Además, teniendo en cuenta que en el primer nivel de carga los vehículos eléctricos tardan como mucho 8 horas en cargarse completamente, cabe lógico esperar que, enchufándolos al cargador por la noche, se aproveche para cargarlos a la mínima potencia disponible, ya que daría tiempo de igual forma a tenerlos cargados en su totalidad a primera hora de la mañana. Por otro lado, difícilmente se va a dar la situación en la que todos los usuarios de vehículos eléctricos los carguen simultáneamente a máxima potencia, necesitando tenerlo cargado en 3 horas como máximo, pero la red ha de estar preparada para dicha situación, por lo que el análisis se realiza también en estas condiciones llevándola al extremo.

6.3. Resultados de la simulación

A continuación, se muestran los resultados de interés tras realizar varias simulaciones del modelo. Se analizan la caída de tensión a lo largo de la línea, los perfiles de las cargas no lineales PHEV, las tasas de distorsión armónica THD, TDD e individual, las pérdidas de potencia, el factor de potencia, y finalmente, los desequilibrios de corriente en el conductor neutro. Se compararán los valores para cada estado de carga de la red.

6.3.1. Caída de tensión

Se comienza comparando la caída de tensión a lo largo de la línea con el fin de determinar su valor en el punto más lejano a la subestación. Este perfil varía para cada hora del día, y es por ello que se toma la hora 22 como referencia por los motivos



explicados en el apartado anterior. En esta primera gráfica se observa el perfil de tensión de las tres fases del sistema a lo largo de la línea teniendo en cuenta solo la demanda de las cargas lineales del modelo original.

En los gráficos obtenidos con el software OpenDSS, la línea de color negro corresponde a la fase *r*, la de color rojo a la fase *s* y la de color azul a la fase *t*.

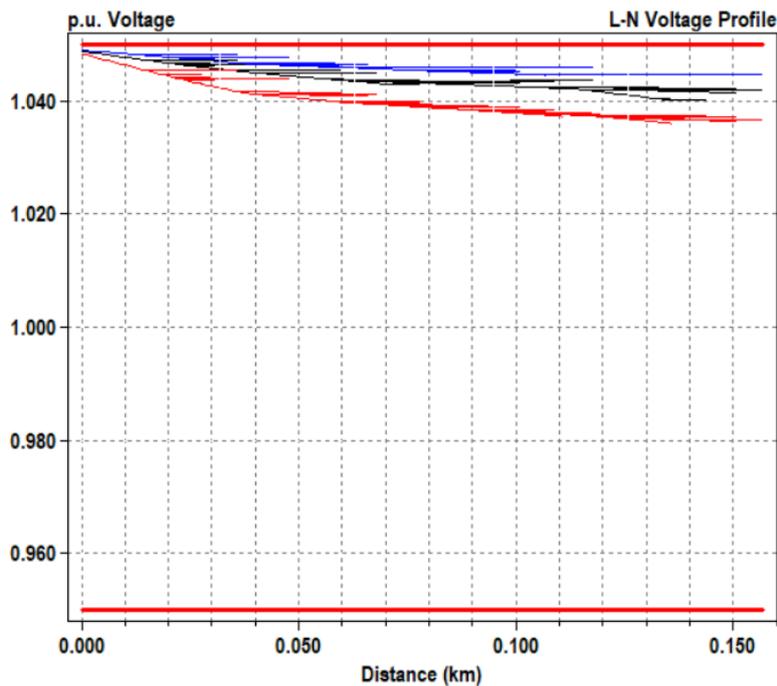


Fig. 17. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea sin cargas PHEV

A continuación, se conectan las cargas no lineales PHEV en sus distintos niveles de carga. En este caso, en los gráficos no está representado el contenido armónico de estas cargas, debido a las limitaciones del software OpenDSS, pero se aprecia aún así la notable caída de tensión que se produciría en una red en caso de conectarle este tipo de cargas de elevada potencia.

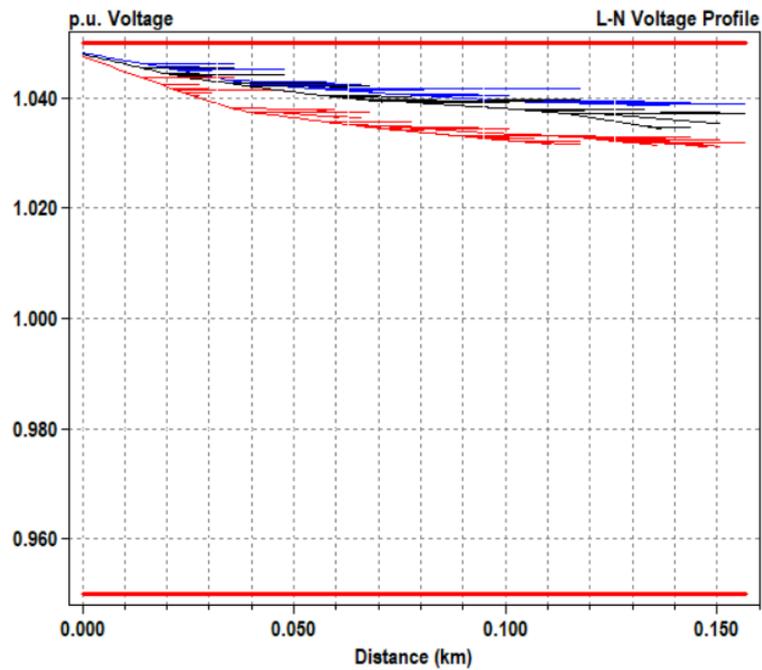


Fig. 18. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea conectando cargas PHEV en su primer nivel de carga

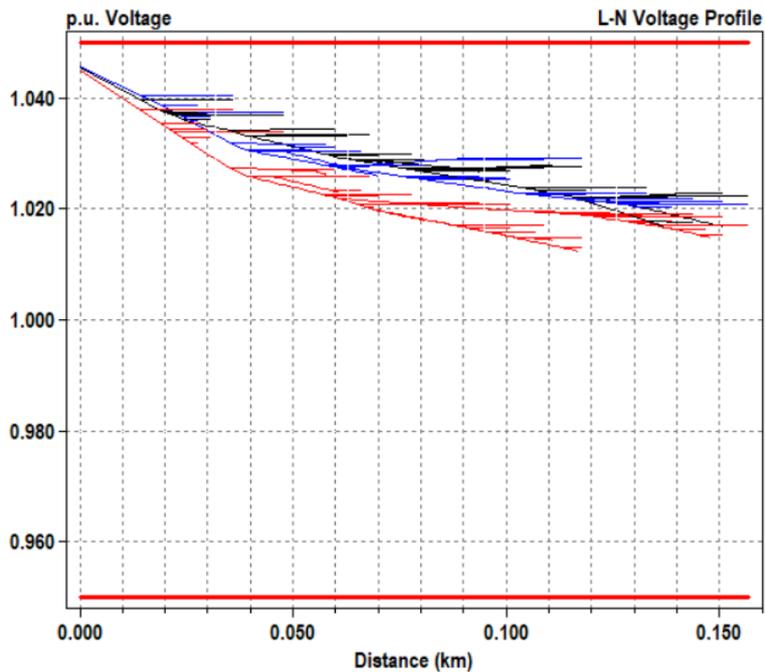


Fig. 19. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea conectando cargas PHEV en su segundo nivel de carga

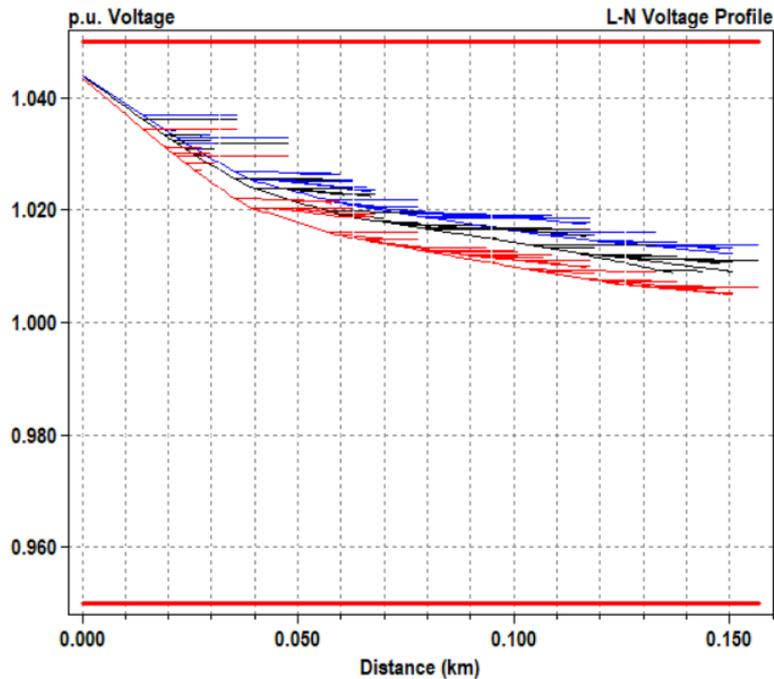


Fig. 20. Perfil de tensiones en función de la distancia de las barras a la cabecera de la línea conectando cargas PHEV en su tercer nivel de carga

Se observa como cuanto mayor es la energía demandada por las cargas no lineales, mayor es la caída de tensión a lo largo de la línea. En el caso de las cargas trifásicas, estas demandan una potencia superior a la de las cargas monofásicas, pero al distribuirse la corriente entre las tres fases, se disminuye su impacto en la red. Es por ello que es de vital importancia distribuir las cargas monofásicas en la red eléctrica equitativamente en las distintas fases de las barras.

Como se indicó anteriormente, las cargas PHEV en el segundo nivel de carga demandan una potencia de 7,68 kW con una intensidad de corriente de 32 A por su única fase. Por el contrario, las cargas PHEV en el tercer nivel de carga demandan una potencia de 11 kW con una intensidad de corriente de 16 A por cada una de sus tres fases. Esto provoca una menor caída de tensión por fase, pero con la diferencia de que ésta se produce en las tres fases por igual.

A continuación, se calcula el valor de caída de tensión ΔV (%) en la red entre la subestación, a la salida del transformador, y el punto más lejano a este. Se comienza calculando cuando las cargas PHEV no tienen influencia y, posteriormente, teniendo en cuenta su presencia en cada uno de los tres niveles de carga.



El procedimiento de cálculo comienza calculando la tensión compleja en cada uno de los puntos considerados.

$$V_{n_k} = V_k \cdot e^{\frac{j \cdot \theta \cdot \pi}{180}} \quad (54)$$

Seguidamente se calcula la caída de tensión para cada frecuencia.

$$\Delta V (\%)_k = \sqrt{3} \cdot \frac{|V_{1k} - V_{2k}|}{416 V} \quad k = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 \quad (55)$$

Finalmente, la caída de tensión total equivale al valor eficaz de la caída de tensión en cada una de las componentes armónicas.

$$\Delta V (\%) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \Delta V (\%)_k^2} \quad (56)$$

En la siguiente tabla se recogen los valores de tensión de las dos barras consideradas, y la caída de tensión entre ellas.

Tabla 22. Valor eficaz de tensión en cada barra considerada por fase

Estado	Tensión V1 L-N (V)			Tensión V2 L-N (V)		
	r	s	t	r	s	t
Cargas Lineales	251,89 (-30,1)	251,78 (-150,2)	251,94 (89,9)	250,24 (-30)	249,01 (-150,1)	250,94 (89,8)
CL + PHEV Nivel 1	251,67	251,56	251,72	248,95	247,67	249,42
CL + PHEV Nivel 2	251,09	250,97	251,13	245,46	244,16	245,15
CL + PHEV Nivel 3	250,72	250,61	250,77	242,85	241,64	243,53



Se muestran a continuación las tablas con los valores de la diferencia de tensión en valor absoluto entre las dos barras, en función de cada armónico, utilizados para calcular la caída de tensión entre ambas.

Tabla 23. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica sin cargas PHEV conectadas

Cargas Lineales			
Orden	$\Delta(V1-V2)$ L-N (V)		
	r	s	t
1	1,707	2,804	1,092
	ΔV (%)		
	0,711	1,168	0,455

Tabla 24. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica con las cargas PHEV conectadas en el primer nivel de carga

Cargas Lineales + PHEV Nivel 1			
Orden	$\Delta(V1-V2)$ L-N (V)		
	r	s	t
1	2,860	3,922	2,315
3	0,828	0,831	0,869
5	0,481	0,538	0,082
7	0,525	0,750	0,470
9	0,524	0,534	0,540
11	0,569	0,500	0,405
13	0,285	0,447	0,335
	ΔV (%)		
	1,320	1,749	1,094



Tabla 25. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica con las cargas PHEV conectadas en el segundo nivel de carga

Cargas Lineales + PHEV Nivel 2			
Orden	$\Delta(V1-V2)$ L-N (V)		
	r	s	t
1	5,753	6,947	6,053
3	3,531	3,557	3,676
5	0,415	0,741	0,830
7	1,210	1,266	1,140
9	1,815	1,837	1,881
11	0,804	0,769	0,766
13	0,300	0,396	0,369
	ΔV (%)		
	2,980	3,413	3,127

Tabla 26. Diferencia de tensión en cada armónico y caída de tensión en el punto más lejano de la red en cada fase y para cada componente armónica con las cargas PHEV conectadas en el tercer nivel de carga

Cargas Lineales + PHEV Nivel 3			
Orden	$\Delta(V1-V2)$ L-N (V)		
	r	s	t
1	8,131	9,146	7,371
3	5,137	5,131	5,160
5	0,896	1,053	1,149
7	1,606	1,734	1,486
9	2,570	2,595	2,596
11	1,046	0,942	0,928
13	0,351	0,396	0,396
	ΔV (%)		
	4,239	4,596	3,999



Como ya se observó en los gráficos previos, se produce un aumento en la caída de tensión entre ambos puntos de la red eléctrica tras conectar las cargas no lineales PHEV.

6.3.2. Perfil de las cargas PHEV

Se compara a continuación el espectro armónico y las ondas de corriente y tensión para cada uno de los tres niveles de carga de las cargas PHEV. Se han tomado además como referencia tres cargas en cada nivel de carga en función de su distancia a la subestación para observar su influencia en los perfiles. En primer lugar, se ha tomado la carga más cercana, correspondiente a la *PHEV1_Lx*, se ha tomado una carga intermedia *PHEV7_Lx*, y finalmente, se ha tomado la carga más lejana, correspondiente a la *PHEV14_Lx*.

Para los dos primeros niveles de carga es imperceptible la variación en las ondas en función de la distancia, y es por esto, que solo se representa para una de las cargas, concretamente la intermedia. En el tercer nivel esta variación es algo más notable, aunque no demasiado, y se representan los perfiles de las tres cargas.

- Para el primer nivel de carga:

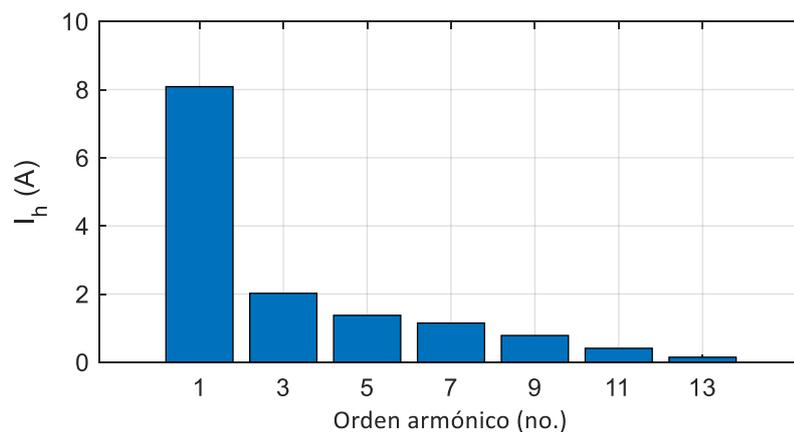


Fig. 21. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga

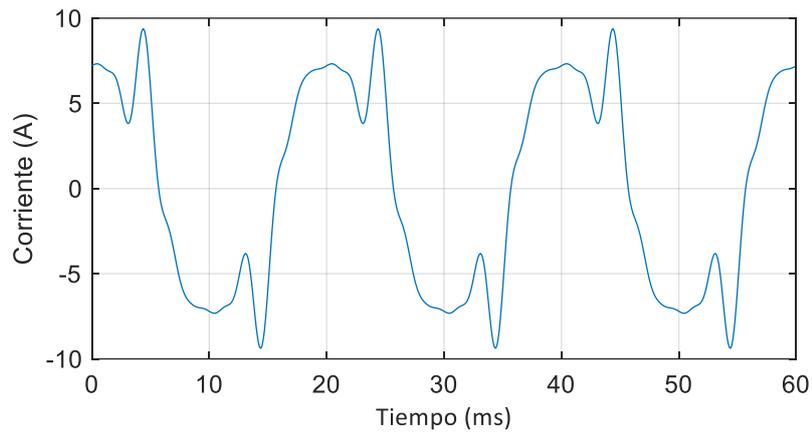


Fig. 22. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga

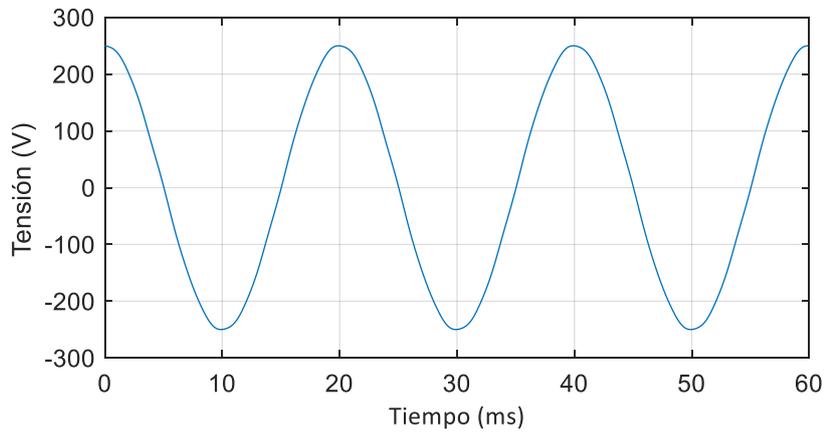


Fig. 23. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga

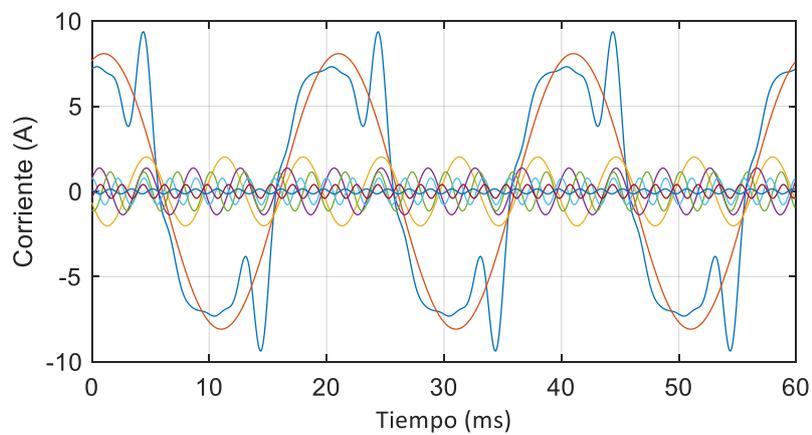


Fig. 24. Descomposición de la onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su primer nivel de carga



Como se observará en los gráficos de los sucesivos niveles de carga, la forma de onda de la intensidad de corriente demandada por estas cargas es similar en todos ellos. Es por ello que solo se muestra a modo de ejemplo la descomposición de esta onda para la carga PHEV7 en el primer nivel de carga en la Fig. 24, en la que se observa de forma clara la onda fundamental de corriente y su contenido armónico.

- Para el segundo nivel de carga:

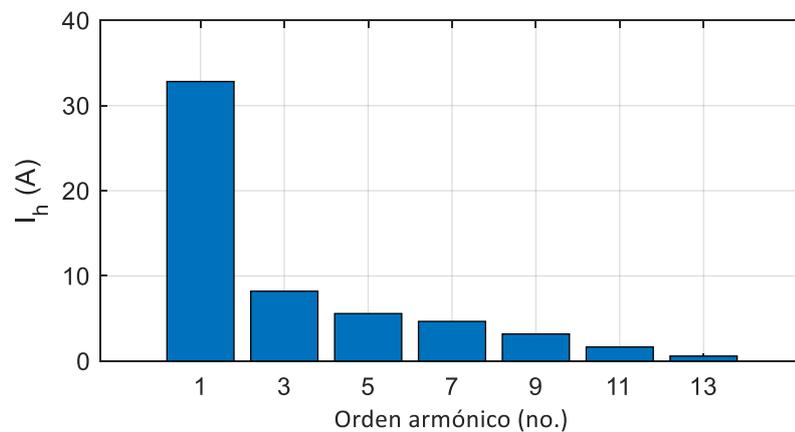


Fig. 25. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV7 en su segundo nivel de carga

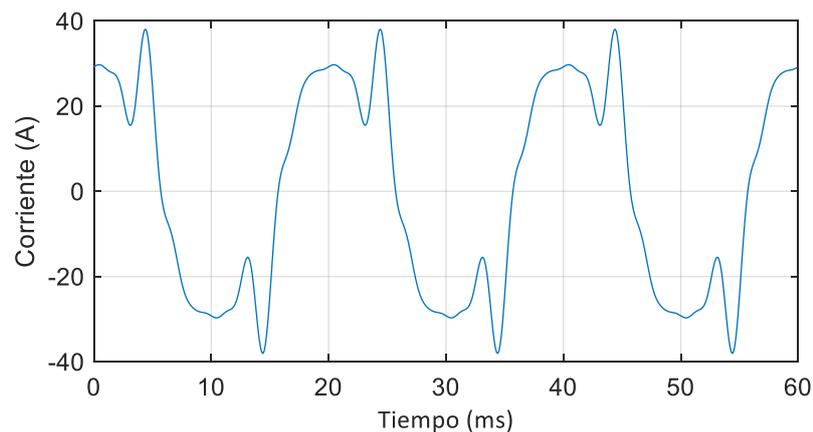


Fig. 26. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su segundo nivel de carga

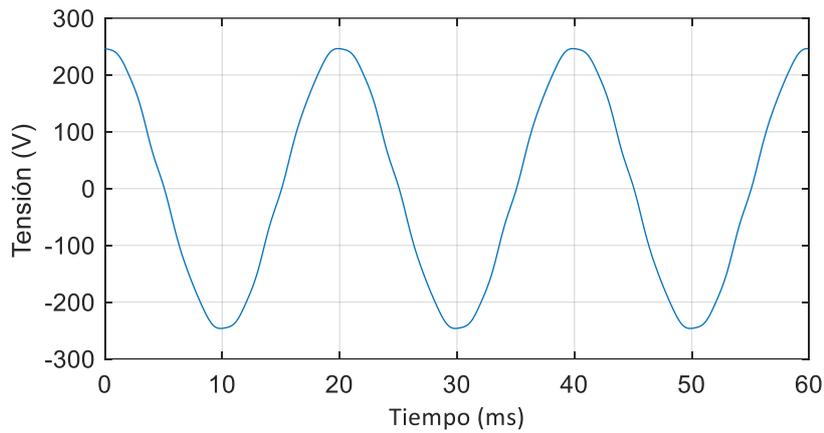


Fig. 27. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV7 en su segundo nivel de carga

Se observa en el espectro armónico y en la onda de corriente un incremento en la intensidad de corriente, ya que estas cargas demandan 32 A en su única fase, y también un incremento proporcional de sus armónicos. Las formas de onda de la corriente y de la tensión se mantienen prácticamente iguales.

- Para el tercer nivel de carga:

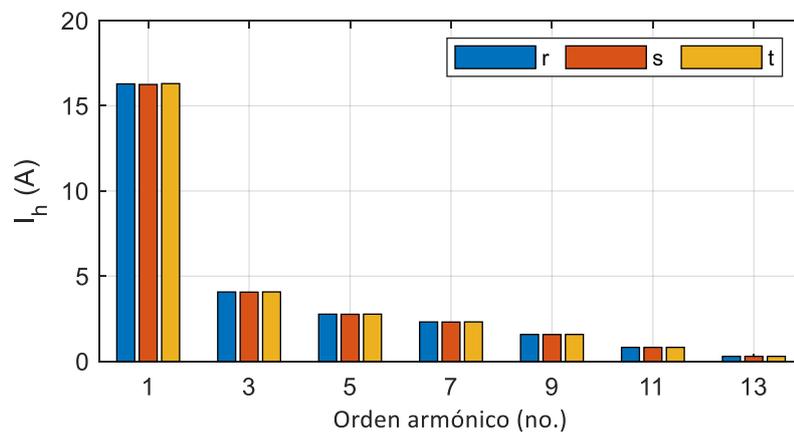


Fig. 28. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV1 en su tercer nivel de carga

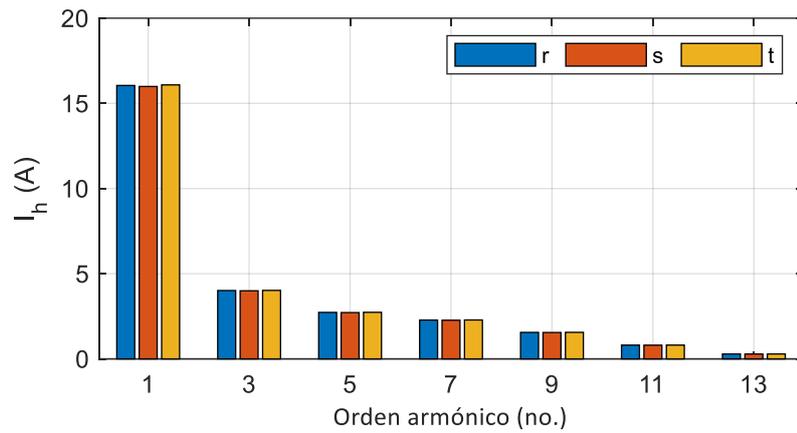


Fig. 29. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV7 en su tercer nivel de carga

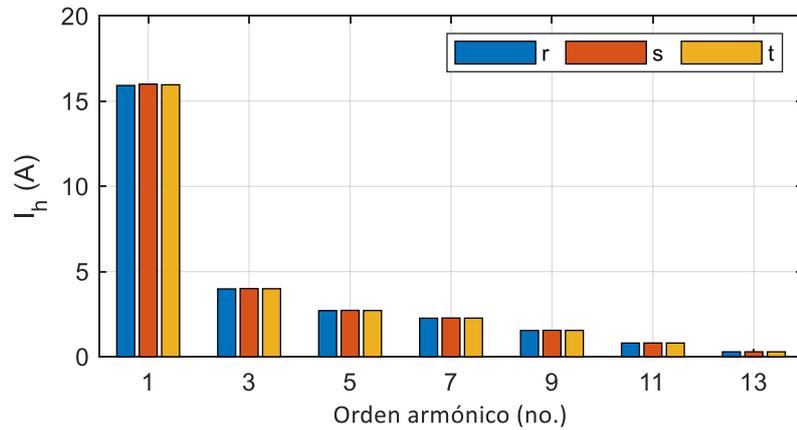


Fig. 30. Espectro armónico de la carga no lineal PHEV14 en su tercer nivel de carga

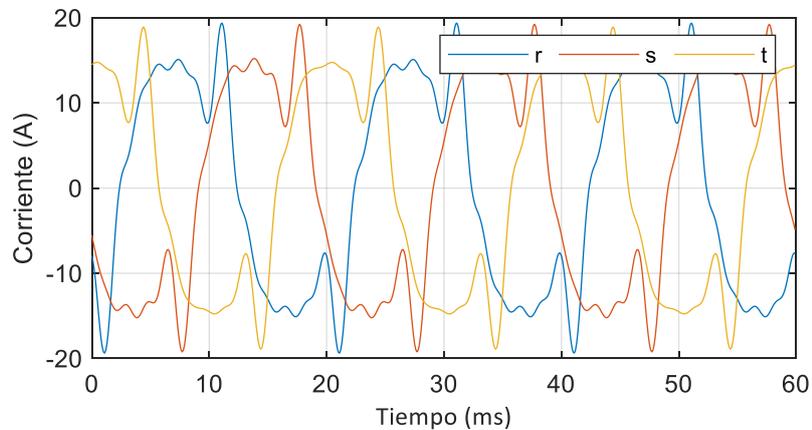


Fig. 31. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV1 en su tercer nivel de carga

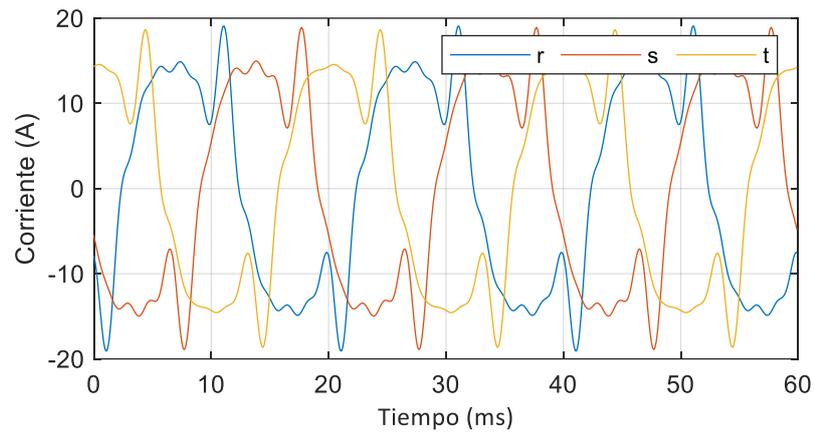


Fig. 32. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV7 en su tercer nivel de carga

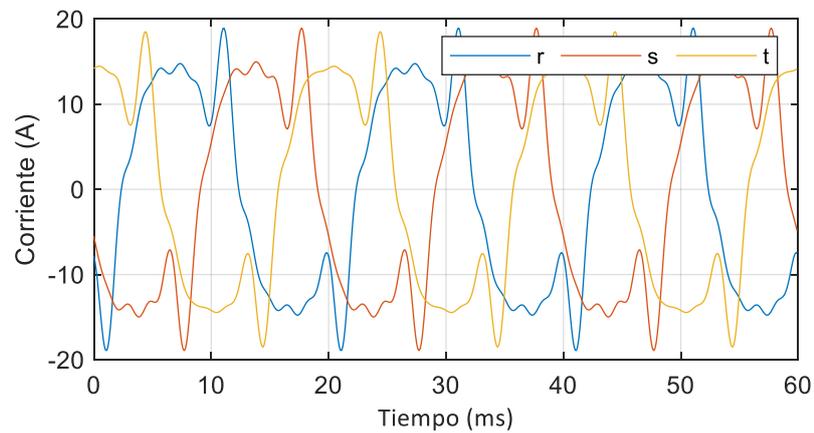


Fig. 33. Onda de corriente de la carga no lineal PHEV14 en su tercer nivel de carga

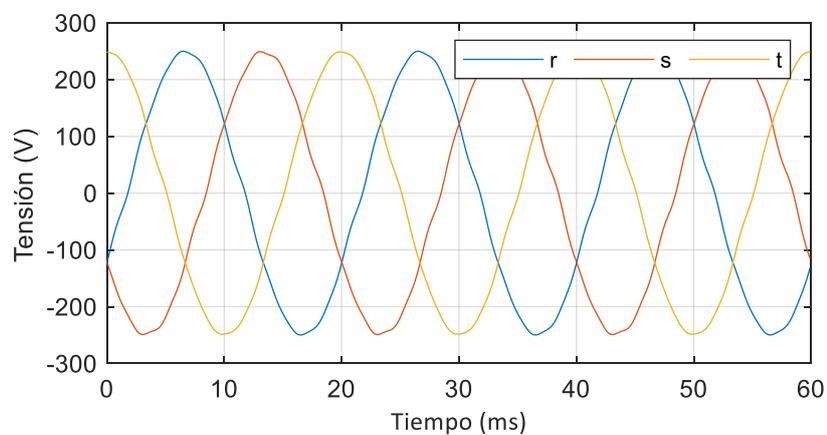


Fig. 34. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV1 en su tercer nivel de carga

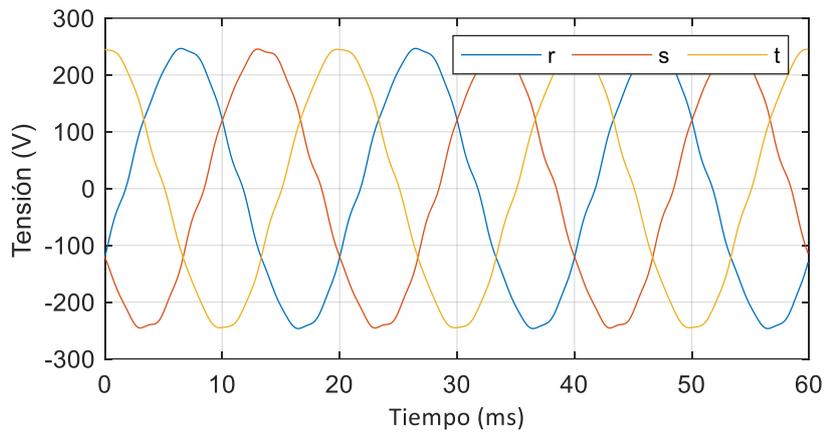


Fig. 35. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV7 en su tercer nivel de carga

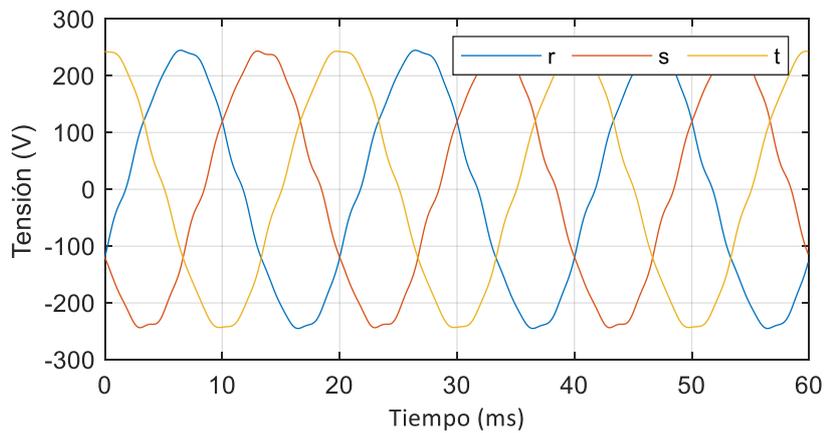


Fig. 36. Onda de tensión de la carga no lineal PHEV14 en su tercer nivel de carga

Si se observan en detalle los valores del espectro armónico, se pueden observar ligeras variaciones en la componente fundamental de corriente entre la carga PHEV1 y la carga PHEV14, debido a la variación de distancia entre estas y la subestación.

En las ondas de tensión se aprecia una pequeña deformación que aumenta con la distancia a la subestación y, si se analizan los valores numéricos, se observa una caída de tensión. La circulación de las corrientes distorsionadas se ve reflejada de esta manera en las tensiones, debido a la caída de tensión que produce cada componente armónico h a su paso por cada tramo de línea que conecta los nudos k y h :

$$V_{kh} = V_{ih} - z_{kih} \cdot I_h \quad (57)$$



6.3.3. Distorsión Armónica

Se analiza a continuación el espectro armónico y las ondas de corriente y de tensión en el Punto Común de Acoplamiento (PCC) de la red para cada uno de los tres niveles de carga, con el fin de obtener la tasa armónica de distorsión global (THD) de la corriente y de tensión en dicho punto, la Distorsión de Demanda Total (TDD), y la tasa armónica de distorsión individual de la corriente.

Las tasas de distorsión armónica individual y global se calculan en cada una de las fases como se indicó en las ecuaciones (19) y (20), respectivamente, considerando los módulos de corriente y de tensión para cada una de las frecuencias armónicas presentes en las ondas.

La TDD se calcula mediante la ecuación (21). La intensidad de corriente para un estado de carga máxima en la red se calcula como la máxima intensidad de corriente que puede suministrar el transformador, esto es:

$$I_L = \frac{S_{n\ trafo}}{\sqrt{3} \cdot V_{2n\ trafo}} \quad (58)$$

La potencia nominal del transformador del modelo tiene un valor de 0,8 MVA, y la tensión nominal a la salida es de 416 V.

- Para el primer nivel de carga:

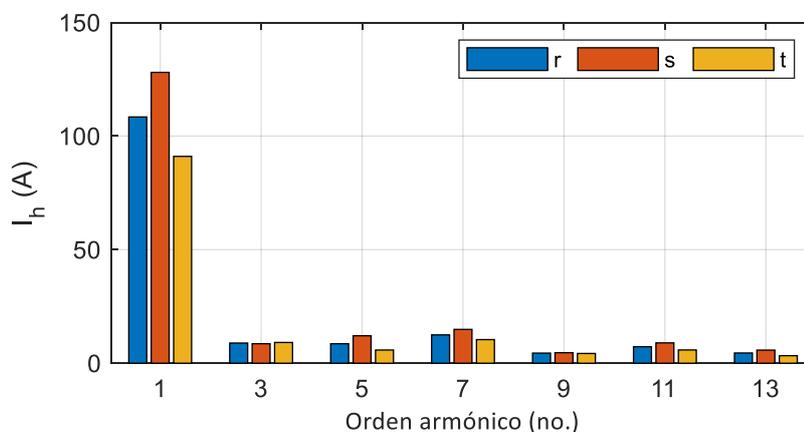


Fig. 37. Espectro armónico en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga



Tabla 27. Tasa armónica de distorsión global en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga

Fase	THD _i (%)	THD _v (%)	TDD (%)
r	18,47	0,59	1,80
s	18,76	0,72	2,16
t	18,66	0,49	1,53
Valor medio	18,63	0,60	1,83

Tabla 28. Tasa armónica de distorsión individual en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga

Orden armónico	Tasa de distorsión armónica individual (%)		
	r	s	t
3	8,19	6,71	10,03
5	7,93	9,45	6,38
7	11,50	11,63	11,42
9	4,11	3,62	4,72
11	6,71	6,99	6,41
13	4,15	4,51	3,65

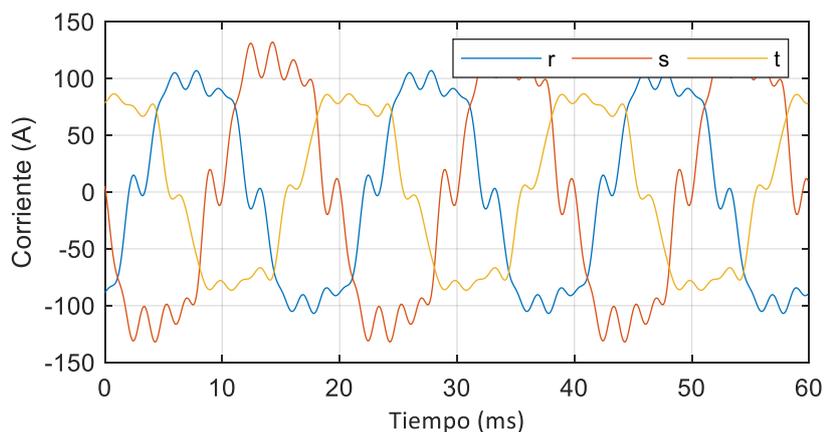


Fig. 38. Onda de corriente en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga

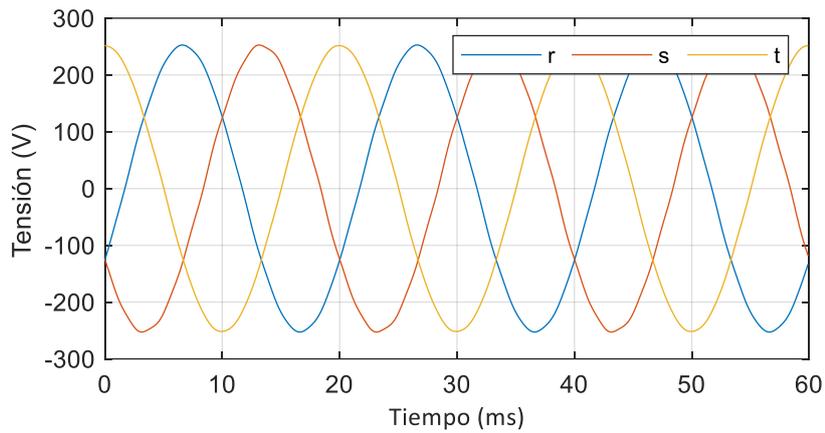


Fig. 39. Onda de tensión en el PCC con las cargas PHEV en el primer nivel de carga

- Para el segundo nivel de carga:

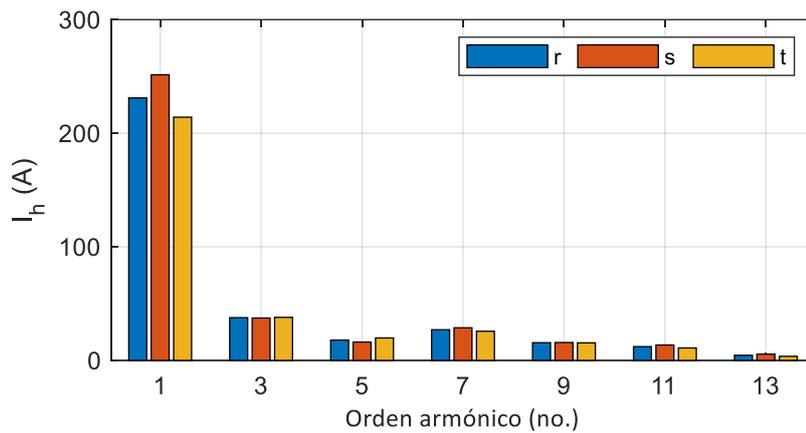


Fig. 40. Espectro armónico en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga

Tabla 29. Tasa armónica de distorsión global en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga

Fase	THD _i (%)	THD _v (%)	TDD (%)
r	23,19	1,22	4,83
s	21,56	1,28	4,88
t	24,97	1,19	4,82
Valor medio	23,24	1,23	4,84



Tabla 30. Tasa armónica de distorsión individual en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga

Orden armónico	Tasa de distorsión armónica individual (%)		
	r	s	t
3	16,28	14,84	17,71
5	7,74	6,43	9,23
7	11,67	11,41	11,99
9	6,74	6,26	7,21
11	5,24	5,39	5,12
13	1,95	2,19	1,68

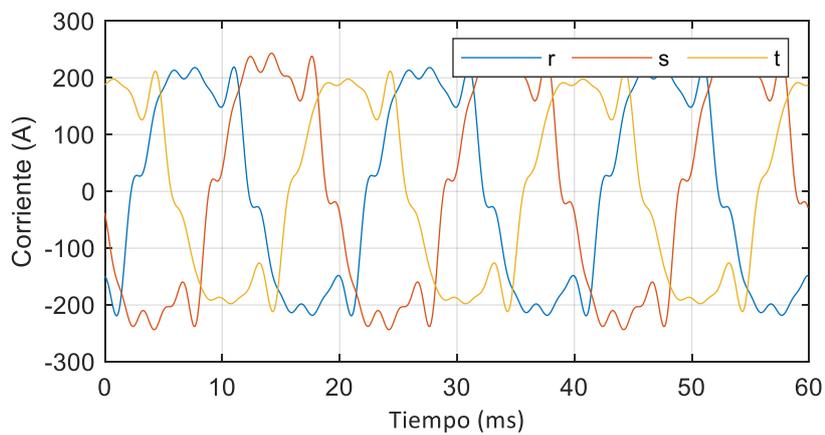


Fig. 41. Onda de corriente en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga

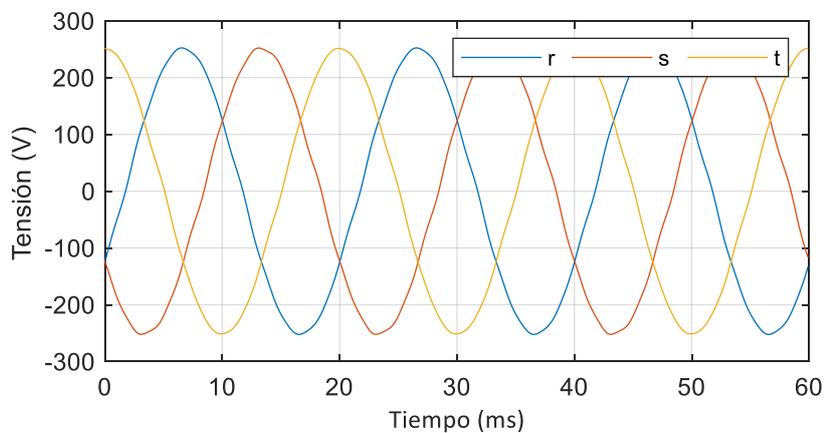


Fig. 42. Onda de tensión en el PCC con las cargas PHEV en el segundo nivel de carga



- Para el tercer nivel de carga:

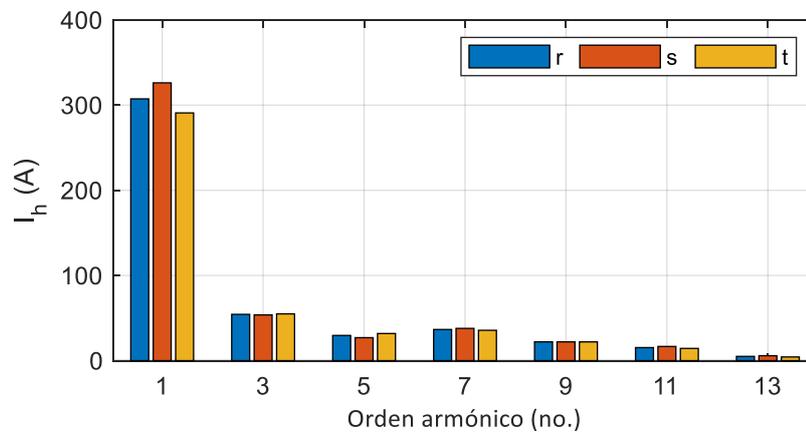


Fig. 43. Espectro armónico en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga

Tabla 31. Tasa armónica de distorsión global en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga

Fase	THD _i (%)	THD _v (%)	TDD (%)
r	25,02	1,69	6,93
s	23,45	1,73	6,89
t	26,66	1,67	6,98
Valor medio	25,04	1,70	6,93

Tabla 32. Tasa armónica de distorsión individual en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga

Orden armónico	Tasa de distorsión armónica individual (%)		
	r	s	t
3	17,69	16,47	18,89
5	9,62	8,27	10,95
7	11,90	11,61	12,25
9	7,18	6,77	7,58
11	4,98	5,10	4,94
13	1,62	1,78	1,48

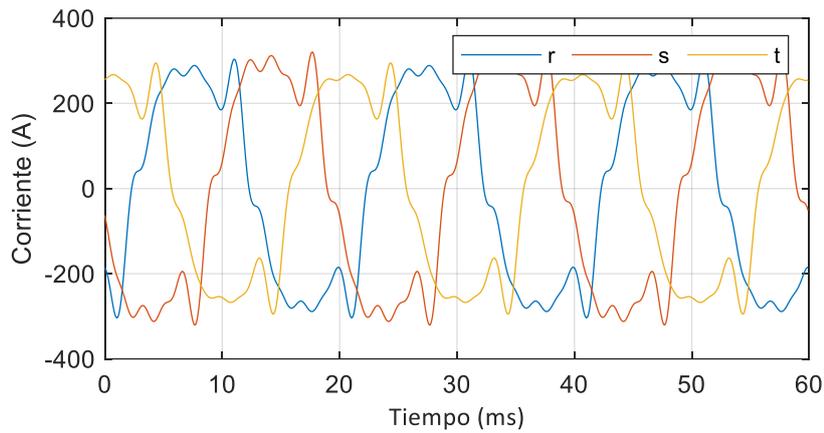


Fig. 44. Onda de corriente en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga

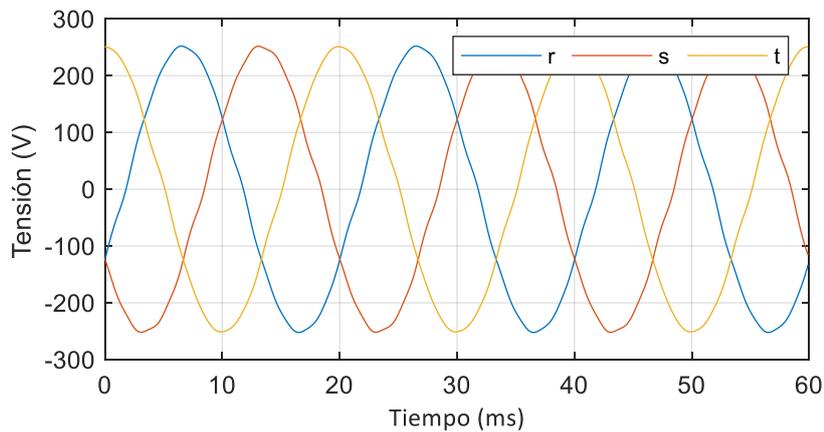


Fig. 45. Onda de tensión en el PCC con las cargas PHEV en el tercer nivel de carga

Se comparan a continuación los valores obtenidos con los límites establecidos por la norma IEEE Std 519-2014. En los tres estados de carga no lineal se verifica el cumplimiento de la normativa en cuanto a la THD_v , siendo el límite en sistemas de estas características de un 8% como se observa en la Tabla 3.

La TDD se evalúa haciendo uso de la Tabla 4, para lo cual es necesario previamente calcular la corriente de cortocircuito máxima en el PCC. Esta se calcula como:

$$I_{sc} = \frac{1}{Z_{trafo}} \cdot \frac{S_{n\ trafo}}{\sqrt{3} \cdot V_{2n\ trafo}} = \frac{100}{|R_{trafo} + jX_{trafo}|} \cdot \frac{S_{n\ trafo}}{\sqrt{3} \cdot V_{2n\ trafo}} \quad (59)$$



La resistencia y la inductancia del transformador son 0,4% y 4%, respectivamente. La potencia nominal del transformador del modelo tiene un valor de 0,8 MVA, y la tensión nominal a la salida es de 416 V.

Se obtiene una relación I_{sc}/I_L de 24,88, lo que hace que el límite de TDD sea del 8%, y que también se cumpla la normativa.

En cuanto a la distorsión armónica individual, los límites que establece esta norma para la relación I_{sc}/I_L obtenida son de un 7% para armónicos de orden 3, 5, 7 y 9 y de un 3,5% para armónicos de orden 11 y 13. En los tres estados de carga la mayoría de los valores de distorsión individual obtenidos no satisfacen la normativa. Tal comportamiento exige tomar medidas correctivas, como filtros activos o pasivos, para las componentes que incumplan los límites. El estudio de tales medidas excede los objetivos de este proyecto.

6.3.4. Pérdidas de potencia

Otro de los parámetros de gran interés es el de las pérdidas de potencia. Para su estudio se ha comparado la potencia suministrada a la red, que corresponde a la que sale del transformador, con la potencia consumida por las distintas cargas conectadas al sistema. Se ha comenzado estudiando las pérdidas de potencia cuando sólo las cargas lineales del modelo original están activas, para luego compararlas cuando se activan las cargas no lineales de los PHEV en los distintos niveles de carga.

Los resultados obtenidos tras la simulación se recogen en la siguiente tabla, en la que se comparan los valores de potencia suministrada por la red, potencia consumida por las cargas, pérdidas de potencia totales, y el porcentaje de pérdidas de potencia totales.

Tabla 33. Pérdidas de potencia para los distintos estados de carga del sistema

	CL	CL + PHEV L1	CL + PHEV L2	CL + PHEV L3
P generada (W)	46135,100	78335,107	166353,807	220374,837
P consumida (W)	45812,303	77593,900	163230,900	215620,800
Pérdidas (W)	322,797	741,207	3122,907	4754,037
Pérdidas (%)	0,700	0,946	1,877	2,157



Se puede observar un aumento considerable de la potencia demandada por las cargas al conectarse las cargas no lineales, debido a su alta demanda de energía. La aparición de corrientes armónicas producidas por este tipo de cargas hace que aumenten considerablemente las pérdidas del sistema conforme estas corrientes son mayores. Esto se debe a la propia característica inductiva del sistema. El valor en Ohmios de la reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia, que aumenta según el orden k del armónico: $X_L = 2\pi k f L$. El aumento de las reactancias de las líneas y los transformadores produce un incremento del consumo de corriente (sistema más inductivo) con el consiguiente aumento de las pérdidas, que son proporcionales a las impedancias y de relación cuadrática respecto a la corriente.

En la Fig. 46 se muestra el desglose de la potencia activa total consumida por las distintas cargas presentes en la red en cada uno de los estados de carga de la misma. Se observa como la potencia que demandan las cargas lineales aumenta en presencia de las cargas PHEV. Esto es debido a su dependencia de la frecuencia de la onda que las alimenta, la cual se ve modificada tras la generación de armónicos.

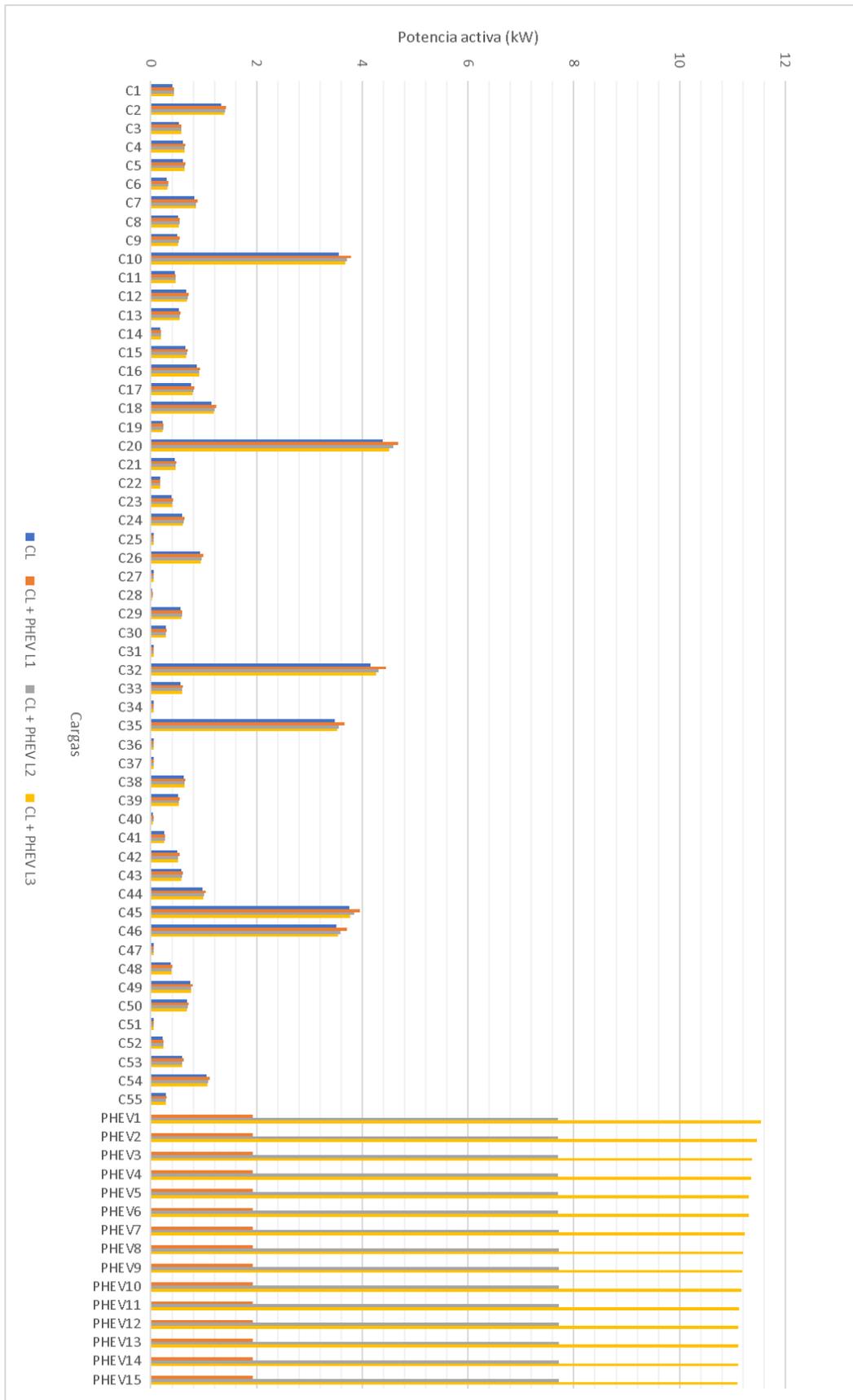


Fig. 46. Potencia activa consumida por las cargas en los distintos estados de carga del sistema



En cuanto a la potencia reactiva, tras el aumento de frecuencia producido por las componentes armónicas, se produce un aumento en el consumo de potencia reactiva en toda la red. Como ya se comentó, la red se hace más inductiva debido al aumento de la inductancia de las impedancias de este tipo. Se han publicado numerosos estudios relacionados con el cálculo de la potencia reactiva en presencia de armónicos, en los que se constata la dificultad para precisar la forma de agregar estas potencias armónicas de un modo correcto. Una alternativa es tomar como valor de referencia de la potencia reactiva el valor a frecuencia fundamental a la salida del transformador. Este criterio produce una subestimación de la reactiva demandada. Los valores obtenidos se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 34. Potencia reactiva para los distintos estados de carga del sistema

	CL	CL + PHEV L1	CL + PHEV L2	CL + PHEV L3
Q generada (kvar)	15,113	25,615	54,084	71,541

6.3.5. Factor de potencia

Se evalúa a continuación el factor de potencia a la salida del transformador en el PCC para cada estado de carga. Como se mencionó anteriormente, cuando hay presencia de armónicos es conveniente calcular el Factor de Potencia Verdadero, que equivale al producto del factor de potencia de desplazamiento y el factor de potencia de distorsión como se expresó en la ecuación (25).

Se tomarán por tanto para este cálculo, los valores de potencia activa, tensión e intensidad de corriente de la componente fundamental en este punto, y también los valores de la tasa de distorsión armónica global de corriente, calculados anteriormente. Los valores se toman para cada una de las tres fases y el valor del factor de potencia se calcula como el promedio.

En el primer estado de carga, sin presencia de las cargas PHEV, el factor de potencia se calcula simplemente como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente suministrada.

Se recogen en la siguiente tabla los valores obtenidos en cada uno de los estados de carga simulados.



Tabla 35. Factor de potencia sin cargas PHEV conectadas a la red

Fase	CL		
	r	s	t
P (kW)	15,199	19,671	11,266
S (kVA)	15,985	20,701	11,862
fdp	0,951	0,950	0,950
	0,950		

Tabla 36. Factor de potencia con cargas PHEV conectadas a la red en sus distintos niveles de carga

Fase	CL + PHEV L1			CL + PHEV L2			CL + PHEV L3		
	r	s	t	r	s	t	r	s	t
P₁ (kW)	25,944	30,614	21,775	55,195	60,04	51,106	73,313	77,718	69,318
V₁ (V)	251,672	251,559	251,721	251,069	250,954	251,113	250,693	250,581	250,735
I₁ (A)	108,404	128,04	91,064	231,094	251,505	214,15	307,306	326,106	290,809
THD_i	18,47	18,76	18,66	23,19	21,56	24,97	25,02	23,45	26,66
fdp	0,935	0,934	0,934	0,927	0,930	0,922	0,923	0,926	0,919
	0,934			0,926			0,923		

Se puede observar una disminución del factor de potencia cuanto mayor es el contenido armónico del sistema. El dato nominal de las cargas de la red es de un factor de potencia de 0,95. El valor medido de 0,93 implica un aumento de un 15% de la reactiva demanda respecto del dato nominal.

6.3.6. Intensidad de corriente por el conductor neutro

Finalmente, se comparan las corrientes que circulan por el neutro a la salida del transformador. Estas corrientes se deben a los desequilibrios producidos principalmente por las cargas monofásicas (reparto no equitativo de cargas entre las distintas fases) y a la presencia de armónicos producidos por las cargas no lineales: precisamente a los terceros armónicos de secuencia homopolar cuya suma no se anula en el punto neutro.



Se observa en primer lugar el estado del sistema en el que solo están presentes las cargas lineales del modelo original a la salida del transformador.

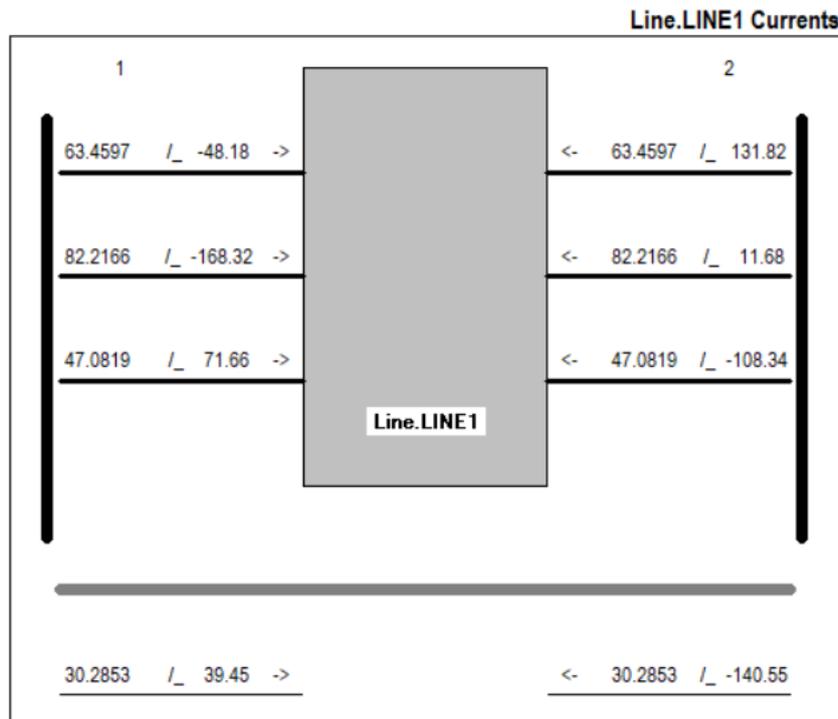


Fig. 47. Intensidades de corriente a la salida del transformador sin cargas PHEV conectadas

Se puede observar cómo retornan 30,29 A por el conductor neutro debido a los desequilibrios producidos por las cargas monofásicas lineales.

Se estudia a continuación el estado de carga en el que las cargas no lineales PHEV están conectadas en su tercer nivel de carga, ya que éstas son trifásicas y es posible obtener las corrientes armónicas que retornan por el neutro, provocadas por los armónicos de secuencia homopolar sin agregar amperios extras debidos a desequilibrios. El valor de corriente de neutro para cada frecuencia equivale a la **suma compleja** de la corriente en cada una de las tres fases.

Para el cálculo de su módulo se ha obtenido el valor eficaz de la intensidad de corriente que retorna por el neutro para cada frecuencia de cada una de las cargas PHEV.

Los valores se recogen en la siguiente tabla:



Tabla 37. Intensidad de corriente que retornan por el neutro en las cargas PHEV en su tercer nivel de carga

Carga	I_n
PHEV1	13,094
PHEV2	13,048
PHEV3	12,986
PHEV4	12,985
PHEV5	12,953
PHEV6	12,949
PHEV7	12,904
PHEV8	12,886
PHEV9	12,873
PHEV10	12,860
PHEV11	12,841
PHEV12	12,840
PHEV13	12,840
PHEV14	12,839
PHEV15	12,840
Total	193,740

Este valor equivale a la intensidad de corriente armónica debido a la presencia de las cargas no lineales PHEV. Se aprecia una diferencia considerable respecto al valor consecuencia de las corrientes de desequilibrio del caso lineal y que es de 30 A.

Conviene aclarar, que si bien se está comparando el funcionamiento del sistema con niveles de carga diferentes (con y sin cargas no lineales), esto no afecta el análisis de la corriente por el neutro, ya que las cargas no lineales contempladas son trifásicas equilibradas (nula aportación de corriente de neutro de la componente fundamental).



7. Conclusiones

En este proyecto se ha efectuado una aproximación tanto teórica como práctica al problema de la distorsión armónica, desde el punto de vista de la red eléctrica trifásica.

En la primera parte, se expusieron los conceptos de calidad de la energía, cargas no lineales y distorsión armónica y se presentó el método de análisis por transformada de Fourier. También, las principales causas y consecuencias de la distorsión armónica y una revisión de la normativa técnica aplicable incluyendo los límites permitidos.

Siendo un estudio enfocado en la red eléctrica, se procedió a construir un modelo de la red de distribución y su resolución mediante el método de los flujos de carga. El programa utilizado en las simulaciones fue el OpenDSS, de uso muy extendido en el ámbito profesional de la ingeniería de sistemas eléctricos de potencia. La carga no lineal modelada fue del tipo *cargadores de baterías de vehículos eléctricos*, con distintos modos de carga. Un total de quince cargadores fueron colocados en diversos nudos de la red.

El programa OpenDSS es especialmente adecuado para la simulación de sistemas de distribución, ya que permite modelar aspectos fundamentales de estos sistemas tales como: el desequilibrio de cargas, el tratamiento del neutro, la variación de la carga en el ciclo horario, y muy especialmente la presencia de cargas no lineales, aspectos todos incluidos en el modelo desarrollado. Por el contrario, el programa funciona mediante scripts, líneas de código, sin prácticamente interfaz gráfica de usuario (GUI), lo que hizo que las tareas de modelado, y sobre todo de extracción de los resultados para su procesamiento, requirieran de un período prolongado de aprendizaje en el uso del programa y de las sintaxis.

Para la tarea de extracción de datos, cálculo a partir de resultados, y procesamiento y representación de estos, se utilizó como herramienta de apoyo el programa MATLAB, escribiéndose diversas funciones y scripts.

En cuanto a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Se constata la influencia que, sobre el rendimiento de la red tiene la introducción de las cargas no lineales. Dicha influencia se materializa, en primer lugar, en la caída de tensión. Se produce un aumento aguas abajo de la subestación, llegando a ser su valor



de hasta un 4,6 % en el peor de los casos, correspondiente al de las cargas no lineales trifásicas conectadas a la red.

También se ha producido un incremento en la Tasa de Distorsión Armónica (THD) de corriente y de tensión, siendo este muy notable en la primera, llegando a valores de hasta un 25,04 %, y un aumento en la Distorsión de Demanda Total (TDD), ascendiendo hasta un 6,93 %, ambas en el caso de las cargas no lineales trifásicas. Tras comparar estos valores con los límites establecidos por la norma IEEE Std 519-2014, se concluye que ambos la cumplen, aunque la TDD está cerca de su no cumplimiento. La tasa de distorsión armónica individual supera, para la mayoría de armónicos, los límites establecidos por esta normativa en los tres estados de carga.

En cuanto a las pérdidas de potencia, también se produce un aumento en su valor, llegando a los casi 4,8 kW de pérdidas en el caso de mayor carga no lineal con un porcentaje de pérdidas de un 2,16 % y se observa como las cargas lineales aumentan su demanda de potencia activa debido a su dependencia de la frecuencia del sistema.

El factor de potencia también se ve reducido descendiendo desde un 0,95 inicial hasta un valor de 0,92 en el peor de los casos.

Finalmente, en cuanto a la intensidad de corriente que retorna por el conductor neutro, es muy notable su aumento al conectar las cargas trifásicas, debido a la presencia de armónicos de secuencia homopolar, los cuales hacen que solo el valor de corriente armónica ascienda hasta los 193,7 A, resultando bastante por encima de los 30,29 A iniciales producidos por los desequilibrios de las cargas lineales.

Este estudio se ha elaborado de forma orientativa para observar la disminución del rendimiento de una red de distribución de baja tensión en presencia de cargas no lineales, y queda de manifiesto como estas afectan negativamente a los distintos parámetros de la red. Es evidente que en el caso de redes de distribución más grandes y con un mayor número de cargas conectadas, los efectos serían mayores.

Como línea de trabajo futura se propone analizar las técnicas y medidas correctivas de la distorsión armónica en redes de distribución eléctrica.



8. Referencias

- [1] Andres, «¿Qué son cargas no lineales, qué problemas generan y que dice la Norma?», *Electricaplicada*, sep. 03, 2019. <https://www.electricaplicada.com/cargas-no-lineales/> (accedido may 01, 2021).
- [2] C. Collombet, J.-M. Lupin, y J. Schonek, «Cuaderno Técnico nº 152 - Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento». Schneider Electric, 2000.
- [3] «Manual didáctico de compatibilidad electromagnética <<CEM>>». Schneider Electric, 2000.
- [4] «Seminario Calidad Eléctrica». FLUKE. [En línea]. Disponible en: http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/Presentaciones/fluke/Seminario_Calidad_El%C3%83%C2%A9ctrica_Fluke.pdf
- [5] M. J. T. Márquez, «Análisis del desequilibrio en redes de distribución de baja tensión», p. 121, 2015.
- [6] «¿Qué son los armónicos y como nos afectan?», *Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica*. <http://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/> (accedido may 17, 2021).
- [7] J. C. Solà, «Estudio y caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas de baja potencia», Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [8] A. Gómez Expósito, «Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica». McGraw-Hill, 2002.
- [9] F. Fornieles, «Armónicos: Efectos, diagnóstico y soluciones». Circutor. [En línea]. Disponible en: http://www.jcee.upc.es/JCEE2009/pdf_ponencias/PDFs/Fornieles_17_11_09_M.pdf
- [10] D. Lu, Ed., *An Update on Power Quality*. InTech, 2013. doi: 10.5772/51135.
- [11] «Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución – ISEESAC». <https://www.iseesac.com/cargas-no-lineales/> (accedido may 20, 2021).
- [12] «Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas». Circutor. [En línea]. Disponible en: http://circutor.com/docs/procedimientos_sp.pdf
- [13] M. S. Esparza González, J. A. Mata Guerrero, y L. A. Castañeda Ramos, «Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones», *Concienc.*



- Tecnológica*, vol. 32, 2006, [En línea]. Disponible en:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403211>
- [14] M. Grady, «Understanding Power System Harmonics», p. 181, 2012.
- [15] «La Guía definitiva de la Transformada de Fourier paso a paso», *Conceptos Claros*, oct. 11, 2017. <https://conceptosclaros.com/transformada-de-fourier/> (accedido jun. 10, 2021).
- [16] T. Hoevenaars, K. LeDoux, y M. Colosino, «Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications», en *IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003. Record of Conference Papers.*, Houston, TX, USA, 2003, pp. 145-150. doi: 10.1109/PCICON.2003.1242609.
- [17] «TPF (True Power Factor) | NETIO products: Smart power sockets controlled over LAN and WiFi». <https://www.netio-products.com/en/glossary/tpf-true-power-factor> (accedido may 20, 2021).
- [18] J. Martínez Lendech, J. Gómez Agis, D. Martínez Martínez, y C. Vargas Ayuso, «Análisis de factor de potencia en variadores de velocidad conectados a un sistema eléctrico», *ECORFAN - Rev. Ing. Eléctrica*, vol. 1, p. 7, 2017.
- [19] I. Marino, «Problemática de Armónicos en Variadores de Velocidad», *Ingeniero Marino*, ene. 26, 2021. <https://ingenieromarino.com/problematika-de-armonicos-en-variadores-de-velocidad/> (accedido jun. 02, 2021).
- [20] «AHORRAR ENERGÍA CON VARIADORES DE FRECUENCIA.», *Maquituls - HERRAMIENTAS PROFESIONALES*. <https://www.maquituls.es/noticias/ahorrar-energia-con-variadores-de-frecuencia/> (accedido jun. 14, 2021).
- [21] «DC Power Supplies Selection Guide | Engineering360». https://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/power_supplies_conditioners/dc_power_supplies/dc_power_supplies_all_types (accedido jun. 15, 2021).
- [22] I. Mecafenix, «¿Cómo funciona una fuente de alimentación y que tipos existen?», *Ingeniería Mecafenix*, jun. 12, 2018. <https://www.ingmecafenix.com/electronica/fuente-de-alimentacion/> (accedido jun. 15, 2021).
- [23] D. A. Martínez Victoria, «Balastro Electrónico Mono-etapa», Universidad de las Américas Puebla, 2005.
- [24] A. F. Barbosa Franco, L. A. Noguera Vega, y W. M. Giral Ramírez, «Análisis de distorsión armónica en iluminación LED», *Rev. Vínculos*, vol. 14, n.º 2, pp. 95-107, dic. 2017, doi: 10.14483/2322939X.12520.



- [25] P. E. Issouribehere, F. Issouribehere, y G. A. Barbera, «Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco eléctrico como cargas en los sistemas de distribución», *Revista CIER*, vol. 52, p. 8, 2009.
- [26] A. Baltasar, M. Barreto, A. Herrera, y Z. Garcia, «Utilización de dispositivos FACTS en aceras para mejorar su comportamiento técnico económico», *Ing. Energética*, vol. 31, p. 8, 2008.
- [27] Andres, «Soluciones para compensar y reducir los daños de armónicos en sistemas electricos», *Electricaplicada*, ago. 02, 2017. <https://www.electricaplicada.com/soluciones-compensar-reducir-armonicos-electricos/> (accedido jun. 03, 2021).
- [28] «Transformadores Indusul - Transformadores Factor K». <http://www.indusul.com/es/productos/transformadores-factor-k/48/> (accedido jun. 03, 2021).
- [29] J. M. A. Gómez, R. A. A. Córdova, y Y. A. I. Salinas, «Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal», *RA*, vol. 20, n.º 48, p. 13, 2016.
- [30] «¿Como saber si un diferencial es superinmunizado? Efimarket», *Efimarket*, jun. 08, 2016. <https://www.efimarket.com/blog/como-saber-si-un-diferencial-es-superinmunizado/> (accedido jun. 15, 2021).
- [31] «Revista ElectroIndustria - Edicion Abril 2021 - 1era Quincena». <http://www.microbyte.cl/elec/flipbook/202104/index.html?gst=3b9a43d5310e80b576b8877fec6d2f33> (accedido jun. 03, 2021).
- [32] «Armónicos: Problemática actual y su solución». <http://circuitor.es/es/productos/destacados/4194-armonicos-problematica-actual-y-su-solucion> (accedido may 01, 2021).
- [33] S. Karve, «Compensadores Activos de Armónicos», p. 12, 2001.
- [34] «Uso y referencia a normas ISO e IEC en la reglamentación técnica». AENOR, 2007.
- [35] «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», IEEE, 2014. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [36] «Norma UNE-EN 61000-3-12 - 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». AENOR, 2012.
- [37] «Norma UNE-EN 61000-3-2 - Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)». AENOR, 2001.
- [38] V. Sánchez Calvo y B. Rivera Chamorro, «Seminario Calidad de Suministro Eléctrico». Megacal Instruments Ibérica.



- [39] L. Ferrer i Arnau, «Introducción a la compatibilidad electromagnética», *Jornades Conferències Eng. Electrònica*, 2002.
- [40] Ditel, «Soluciones para perturbaciones electromagnéticas industriales. (Parte 2/4)», *Ditel Diseños y Tecnología S.A.*, abr. 25, 2019. https://www.ditel.es/perturbaciones-electromagneticas_2/ (accedido may 13, 2021).
- [41] V. M. López, «Compatibilidad Electromagnética (EMC) Y Normalización». Centro Nacional de Metrología (CENAM). [En línea]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/dme/pdf/compatibilidad%20electromagnetica-sep30-2005.pdf>
- [42] «Real Decreto 186/2016, de 6 de mayo, por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos.» Boletín Oficial del Estado, may 10, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-4442
- [43] S. Herraiz Jaramillo, «Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas», Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002.
- [44] A. Garcés Ruiz, J. C. Galvis Manso, y R. A. Gallego R, «Flujo de carga armónico para sistemas radiales», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.º 25, 2004, doi: <https://doi.org/10.22517/23447214.7187>.
- [45] R. C. Dugan, «The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)», p. 184, 2016.
- [46] «OpenDSS». <https://www.epri.com/pages/sa/openss> (accedido jun. 14, 2021).
- [47] A. Aljanad y A. Mohamed, «Harmonic Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicle on Electric Distribution System», *Model. Simul. Eng.*, vol. 2016, pp. 1-7, 2016, doi: 10.1155/2016/5968943.