



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.**

**Estudio y análisis armónico de intensidades  
de alimentación de lámparas de iluminación  
LED de baja potencia**

**Autor:**

**Del Olmo Martín, Sergio**

**Tutor:**

**Arranz Gimón, Ángel Eugenio**

**Departamento de Tecnología**

**Electrónica.**

**Valladolid, marzo, 2021.**



## **RESUMEN.**

En el presente proyecto, elaboraremos un estudio de las tecnologías de la iluminación actual en el mercado, centrándonos finalmente en la iluminación LED, dado que analizaremos el impacto que tienen sobre la red eléctrica las fuentes de alimentación que contienen un convertidor DC/DC tipo Buck.

Estas fuentes de alimentación tienen la singularidad de que son no lineales, siendo una de las principales fuentes de armónicos.

Analizaremos diferentes tipos de filtrado para diferentes parámetros de los componentes del sistema mediante simulaciones, obteniendo diferentes conclusiones sobre la emisión de armónicos a la red pública, comprobando finalmente si en dichas condiciones la fuente de alimentación cumple la normativa y qué impacto tiene la variación de esos parámetros.

## **PALABRAS CLAVE**

LED, fuente de alimentación, Buck, Matlab, armónicos.

## **ABSTRACT**

In this project, we will prepare a study of lighting technologies in the current market, finally focusing on LED lighting, since we will analyze the impact they have above the electrical network, and we will analyze the power sources that contain a DC/DC Buck converter.

These power sources have the particularity that are non-linear, being one of the main sources of harmonics.

We will analyze different types of filtering for different parameters of the components of the system through simulations, obtaining different conclusions on the emission of harmonics to the public network, finally checking if under these conditions the power supply complies with the normative and what impact the variation of these parameters has.

## **KEYWORDS**

LED, power supply, Buck, Matlab, harmonic.



## INDICE

Indice de figuras .....	7
Indice de tablas .....	12
Indice de graficos .....	12
Capítulo 1. Introducción y objetivos .....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Objetivos. ....	16
Capítulo 2. Marco legal de emisión de corrientes armónicas a la red eléctrica.....	17
2.1 Introducción a la normativa.....	17
2.2 Campo de aplicación.....	17
2.3 Clasificación de los equipos. ....	18
2.4 Límites para equipos de clase C. ....	19
Capítulo 3. Fuentes de armónicos y técnicas básicas de análisis.....	21
3.1 Las perturbaciones armónicas.....	21
3.1.1 Fuentes principales de armónicos. ....	24
3.1.2 Consecuencias de los armónicos.....	24
3.1.3 Series de Fourier. ....	25
3.1.4 El efecto de la cancelación. ....	27
3.2 Análisis en frecuencia.....	27
3.2.1 Barras espectrales .....	28
3.2.2 Índices de distorsión. ....	30
3.2.3 Transformada de Fourier .....	32
Capítulo 4. Tecnologías de la iluminación. ....	35
4.1 Tecnologías de iluminación. ....	35
4.1.1 Lámparas incandescentes.....	35
4.1.2 Lámparas fluorescentes. ....	37
4.1.3 Lámparas LED.....	37

Capítulo 5. Tipos de fuente de alimentación para lámparas LED.....	41
5.1 Fuentes de alimentación de lámparas LED. ....	41
5.1.1 Circuitos electrónicos básicos no regulables. ....	43
5.1.2 Circuitos electrónicos conmutados no regulables. ....	45
5.1.3 Circuitos electrónicos conmutados no regulables con aislamiento galvánico .....	49
5.1.4 Circuitos electrónicos regulables. ....	50
5.2 Convertidores Buck mejorados. ....	52
5.2.1 Convertidor Buck sin mejoras.....	53
5.2.2 Convertidor Buck con filtro inductivo en el lado AC. ....	54
5.2.3 Convertidor Buck con filtro inductivo en el lado DC.....	55
5.2.4 Convertidor Buck con filtro LCD en lado DC .....	56
5.2.5 Convertidor Buck con filtro Valley Fill.....	57
5.2.6 Convertidor Buck con filtro Valley Fill mejorado.....	59
Capítulo 6. Simulación y análisis.....	61
6.1 Análisis del modelo Buck.....	61
6.2. Comprobación del instrumento de medida virtual. ....	64
6.3 Simulación y análisis de los modelos. ....	70
6.3.1 Efecto de la variación de la carga. ....	71
6.3.2 Efecto de la variación en la frecuencia de conmutación.....	80
6.3.3 Efecto de la variación en la inductancia.....	87
6.4 Comprobación del cumplimiento de la normativa.....	94
7. Conclusiones y futuras líneas de investigación. ....	97
7.1 Conclusiones. ....	97
7.2 Futuras líneas de investigación.....	99
Bibliografía. ....	101
Anexos .....	105

Anexo 1. Comprobación de cumplimiento de la normativa.....	105
Anexo 2. Comparación de resultados de las simulaciones.....	110

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Onda sinusoidal pura.....	21
Figura 2. Triángulo de potencias.....	22
Figura 3. Ejemplo de señal con armónicos.....	23
Figura 4. Ejemplo de descomposición de una onda periódica en las ondas periódicas que la componen. Fuente: Wikimedia Commons.....	26
Figura 5. Ejemplo de Supraarmónicos.....	29
Figura 6. Ejemplo de análisis armónico.....	30
Figura 7. Análisis temporal y en frecuencia de señal de corriente que alimenta a una carga resistiva por medio de tres fuentes ideales de tensión.....	31
Figura 8. <i>Muestra en frecuencia cada 5Hz (1/0.2s)</i> .....	33
Figura 9. <i>Muestra en frecuencia cada 1Hz (1/1s)</i> .....	34
Figura 10. Partes que componen una bombilla. Fuente: Wikipedia.....	36
Figura 11. Ciclo regenerativo [24].....	37
Figura 12. Estructura interna del diodo LED [26]......	38
Figura 13. Componentes del diodo emisor de luz [26]......	39
Figura 14. Bandas energéticas. [Wikipedia].....	40
Figura 15. Espectro visible por el ojo humano [Wikipedia]......	40
Figura 16. Componentes de una fuente de alimentación de una lámpara LED [24]. .....	41
Figura 17. Representa un diagrama de bloques de la alimentación de cargas correspondientes a LEDs. La imagen superior indica una fuente sin corrección del factor de potencia. La imagen intermedia añade el bloque de corrección del FDP. La imagen inferior agrupa la corrección del FDP y la fuente de corriente en un mismo bloque [24].....	42

Figura 18. Corresponde al diagrama de bloques de una alimentación con regulación de intensidad lumínica. La diferencia entre ambas es que en la imagen inferior añade el bloque de corrección de factor de potencia [24].	43
Figura 19. [29].	44
Ilustración 20. [29].	45
Figura 21. Convertidor trabajando en modo continuo [32].	47
Figura 22. Diagrama básico del convertidor Boost [33].	47
Figura 23. Topología del convertidor tipo Buck [30].	48
Figura 24. Convertidor tipo Buck en modo ON [30].	48
Figura 25. Convertidor tipo Buck en modo OFF [30].	49
Figura 26. Topología del convertidor Buck-Boost [30].	49
Figura 27. Convertidor tipo FlyBack [35].	50
Figura 28. [12].	51
Figura 29. Regulación lineal [12].	51
Figura 30. Iluminación por PWM al 50% [12].	51
Figura 31. Iluminación por PWM al 25% [12].	52
Figura 32. Modelo Buck.	53
Figura 33. Rectificado de onda completa.	54
Figura 34. Buck con filtro inductivo en el lado AC.	55
Figura 35. Buck con filtro inductivo en el lado AC.	56
Figura 36. Convertidor Buck con LCD en lado DC.	57
Figura 37. Convertidor Buck con filtro Valley Fill.	58
Figura 38. Valley Fill del modelo.	58
Figura 39. Circuito Valley Fill mejorado.	59
Figura 40. Definición de la alimentación.	61
Figura 41. Parámetros del puente de diodos.	62
Figura 42. Configuración Buck.	63
Figura 43. Herramientas del bloque powergui.	65
Figura 44. Cuadro de diálogo “FFT Analysis” del bloque powergui.	66
Figura 45. Modelo de simulación.	67
Figura 46. Prueba de interarmónicos,	67
Figura 47. $t_w = 0,2s$ .	68
Figura 48. $t_w = 1s$ .	69

Figura 49. Conmutador a 100kHz.....	69
Figura 50. Muestra a 100kHz.....	70
Figura 51. SMD LED 5730 [37].....	71
Figura 52. Conexión de las cargas al convertidor DC/DC. ....	72
Figura 53. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una carga de 10 $\Omega$ . ....	74
Figura 54. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una carga de 1000 $\Omega$ ..	74
Figura 55. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una carga de 10 $\Omega$ . ....	75
Figura 56. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una carga de 1000 $\Omega$ .....	75
Figura 57. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una carga de 10 $\Omega$ . ....	76
Figura 58. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una carga de 1000 $\Omega$ .....	76
Figura 59. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una carga de 10 $\Omega$ .....	77
Figura 60. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una carga de 1000 $\Omega$ . ....	77
Figura 61. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una carga de 10 $\Omega$ . ....	78
Figura 62. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una carga de 1000 $\Omega$ .....	78
Figura 63. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una carga de 10 $\Omega$ .....	79
Figura 64. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una carga de 1000 $\Omega$ . ....	79
Figura 65. Distribución del convertidor DC/DC. ....	80
Figura 66. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una frecuencia de 10kHz. ....	82
Figura 67. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una frecuencia de 200kHz.....	82
Figura 68. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para una frecuencia de 10kHz.....	83

Figura 69. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para una frecuencia de 200kHz. ....	83
Figura 70. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado AC para una frecuencia de 10kHz.....	84
Figura 71. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado AC para una frecuencia de 200kHz. ....	84
Figura 72. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una frecuencia de 10kHz. ....	85
Figura 73. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una frecuencia de 200kHz.....	85
Figura 74. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una frecuencia de 10kHz. ....	86
Figura 75. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una frecuencia de 200kHz.....	86
Figura 76. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una frecuencia de 10kHz. ....	87
Figura 77. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una frecuencia de 200kHz.....	87
Figura 78. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una inductancia de 0,00029H. ....	91
Figura 79. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una inductancia de 0,29H. ....	91
Figura 80. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una inductancia de 0,0029H.....	92
Figura 81. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una inductancia de 29H.....	92
Figura 82. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill mejorado para una inductancia de 0,00088H.....	93
Figura 83. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill mejorado para una inductancia de 0,088H. ....	93
Figura 84. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill para una inductancia de 0,00088H.....	94

Figura 85. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill para una inductancia de 0,088H. ....94

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. [7].....	15
Tabla 2. [7].....	18
Tabla 3. Corriente armónica máxima admisible para un elemento de potencia superior a 25W. [UNE 61000-3-2] .....	19
Tabla 4 [7].....	23
Tabla 5. [7].....	24
Tabla 6.....	57

## INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Evolución de la magnitud del fundamental en función de la carga en ohmios que le apliquemos.....	73
Gráfico 2. Evolución de la tasa de distorsión armónica en función de la carga en ohmios que le apliquemos.....	73
Gráfico 3. Magnitud del fundamental en función de la frecuencia de conmutación. ....	81
Gráfico 4. THD en función de la frecuencia de conmutación.....	81
Gráfico 5. Magnitud del fundamental en función de la inductancia. ....	88
Gráfico 6. Magnitud del fundamental en función de la inductancia. ....	88
Gráfico 7. Magnitud del fundamental en función de la inductancia. ....	89
Gráfico 8. THD en función de la inductancia.....	89
Gráfico 9. THD en función de la inductancia.....	90
Gráfico 10. THD en función de la inductancia.....	90

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el presente proyecto realizaremos un análisis de las diferentes alternativas que tenemos para alimentar lámparas LED y un análisis armónico de diversas fuentes de alimentación formadas con un convertidor Buck y sus diferentes filtrados, puesto que en los últimos años la tecnología LED ha cobrado mucha importancia. Primero vamos a ubicar la historia del LED, desde sus primeros prototipos hasta el papel que tiene en la sociedad actual, pasando por estudiar la normativa vigente. También vamos a comentar en grandes rasgos los pros y contras que tiene esta tecnología. Finalmente, comentaremos los objetivos principales.

### 1.1 Introducción.

El contexto de la tecnología LED se inicia en 1961 cuando James R. Biard y Gary Pittman, trabajadores de Texas Instruments, descubren una radiación infrarroja procedente de un diodo túnel de arseniuro de galio. El 8 de agosto del 1962, Biard y Pittman patentaron el “Diodo radiante semiconductor”, que permitía la emisión de luz infrarroja cuando polarizaban el diodo en directa, suponiendo la aparición de los primeros LED de uso práctico de nuestra historia. En ese mismo año, Nick Holonyak desarrolló el primer LED que emitía luz dentro del espectro visible (rojo) mientras trabajaba en General Electric. En 1972 se desarrollaron los LED azul, aunque hasta 1994 no se desarrolló un LED azul de alto brillo en Japón [23].

En la sociedad actual se encuentra masificado el uso de dispositivos electrónicos dado que se ha intensificado el uso de ordenadores, televisores, cargadores de móvil o cualquier dispositivo electrónico que se utiliza en el ámbito laboral o doméstico. Esta clase de dispositivos tienen en común con nuestras lámparas LED que se comportan como cargas no lineales, que más tarde se explicará su influencia sobre la calidad de la potencia.

El mayor problema que encontramos en el mundo de las lámparas LED es la pérdida de calidad de la potencia y la “suciedad” que aportan los drivers que alimentan a las mismas a la red de alimentación, dado que los conmutadores que se usan para transformar a corriente continua no son lineales. Teniendo en cuenta la eficiencia energética de la tecnología LED, tenemos que ser capaces de solucionar el problema que nos añade la presencia de armónicos en la corriente de entrada sin limitar sus características, su factor de potencia, que se define como la relación entre la potencia existente en el sistema y la que debería de haber realmente si la corriente y la tensión estuvieran en fase [2], y su tasa de distorsión armónica, ya que teniendo en cuenta su larga duración (50000/100000 horas), su bajo consumo, su mínimo mantenimiento, su gran peso ecológico, la reducción de

espacio que supone, la ventaja ecológica que obtenemos dado que se elabora con sustancias no tóxicas y que no emite energía ultra-violeta [3], se convierte en el futuro de la iluminación reduciendo hasta un 90% [4] su consumo frente a bombillas tradicionales como las incandescentes.

Nuestro objetivo principal será analizar fuentes de alimentación que nos conviertan la corriente alterna de la red en corriente continua para alimentar los LEDs, compuestas por convertidores continua/continua (en adelante DC/DC) tipo Buck con diferentes filtrados. Con este análisis nos haremos una idea del contenido armónico de la corriente que va a emitir la fuente a la red, y variaremos ciertos parámetros que consideremos relevantes en el funcionamiento de los modelos para determinar su influencia sobre la calidad de la corriente. Este análisis lo realizaremos mediante la simulación de modelos realizados en Simulink [24].

La norma que regula la CEM (compatibilidad electromagnética) corresponde a UNE-EN IEC 61000-3-2:2019: Límites para emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase). Esta es una versión oficial en castellano de la norma europea EN 61000-3-2, que a su vez es originaria de la norma internacional IEC 61000-3-2. Esta norma regula los límites de las corrientes armónicas que pueden producir los equipos que han sido sometidos a ensayos bajo condiciones específicas.

La propia fuente de alimentación tiene que reducir la presencia de armónicos en la corriente de entrada y la tasa de distorsión armónica, y a su vez encargarse de la conversión AC/DC. A la hora de elegirlo debemos tener en cuenta una serie de inconvenientes que afectan tanto al precio final del producto, al espacio que ocupa y a la calidad de la corriente de entrada con el objetivo final de cumplir con lo establecido en el marco legal y con las expectativas del consumidor. En función de la topología y los componentes, podemos encontrar dificultades que afectan al precio y a las dimensiones de este dado que en muchas situaciones el espacio es reducido y se convierte en un inconveniente.

En cuanto a la eficiencia energética, experimentalmente se ha demostrado que en el ámbito industrial la tecnología LED puede reducir el consumo eléctrico hasta en un 50% respecto a las luminarias de halógenos metálicos. La tecnología LED nos ofrece soluciones de alto rendimiento energético y bajo coste en mantenimiento, ofreciendo un sistema duradero en el tiempo y eficiente en comparación con el producto ya existente en el mercado. Otro objetivo que marca la transición al uso de los LED es su aportación al medio ambiente reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero dado que reduce el consumo energético y a su vez esa generación conlleva un impacto ambiental [5].

La iluminación LED supone un ahorro del 80-90% de la factura de la luz si ahora la comparamos con la iluminación incandescente tradicional, obteniendo a su vez una eficiencia eléctrica muy superior a la convencional [4].

Con dicha tecnología obtenemos un rendimiento de 130-150 (Pudiendo llegar hasta 300) lúmenes/vatio en las más eficientes frente a los 80 lúmenes/vatio en las más populares (Tabla 1). Para ponernos en contexto de la situación, el lumen es la medida de la potencia luminosa emitida por la fuente. Entonces con lúmenes/vatio hablamos de la potencia luminosa generada por cada vatio de potencia eléctrica consumido, teniendo en cuenta que un halógeno tiene una relación de 20-25 lúmenes/vatio.

También debemos tener en cuenta el IRC (índice de reproducción cromática) que nos proporciona la capacidad de una fuente de mostrar los colores de un objeto de forma ideal, obteniendo un valor en los LED de 90 de forma instantánea frente al 44 que obtenemos en las bombillas de bajo consumo [4].

Tecnología	Año de invención	Horas útiles	Eficiencia [Lm/W]
Incandescente	1878	1000	15
Fluorescente	1930	8000	107
Halógena	1959	2000	24
CFL	1970	10000	63
LED	1990	100000	303

Tabla 1. [7]

Pero no todo van a ser ventajas en el uso de los LED. Ha surgido una corriente contraria a su uso sin haber hecho un proyecto luminotécnico previo que no se limite a contemplar el ahorro energético, sino que se tenga en cuenta también el impacto medioambiental que puede generar la contaminación lumínica. Según esta fuente, la luz blanco-azulada que emite el LED puede ser de las más nocivas para el medioambiente y para la salud de las personas. Estos dispositivos emiten unos valores de longitud de onda próximos a 470nm, siendo la que más contaminación lumínica causa ya que se difunde con facilidad por la atmósfera. Esto implica que se perturbe la oscuridad nocturna a cientos de kilómetros afectando a las observaciones astronómicas. La salud del ser humano quedaría afectada por la luz blanco-azulada provocando la inhibición de la secreción de la hormona de la melatonina por parte de la glándula pineal, traduciéndose esto en casos de cáncer de mama en mujeres y de próstata y colon en hombres [6]. A esto hay que añadir que el “flickering”, que es el parpadeo que emite la luz debido a los interarmónicos que están entre el tercer y quinto orden también puede afectar a la salud, provocando problemas epilépticos, dolores de cabeza y problemas neurológicos [3].

En mi opinión, la tecnología LED supone una revolución en el ámbito de la eficiencia energética, siendo una de las principales bazas en el ámbito doméstico e industrial cuando tratamos de reducir costes energéticos y económicos aumentando la durabilidad del producto.

## 1.2 Objetivos.

En nuestro trabajo, estudiaremos diferentes alternativas para la alimentación de dichas lámparas LED, simulando y analizando diferentes modelos [24] de fuentes de alimentación en función del tipo de filtrado, transformando la corriente alterna procedente de la red de distribución (230V monofásico a 50Hz en España) en corriente continua, buscando cuáles son los parámetros óptimos de funcionamiento del conjunto variándolos en los diferentes modelos usados en nuestras simulaciones. Las fuentes de alimentación llevarán un convertidor DC/DC tipo Buck, en las que analizaremos el impacto del filtrado que lleven. Como paso previo, realizaremos un estudio de la normativa y de las diferentes tecnologías que tenemos en el mercado hoy día profundizando un poco en ellas.

Finalmente, analizaremos el contenido armónico que emite cada modelo simulado a la red para cada combinación de parámetros, comprobando si cumplimos la normativa vigente sobre emisión de corrientes armónicas.

Todo ello se va a dividir en 7 capítulos. El primer capítulo únicamente tiene como objetivo introducir el contexto del LED y comentar los objetivos del trabajo. En el segundo capítulo haremos un pequeño análisis del marco legal que envuelve a las tecnologías de la iluminación, ya que más tarde comprobaremos si se cumple o no. En el capítulo tres hablaremos de los armónicos, explicando en qué consisten y sus fuentes, comentando finalmente las herramientas de análisis que se utilizan para estudiarlos. En el cuarto capítulo comentaremos a grandes rasgos las tres grandes tecnologías de la iluminación que tenemos en el mercado, para luego en el capítulo quinto desarrollar los tipos de fuentes de alimentación que se utilizan para la tecnología LED, que es la que utilizaremos en nuestro estudio como ya hemos comentado. En el capítulo seis analizaremos el modelo Buck y comprobaremos la herramienta de medida virtual, para finalmente simular y analizar los modelos con los diferentes filtrados. Por último, comentaremos las conclusiones que hemos recogido en el estudio realizado en el capítulo séptimo.

En los anexos añadiremos tablas que obtuvimos en las hojas de cálculo para comparar los resultados obtenidos y comprobar si cumplen la normativa.

## **CAPÍTULO 2. MARCO LEGAL DE EMISIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS A LA RED ELÉCTRICA.**

El objetivo de este capítulo es definir los límites legales de emisión de armónicos a la red eléctrica, puesto que en el desarrollo del trabajo indicaremos si la fuente de alimentación cumple o no la normativa.

La emisión de armónicos por los dispositivos eléctricos o electrónicos viene regulada y clasificada por la norma UNE-EN IEC 61000-3-2:2019. Indica de forma clara qué límites de emisión debemos cumplir para las cuatro clases de dispositivos, pero nosotros nos vamos a centrar en definir únicamente los dispositivos de clase “C”, que es la que engloba a las lámparas LED (y por consiguiente a sus fuentes de alimentación).

Para su puesta en el mercado tenemos que cumplirla, y para ello, más adelante haremos una clasificación comentando qué casos son susceptibles de comercializarse.

### **2.1 Introducción a la normativa.**

Como ya adelantamos en la introducción, la norma UNE-EN IEC 61000-3-2:2019, es decir, la norma de compatibilidad electromagnética (CEM), limita legalmente las corrientes armónicas que pueden emitir equipos sometidos a ensayos bajo condiciones específicas. El objetivo de esta norma es que los elementos conectados a la red no emitan armónicos de manera que puedan superar los niveles de distorsión armónica compatibles definidos en la norma 61000-2-2.

Esta es ratificada por AENOR, teniendo equivalencias internacionales en el ámbito europeo (EN IEC 61000-3-2:2019) e internacional (IEC 910000-3-2:2008), habiéndose validado a fecha de 2019-04-01.

En ocasiones se da una mala interpretación a la normativa, dado que su función principal no es reducir a cero la tasa de distorsión armónica (en adelante THD, si no que el objetivo es cumplir los límites establecidos, permitiendo el uso en estos casos de soluciones pasivas, ya que con cumplir los límites legales basta [2].

En el caso hipotético de que el dispositivo en cuestión no cumpla la normativa, puesto que las corrientes no tengan niveles aceptables de armónicos, los propietarios u operadores del sistema tendrán que tomar medidas para modificar el sistema [2].

### **2.2 Campo de aplicación.**

La norma definida anteriormente es aplicable a todos los equipos eléctricos o electrónicos enchufables a la red pública en baja tensión con una corriente de

entrada por fase  $\leq 16$  A. Los equipos de soldadura por arco no profesionales con una corriente de entrada  $\leq 16$  A están incluidos en la norma.

Están exentos aquellos equipos de soldadura por arco profesionales, quedando sujetos a restricciones que no cabe mencionar en este trabajo.

### 2.3 Clasificación de los equipos.

Con relación a la limitación de la corriente armónica que emiten los equipos, estos mismos se clasifican en 4 categorías (Tabla 2).

- Clase A:
  - Equipos trifásicos equilibrados.
  - Equipos electrodomésticos, exceptuando aquellos aparatos identificados como pertenecientes a la clase D.
  - Herramientas, a excepción de las herramientas portátiles.
  - Reguladores de luz para lámparas de incandescencia.
  - Equipos de audio.
  - El resto de los equipos no considerados en ninguna de las otras 3 clases.
- Clase B:
  - Herramientas portátiles.
  - Equipos de soldadura por arco que no sean profesionales.
- Clase C:
  - Equipos de iluminación.
- Clase D:
  - Equipos con una potencia inferior o igual a 600W, ya sean ordenadores personales y pantallas de ordenadores personales y/o receptores de televisión.

CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Equipos trifásicos equilibrados. Aparatos electrodomésticos, excluidos los equipos identificados como de clase D. herramientas, excepto herramientas portátiles. atenuadores para lámparas incandescentes. equipo de sonido.	herramientas portátiles. equipos de soldadura de arco que no es un equipo profesional.	equipos de iluminación.	ordenadores personales y monitores de computadoras personales. receptores de televisión. refrigeradores y congeladores que tienen uno o más accionamientos de velocidad variable para controlar el (los) motor (es) del compresor.

Tabla 2. [7]

## 2.4 Límites para equipos de clase C.

La clase “C” engloba a los equipos de iluminación, que son objeto de estudio en nuestro trabajo, por ello profundizaremos un poco más en ella, indicando los límites que exige en función de la potencia activa de la luminaria.

La norma divide los límites de emisión de armónicos basados en su potencia activa en 25W. Las luminarias que tienen una potencia menor de 25W tienen que cumplir al menos uno de los dos criterios que se exponen a continuación:

- El tercer armónico no puede exceder el 86% del fundamental.
- El quinto armónico no puede exceder el 61% del fundamental.

Lo primero de todo, hemos de añadir que el orden de los armónicos se clasifica de forma que el tercer armónico es la frecuencia fundamental multiplicada por tres, el quinto armónico es la frecuencia del fundamental multiplicada por cinco, y así sucesivamente, aunque en el siguiente capítulo profundizaremos más en el campo de los armónicos.

Sin embargo, si las luminarias tienen una potencia activa mayor de 25W tienen que seguir los preceptos que indica la siguiente tabla.

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

\* $\lambda$  es el factor de potencia del circuito.

Tabla 3. Corriente armónica máxima admisible para un elemento de potencia superior a 25W. [UNE 61000-3-2]

En el apartado de conclusiones comprobaremos que simulaciones cumplen la normativa.



### CAPÍTULO 3. FUENTES DE ARMÓNICOS Y TÉCNICAS BÁSICAS DE ANÁLISIS.

Dado el objetivo del trabajo, es importante definir el concepto de armónico y los tipos que tenemos. También es importante conocer los efectos que tienen dado que muchos aparatos eléctricos y también instalaciones se están viendo afectadas por su presencia. Haremos un breve repaso de las fuentes de emisión de armónicos, entre las que se encuentran nuestras fuentes de alimentación conmutadas.

Finalmente, explicaremos conceptos importantes en el análisis como son las series de Fourier y el análisis en frecuencia, pasando por la transformada de Fourier, comentando además de forma breve el efecto de la cancelación.

#### 3.1 Las perturbaciones armónicas.

Los armónicos son ondas generadas a partir de cargas no lineales alimentadas por una corriente sinusoidal con una frecuencia dada que tienen una forma diferente a la onda sinusoidal con frecuencias distintas.

Otra definición de armónico según [7] dice que son las tensiones y corrientes sinusoidales que tienen frecuencias múltiplo de la señal de la red de alimentación (Por ejemplo, para una red de 50Hz, los armónicos se encuentran en 100Hz, 150Hz...), y la desviación de la sinusoidal se mide en términos de distorsión armónica de la corriente y la tensión.

La presencia de armónicos puede deteriorar la calidad de la señal eléctrica. Una onda de tensión debe tener idealmente una forma sinusoidal perfecta con una amplitud y frecuencia dada, y toda deformación de la onda significa que tiene contenido armónico. Ese contenido armónico puede deteriorar el valor pico y RMS de la onda de tensión, produciendo una pérdida de calidad.

En la siguiente figura tenemos un ejemplo de una onda sinusoidal pura y todo lo que se aleje de este modelo de señal supone una distorsión.

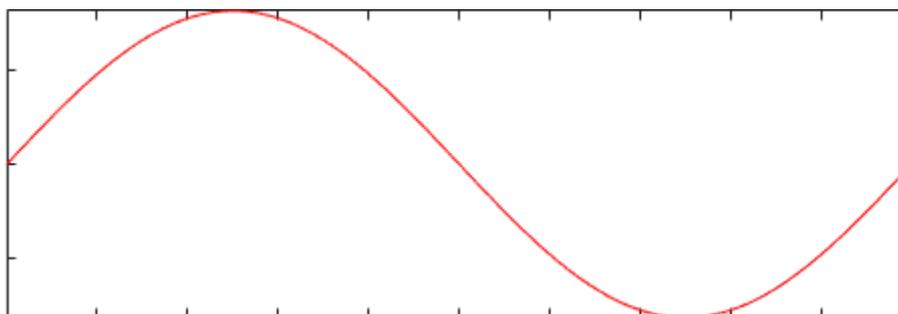


Figura 1. Onda sinusoidal pura.

Dos parámetros muy importantes en el análisis de la forma de onda son el factor de potencia (FP) y la potencia de distorsión (D). El factor de potencia lo habíamos definido previamente, a lo que añadiremos que es una relación entre la potencia

activa y la aparente (1). La potencia de distorsión no depende de la componente fundamental de la corriente, depende del orden de los armónicos que contiene (2) [2].

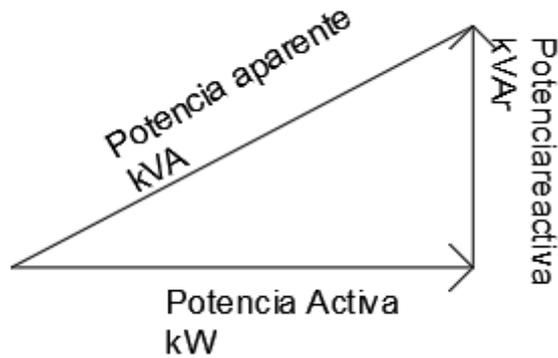


Figura 2. Triángulo de potencias.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1)$$

$$D = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (2)$$

El sistema de la señal con contenido armónico se compone de dos clases de frecuencias diferenciadas:

- Frecuencia fundamental: La frecuencia de la onda periódica.
- Frecuencia armónica: La frecuencia de los armónicos de la onda.

La frecuencia de los armónicos son múltiplos de la frecuencia fundamental. Su análisis se refleja en una gráfica que contiene el espectro armónico de la señal. En la siguiente figura ponemos un ejemplo de señal con armónicos impares (1,3,5...).

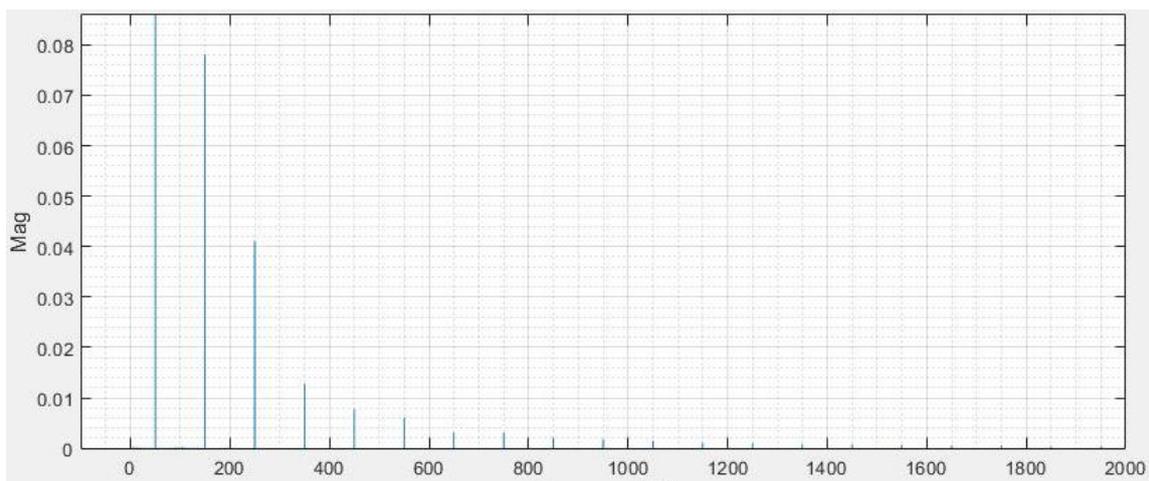


Figura 3. Ejemplo de señal con armónicos.

Un estudio en [7] desvela que para casos de luminarias LED con una potencia inferior a 30W (Tabla 4), usando un controlador que no elimina de forma significativa los armónicos, el tercer armónico supone en torno a un 80% de la distorsión de la señal, con hasta 150% de THD. En el caso anterior se da la situación de que no se aplican los filtros necesarios para hacer cumplir la normativa vigente.

Al contrario, en las luminarias donde se utilizan filtros para reducir la distorsión de la corriente de entrada se ve claramente la reducción de esta (Tabla 5), dado que la influencia del tercer armónico se reduce a valores inferiores al 50%, y en el caso de la THD se encuentra en torno al 60%, valores muy distantes a los que no constaban de un filtro determinante.

Luminarias de ensayo	Tercer armónico [%]	THD
Osram [4W]	89.24	173.9
Osram [6W]	91.96	174.3
Evenzo [3W]	90.7	164.35
Bright [5W]	86.65	167.2
Cash [7W]	91.23	168.2
Osram [4W]	91.4	174.1
LED S7 [11,9W]	96	182
LED S8 [12W]	96	184
LED S9 [30W]	89	132
LED B5	N/A	101.1

Tabla 4 [7]

Luminarias de ensayo	Tercer armónico [%]	THD
Phillips [4W]	34.61	63.05
Osram [10W]	32.12	34.78
Toshiba [5.5W]	73.4	106.3
Philips [5W]	35.3	64.1

Tabla 5. [7]

### 3.1.1 Fuentes principales de armónicos.

En estos nuevos tiempos la electrónica está abriéndose paso de forma exponencial, siendo una de las principales fuentes de vertido de armónicos a la red eléctrica, reduciendo la calidad de esta, por lo que cabe resumir cuáles son las principales fuentes de contenido armónico.

La electrónica de consumo, la irrupción en el mercado de los inversores fotovoltaicos, el uso de lámparas LED de forma generalizada, etc., fomentan esa emisión. Como ya hemos comentado previamente, la fuente principal de armónicos es la presencia de cargas no lineales en la red eléctrica. Las principales fuentes son [8]:

- Hornos de arco y elementos de descarga de arco.
- Núcleos magnéticos en transformadores y maquinas rotativas.
- Variadores de velocidad.
- Fuentes conmutadas para alimentación de equipos electrónicos (Lámparas LED).
- Rectificadores basados en diodos o tiristores.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión de alto voltaje.
- Convertidores AC/DC

### 3.1.2 Consecuencias de los armónicos.

En este apartado pasaremos a enumerar y detallar de forma muy breve los efectos que tienen los armónicos en nuestros equipos. Primero cabe decir que nuestros equipos e instalaciones eléctricas están diseñados desde un principio para trabajar con valores nominales, que finalmente son variados por la presencia de estos.

Desde el principio las instalaciones eléctricas y los equipos no se han diseñado con el objetivo de soportar corrientes armónicas, pero con el paso del tiempo y las nuevas tecnologías se han ido añadiendo a la red eléctrica por medio de las ya famosas cargas no lineales, y esto está provocando que muchos aparatos eléctricos e instalaciones se vean afectados.

Entre los principales problemas están:

- El calentamiento en los conductores generado por el paso de corriente. Con el aumento de la frecuencia aumenta la resistencia al paso de esta, dado que disminuye la sección efectiva del conductor, ya que la densidad de corriente aumenta a medida que nos acercamos a la superficie de este. Esto significa que los armónicos provocan un deterioro de los aislamientos de los conductores, pudiendo dar lugar a problemas por contactos indirectos, llegando a lesiones por choque eléctrico que pueden producir la muerte en el peor de los casos.
- El calentamiento en los transformadores producido por el aumento en las pérdidas en el hierro y en el cobre, que nos aumenta la temperatura que tiene normalmente trabajando en su potencia nominal.
- En el caso de los fusibles y magnetotérmicos, que protegen el circuito contra sobrecorriente y sobrecalentamiento, no se ven afectados ya que protegen contra el valor RMS de la corriente, en el caso de que esta no se vea afectada.

En edificios con alta densidad de cargas no lineales, como oficinas con cantidad elevada de equipos electrónicos, es aconsejable usar una protección diferencial (en el caso de que la instalación la requiera) superinmunizada, es decir, para corrientes diferenciales de 300mA, para evitar que los efectos de los armónicos, o las corrientes de fuga de los elementos no lineales disparen las protecciones diferenciales [9][2].

### 3.1.3 Series de Fourier.

La energía que consumimos de la red eléctrica se genera principalmente en máquinas rotativas (turbinas) que emiten una señal muy parecida a una onda sinusoidal representada en el tiempo. La contaminación de la red llega principalmente cuando emitimos energía por medio de fuentes de alimentación conmutadas (inversores solares) o cuando conectamos cargas no lineales. Igualmente, la onda que vamos a consumir va a suponer una onda periódica, por lo que aquí entra en juego el concepto de series de Fourier.

Lo primero va a ser definir el concepto de función periódica. Se considera una función periódica de periodo T una función que cumple lo siguiente [10]:

$$f(t) = f(t + T) \quad (3)$$

Fourier consolidó la idea de que cualquier tipo de función periódica de periodo T puede ser descompuesta por medio de una suma infinita de funciones simples, sinusoidales, de frecuencia múltiplo de la original. La función descompuesta se define de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t \quad (4)$$

Dónde:

- $w_0$  es la frecuencia fundamental, o la frecuencia de la función periódica.
- $a_n$  y  $b_n$  son coeficientes que definen las funciones seno que intervienen en la onda original.

En definitiva, la función se puede descomponer en una componente fundamental, que tiene un valor de frecuencia igual a la fundamental, y el resto se compone de una serie de componentes armónicas cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental.

A lo largo del documento veremos mencionar muchas veces el “Espectro de frecuencias”, por lo que será necesario definirlo. El espectro corresponde a la representación gráfica de la amplitud en función de la frecuencia de las componentes armónicas (y la fundamental) de la función periódica. De esta manera podemos cuantificar visualmente el efecto que tienen los armónicos en la calidad de la energía.

En la figura que sigue al texto encontramos un ejemplo de señal periódica que no sigue una forma sinusoidal, y mediante la descomposición en una serie de funciones senoidales simple podemos definirla. Se ve en detalle como la señal original queda descompuesta en una señal principal de su misma frecuencia y en una serie infinita de señales sinusoidales.

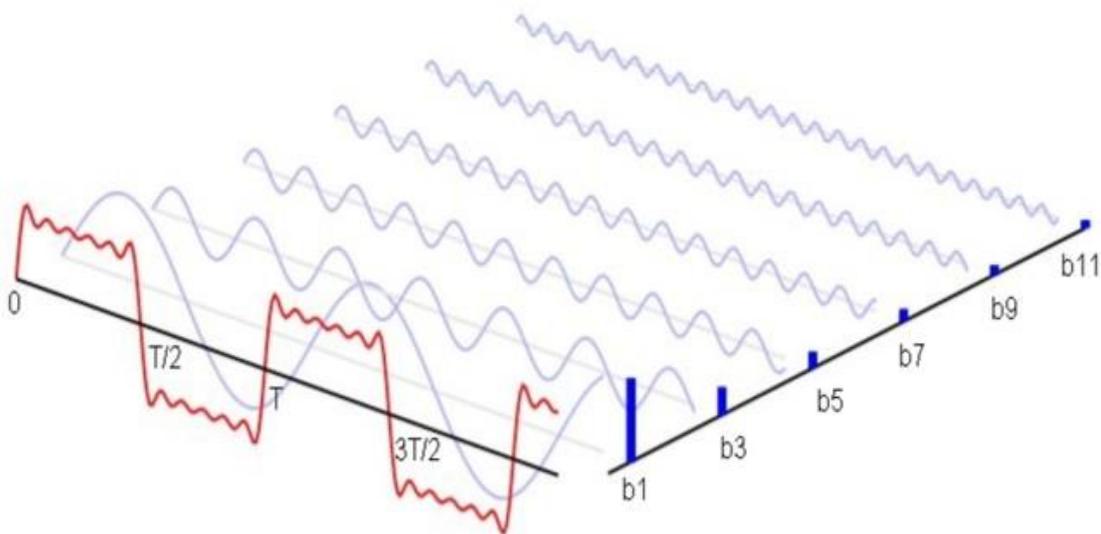


Figura 4. Ejemplo de descomposición de una onda periódica en las ondas periódicas que la componen. Fuente: Wikimedia Commons

### 3.1.4 El efecto de la cancelación.

Numerosos estudios han demostrado que la presencia de numerosas cargas no lineales como los driver de alimentación LED pueden tener un impacto positivo en la reducción de los efectos de los armónicos en la calidad de la red, porque la presencia de diferentes dispositivos con diferentes topologías permite sumar los ángulos de fase de las corrientes armónicas y eso hace que la magnitud del vector suma sea menor que si realizamos la suma aritmética de las corrientes armónicas, conociéndose este efecto como cancelación [11].

Cuando varias cargas están conectadas a la misma fuente se denota una cancelación de las magnitudes sobre el tercer armónico en adelante, pero solo afecta para armónicos en baja frecuencia cuando multitud de lámparas están conectadas de forma simultánea [11].

El uso del efecto de cancelación entre luminarias LED y otros equipos electrónicos permite manejar la situación de forma eficiente. Es recomendable el uso de diferentes elementos con diferentes formas de onda para alentar la cancelación [11].

El efecto de la cancelación difiere entre el orden de los armónicos y depende en gran parte de la distorsión del voltaje. Dicha distorsión tiene un elevado impacto en los armónicos de corriente producidos por lámparas LED. La distorsión de la corriente depende de las magnitudes y de los ángulos de los armónicos de las fuentes de tensión y la distorsión armónica no siempre decrece con el aumento de la distorsión del voltaje [11].

## 3.2 Análisis en frecuencia.

El aspecto más importante del presente proyecto corresponde al análisis en frecuencia de la señal de corriente de entrada, que nos permite determinar si la señal está distorsionada debido a los armónicos e interarmónicos. Este análisis nos permite visualizar de forma gráfica la presencia de señales con una frecuencia diferente del fundamental.

Una señal sinusoidal como correspondería a la señal de la red eléctrica debe tener una forma lo más parecida a una función seno, con una frecuencia de 50Hz (fundamental) y un valor de tensión en RMS de 230VAC. Toda señal periódica que aparezca en otras frecuencias (100Hz, 150Hz...) supondrá una distorsión en la forma senoidal de la onda, perdiendo calidad, pudiendo llegar a dañar los dispositivos conectados en la red tanto propia como de las instalaciones circundantes.

Entonces el objetivo del análisis en frecuencia es determinar la cantidad de armónicos que tiene la onda, observando las barras espectrales o “bins” en inglés que nos ofrece el espectro de frecuencias, determinando su calidad por medio de

la tasa de distorsión armónica o THD por sus siglas en inglés (Total Harmonic Distortion).

Las señales se analizan en un tramo de tiempo acotado llamado “ventana de muestreo ( $t_w$ )” recogiendo un conjunto de muestras “M” de la señal, siendo un valor útil para definir la transformada discreta de Fourier (DFT) [17]. El inverso de la ventana de muestro define la resolución espectral [17], que más tarde definiremos.

### 3.2.1 Barras espectrales

Las barras espectrales indican la magnitud de la señal analizada para cada una de las frecuencias que contiene. Dichas barras se ubican de forma uniforme a lo largo de todo el eje de frecuencias, llegando hasta la frecuencia de Nyquist [17]. Estudiaremos un valor máximo de frecuencias y tomaremos una muestra en frecuencia cada  $\frac{1}{t_w} Hz$ , siendo “ $t_w$ ” la ventana de tiempo elegida para la simulación, por lo que si tomamos una ventana de tiempo de 10 segundos tendremos una muestra en frecuencia cada 0.1Hz. La resolución espectral es la distancia en Hertzios ( $\frac{1}{t_w} Hz$ ) entre dos barras espectrales [17].

Podemos diferenciar dos componentes perjudiciales en la señal:

- Armónicos: Son las componentes cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si el fundamental es 50Hz un armónico sería 100Hz.
- Interarmónicos: Son las componentes cuya frecuencia es un valor intermedio entre los armónicos. Por ejemplo, en el caso de un fundamental de 50Hz un ejemplo de interarmónico sería 78Hz.

Si clasificamos según el rango de frecuencias que ocupa tenemos obtenemos el siguiente orden [13]:

- Armónicos de bajas frecuencias: Corresponden a los armónicos que se encuentran entre 0 y 2kHz.
- Armónicos de altas frecuencias o supraarmónicos: Corresponden a los armónicos superiores a 2kHz.

Según [13] los supraarmónicos tienen un comportamiento diferente a los de baja frecuencia. El mal comportamiento de estos recae en un funcionamiento erróneo en la electrónica de consumo, dispositivos médicos, dispositivos de medida y explosión de capacitores. Hasta hace poco, los estándares EMC (de compatibilidad electromagnética) obviaban las altas frecuencias.

Mediante un filtro capacitivo pasivo se puede limitar el efecto de estos, pero incrementa el coste y el tamaño del filtro, convirtiéndose en una opción poco atractiva para el consumidor.

En la figura 5 observamos un ejemplo de análisis del modelo de convertidor Buck al que eliminamos el filtro capacitivo y nos aparece una componente de frecuencia en 100kHz, que corresponde a la frecuencia a la que conmuta el polo de potencia, y también salen armónicos a los múltiplos de frecuencia de la frecuencia de conmutación a los 200kHz. En la señal temporal se ve cómo al retirar el filtro tenemos la señal chopeada por el conmutador.

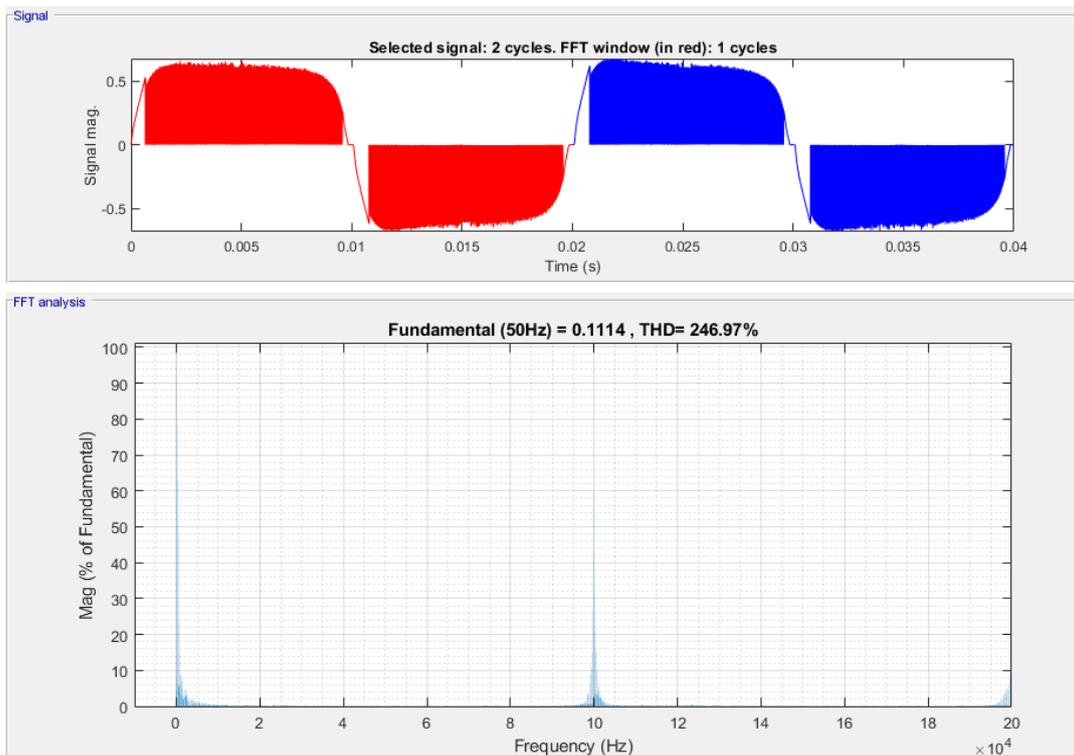


Figura 5. Ejemplo de Supraarmónicos.

Como dijimos al principio de la sección, los armónicos en altas frecuencias afectan de forma muy diferente a los de bajas, de forma que los de alta emiten la distorsión a los dispositivos del vecino y no a la red. Este tipo de armónicos se dan en lámparas LED, convertidores fotovoltaicos y cargadores de vehículo eléctrico fundamentalmente.

En la Figura 6 ponemos un ejemplo de señal de corriente analizada cuyo fundamental se encuentra a 50Hz, representándose en este caso los armónicos e interarmónicos hasta 5kHz.

También queda demostrado que los armónicos se reducen a medida que se incrementa el orden, siendo el mayor el que ocupa el fundamental [14].

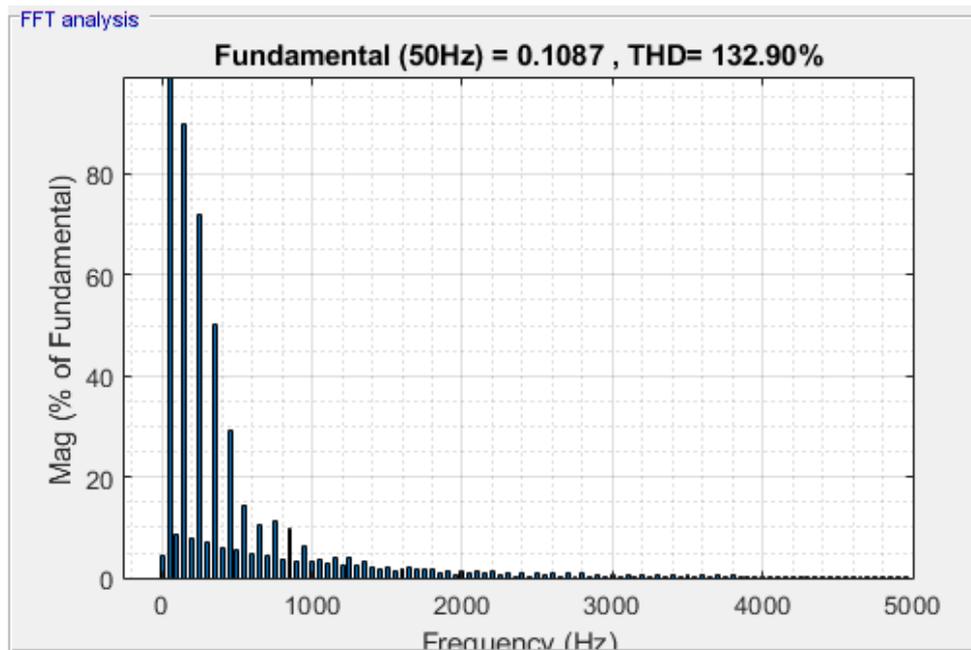


Figura 6. Ejemplo de análisis armónico.

### 3.2.2 Índices de distorsión.

Hablando en términos de calidad de señal cabe señalar el parámetro que desde mi punto de vista es más determinante. Estamos hablando de los índices de distorsión armónicos, que nos permite evaluar cuánto se aleja una onda periódica de una sinusoidal de la misma frecuencia, ya que la señal de la red eléctrica es más pura cuanto más se acerca a una senoidal, por tanto, cuando no se asemeja a una senoidal decimos que está distorsionada [15].

La evaluación de la distorsión se realiza relacionando las amplitudes o valores eficaces de los armónicos de una señal periódica con el de su componente fundamental, que originalmente sólo se tiene en cuenta los valores de los armónicos, no de los interarmónicos, pero esa tasa se puede complementar añadiéndolos. En nuestro caso el análisis de la THD lo haremos contando con los interarmónicos. La expresión de la THD queda:

$$THD = \frac{1}{C_1} \sqrt{\sum_{n=2}^N C_n^2} \times 100 \quad (5)$$

Dónde:

- N es el número máximo de componentes armónicas que vamos a tener en cuenta en el cálculo. Normalmente en ingeniería sólo se tienen en cuenta

40 unidades, pero más adelante veremos qué podemos hacer un estudio aún mucho más exhaustivo.

- $C_1$  es la componente fundamental de la señal periódica.
- $C_n$  es la componente del armónico  $n$ -ésimo de la señal.

A continuación, vamos a estudiar un caso particular de una señal generada en SIMULINK por medio de generadores de señal ideales, siendo una herramienta muy potente para realizar un estudio tanto de la señal temporal como en frecuencia.

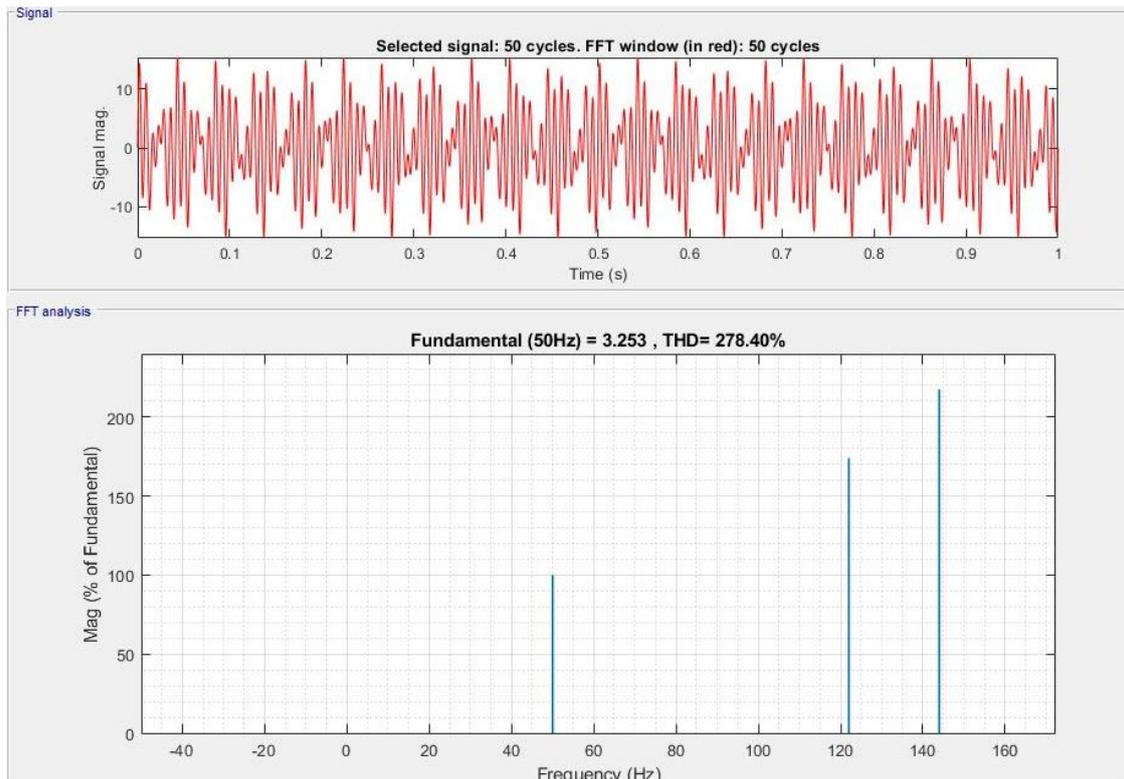


Figura 7. Análisis temporal y en frecuencia de señal de corriente que alimenta a una carga resistiva por medio de tres fuentes ideales de tensión.

En la Figura 7 representamos la forma de onda de la corriente de alimentación a una carga resistiva por medio de 3 generadores de señal sinusoidal ideales. Sobre esta imagen he de añadir que en casos reales los armónicos descienden a medida que aumenta el valor de su frecuencia. Estos generadores tienen los siguientes parámetros:

- 230VAC a 50Hz.
- 400VAC a 122Hz.
- 500VAC a 144Hz.

Vemos claramente como la señal temporal dista mucho de la senoidal pura a 50Hz que hemos configurado en SIMULINK como fundamental, ofreciéndonos una THD

(en este caso incluye tanto armónicos como interarmónicos) de 278,40% (un valor alto si tenemos en cuenta que en las lámparas de alimentación LED los valores óptimos están entre 100 y 140% [16]).

Finalmente contrastamos el valor de la tasa con lo que debería de dar de forma teórica:

$$THD = \frac{\sqrt{400^2 + 500^2}}{230} \times 100 = 278,3967 \approx 278,40$$

En función de los armónicos que analicemos tenemos las siguientes tasas:

- THD\_LF (Total Harmonic Distortion para LowFreq) que corresponde al análisis de los armónicos entre el 2° y el 40°, que ya comentamos previamente. Hay que tener en cuenta que estamos hablando de la posición del armónico y no de su valor, por ejemplo, si trabajamos con un fundamental de 50Hz su 40° posición sería 2kHz.
- TH\_IHD\_LF (Total Harmonic & InterHarmonic Distortion para LowFreq) que corresponde al análisis tanto de armónicos como de interarmónicos entre el 2° y 40°.
- TH\_IHD\_HF (Total Harmonic & InterHarmonic Distortion para HighFreq) que tiene en cuenta armónicos como interarmónicos para los armónicos superiores al 40°.
- TH\_IHD\_LF\_HF (Total, Harmonic & InterHarmonic Distortion para LF y HF) que mide armónicos e interarmónicos desde el segundo armónico.

### 3.2.3 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier corre un papel fundamental en el análisis en frecuencia, ya que como explicaremos más tarde, es capaz de convertir una función matemática en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Los instrumentos de medida de señales en el dominio de la frecuencia en su mayoría sólo detectan armónicos, dado que emplean un mecanismo PLL (phase locked loop) que sincroniza con la frecuencia fundamental de la señal y la muestrea para posteriormente analizarla usando la transformada rápida de Fourier (FFT), que será el objeto de estudio en este subcapítulo. Esto significa que si la señal contiene interarmónicos no sincronizados ese análisis será incompleto [17].

Primero vamos a empezar por definir la transformada discreta de Fourier (DFT). Es un tipo de transformada discreta que convierte una función matemática en el dominio del tiempo en otra que esté representada en el dominio de la frecuencia [18], con la particularidad de que la función a transformar debe ser una secuencia discreta y acotada en el tiempo. Esa acotación la define la ventana de muestreo (tw) cuyo valor inverso define el conjunto de muestras en frecuencia y la secuencia discreta la define el número definido de muestras (M) [17]. La DFT se realiza con la

señal contenida en la ventana de tiempo, siendo el resto de la señal virtualizada en función de lo que se contenga dentro.

La elección de la ventana de muestreo ha de ser múltiplo de todos los periodos de las frecuencias contenidas en la señal, siendo preferiblemente el mínimo común múltiplo de todos los periodos de frecuencias, pero esto da lugar al menos a tres problemas [17]:

- La ventana  $t_w$  puede ser demasiado larga ocasionando un número de muestras elevado dando lugar a tiempos de cómputo muy elevados.
- Se presupone que la señal es estacionaria, de lo contrario resulta imposible encontrar una ventana de muestreo que contenga todos los periodos posibles.
- Es imposible conocer todas las frecuencias que componen una señal desconocida.

Para comprobar efecto que tiene la ventana de tiempo sobre la DFT muestro varios ejemplos, en los que muestro una señal creada con un generador ideal con  $t_w=1$  (Figura 9) (una muestra en frecuencia cada 1Hz) y con  $t_w=0.2$  (una muestra en frecuencia cada 5Hz) (Figura 8).

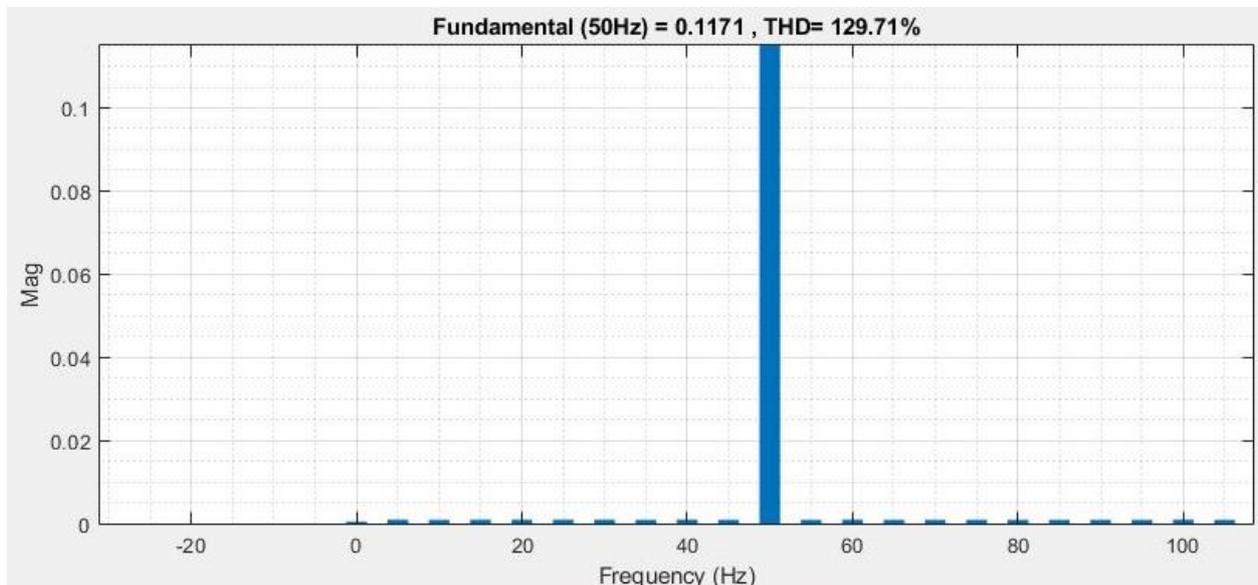


Figura 8. Muestra en frecuencia cada 5Hz (1/0.2s)

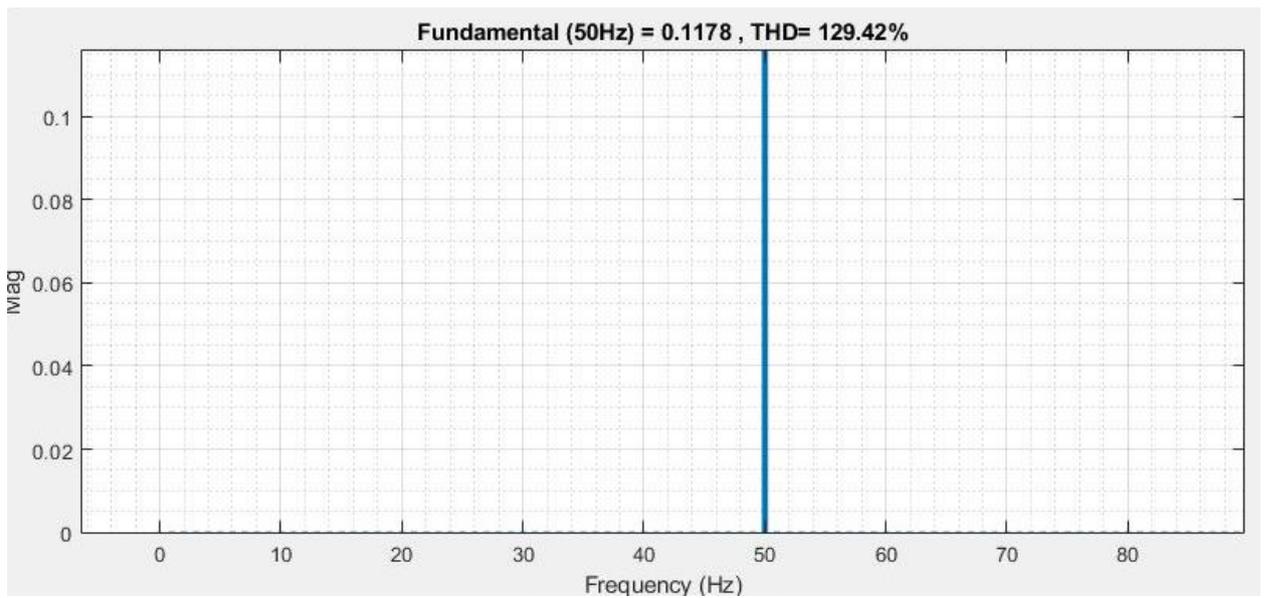


Figura 9. Muestra en frecuencia cada 1Hz (1/1s)

## **CAPÍTULO 4. TECNOLOGÍAS DE LA ILUMINACIÓN.**

Este capítulo viene motivado por la necesidad de elaborar un breve estudio de las tecnologías de iluminación que se utilizan hoy en día. Primero ubicaremos el contexto histórico de la iluminación eléctrica y posteriormente analizaremos un poco más detalladamente las lámparas incandescentes, fluorescentes y LED. Dentro de las lámparas LED, hemos considerado oportuno comentar el efecto de la luminiscencia, con el fin de detallar el funcionamiento de la tecnología.

### **4.1 Tecnologías de iluminación.**

La primera bombilla que se patentó para un uso comercial fue en el 27 de enero de 1880 [20], que correspondía a la lámpara incandescente de filamento de carbono, cuya duración llegaba hasta las 40 horas en una horquilla de potencias de hasta 100W [21]. Fue patentada por el conocido inventor Thomas Edison, que se dedicó a trabajar la patente británica de Joseph Swan que fue patentada dos años antes, en 1878 [20]. Esta nueva situación provocó una revolución histórica sin precedentes en el sector de la iluminación que duró hasta la llegada de la primera lámpara fluorescente en 1936. La lámpara fluorescente (CFL) tiene como ventaja principal su bajo consumo para un flujo luminoso similar a las anteriores, pero como contrapartida reduce la calidad de la red de suministro, añadiendo armónicos de tensión [22]. Por último, en el año 1961 se diseña el primer LED que emite luz visible para el ser humano, marcando un cambio en la iluminación que todavía está en evolución, pero que supone un elemento clave en la transición energética hacia la eficiencia.

#### **4.1.1 Lámparas incandescentes.**

Las lámparas incandescentes convencionales se basan en el paso de corriente por un filamento, que dado su calentamiento a elevada temperatura emite radiación visible por el ojo humano [1].

En relación con la potencia eléctrica que consumen su eficiencia es muy baja, dado que la mayoría de la corriente se disipa en forma de calor, extrayendo una potencia calorífica mucho mayor que la potencia luminosa. La parte positiva de esta tecnología es que va directamente conectada a la red eléctrica, sin balastos ni drivers como en el caso de la tecnología CFL y LED [1].

La lámpara se compone del casquillo, el filamento, la ampolla y el gas de relleno entre otras cosas, que en la Figura 10 representamos de forma gráfica.

1. Ampolla: Es la cubierta de cristal que aísla al filamento del exterior evitando su contacto con el aire y su consecuente evaporación [1].

2. Gas de relleno: Se introduce argón o nitrógeno en la ampolla para evitar la evaporación del filamento ya que trabaja a temperaturas extremadamente altas [1].
3. Filamento: Un hilo de wolframio (en el caso de las bombillas actuales). Es un material con alto punto de fusión y bajo grado de evaporación [1].
4. Hilo de contacto (va al pie).
5. Hilo de contacto (va a la rosca del casquillo).
6. Alambre de sujeción y disipación de calor del filamento
7. Conducto de refrigeración y soporte interno del filamento.
8. Base de contacto.
9. Casquillo: Elemento que permite conectar el filamento a la red [24].
10. Aislamiento eléctrico.
11. Pie de contacto eléctrico.

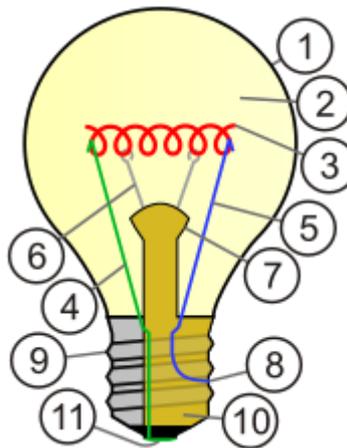


Figura 10. Partes que componen una bombilla. Fuente: Wikipedia.

Con el tiempo se desarrolló una lámpara incandescente con halógenos en el bulbo. Esos halógenos permiten mediante un ciclo regenerativo recuperar el wolframio que se evapora quedando en el fondo del bulbo. Ese ciclo regenerativo consiste en la creación de compuestos de wolframio con halógeno que se combinan permitiendo que el compuesto ascienda hasta el filamento y se descomponga formando parte nuevamente de él. Las ampollas en este caso tienen que ser más pequeñas que las normales, proporcionando mayor durabilidad, eficiencia, y mayor temperatura de color [1]. El ciclo regenerativo se muestra a continuación en la Figura 11.

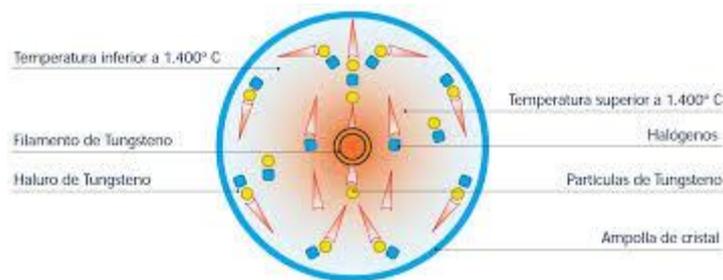


Figura 11. Ciclo regenerativo [24].

#### 4.1.2 Lámparas fluorescentes.

Las lámparas fluorescentes consisten en un tubo de descarga en vapor de mercurio a baja presión, produciéndose la luz mediante polvos fluorescentes que se activan por la energía ultravioleta de la descarga. Junto al vapor de mercurio a baja presión se añade una pequeña cantidad de gas inerte para el arranque y regulación del arco eléctrico. La cantidad de luz emitida y su color dependen de una sustancia luminiscente que se añade en la superficie interior de la ampolla.

En común con la bombilla incandescente clásica tenemos partes como la ampolla, el gas de relleno y los casquillos, utilizando tecnologías diferentes. Además de lo anterior tenemos la capa fluorescente y los electrodos.

- Ampolla: La ampolla de la lámpara fluorescente está fabricada con vidrio cal-soda suavizado con óxido de hierro. Ya no tiene la forma alargada que hacía en las incandescentes, ahora tiene un electrodo a cada lado.
- Polvo fluorescente (o fósforo): Fija la apariencia lumínica de la lámpara, la temperatura de color y el índice de reproducción del color.
- Electrodo: Al igual que en la incandescente sirve para aportar la energía eléctrica necesaria. La mayoría se precalientan antes del arranque con una corriente eléctrica suministrada por un arrancador independiente.
- Gas de relleno: Si en la lámpara incandescente teníamos wolframio y halógenos, en este caso tenemos una mezcla de vapor de mercurio saturado y un gas inerte.

[1]

#### 4.1.3 Lámparas LED.

El LED queda definido por sus siglas como diodo emisor de luz (Light-Emitting Diode en inglés) [19]. Se ha demostrado que la eficiencia de los LED es el doble que la de los fluorescentes y 10 veces superior a las incandescentes con relación a los lúmenes/vatio. Esta tecnología es muy sensible a las fluctuaciones en la tensión y a la baja calidad de potencia [1].

Se compone de un chip semiconductor que le atraviesa una corriente eléctrica cuando está polarizado en directa emitiendo luz. En su funcionamiento apenas eleva su temperatura emitiendo luz monocromática siendo muy útil en la industria de la iluminación. A efectos prácticos, pertenece a la familia de los diodos con la particularidad de que éste emite luz cuando le atraviesa una corriente.

Su mecánica se compone de un hilo fino que atraviesa el LED desde el ánodo hasta el cátodo rodeado por un encapsulado de epoxi que aísla del ambiente.

El LED se compone en la mayoría de sus casos de Silicio dopado. Para el dopaje tenemos dos tipos representados en la Figura 12 [25]:

- Tipo N: Aportamos átomos de impurezas que permiten la aparición de electrones sin que haya huecos asociados al semiconductor. Estos donan al semiconductor los electrones por lo que se les apoda “donantes”.
- Tipo P: Aportamos átomos de impurezas que permiten la formación de huecos sin que aparezcan electrones asociados a los mismos.

Para que se produzca la emisión de la luz hay que aplicar una tensión entre ánodo (+) y cátodo (-) de manera que la corriente fluya desde el negativo hacia el positivo.

Estos materiales se unen formando una barrera donde se genera un campo eléctrico muy potente. Si el diodo se polariza de forma directa, se genera una corriente que fluirá desde N hasta P, pero si al contrario se polariza de forma inversa este bloqueará la corriente [26].

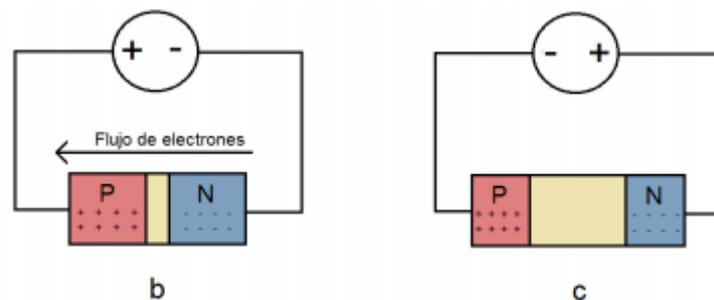


Figura 12. Estructura interna del diodo LED [26].

Cuando un electrón fluye del semiconductor N al P entra en un nivel energético de menor energía por lo que libera un fotón que lleva asociado una onda electromagnética. En resumen, son diodos que emiten fotones en frecuencias dentro del espectro visible [26].

La particularidad de las lámparas LED parte de que se alimentan de un driver (fuente de alimentación) que convierte la corriente alterna en corriente continua y la adapta a los parámetros que aportan una mayor eficiencia a la carga. Otra particularidad de esta fuente es que la fuente de emisión de luz son diodos.

En la Figura 13 representamos los componentes de un diodo LED, que se recubre de una cubierta de resina epoxi, recubriendo el chip semiconductor sellándolo en forma de cápsula, permitiendo controlar el tipo de luz emitida, controlando la dirección de emisión y el color requerido [26].

Se compone de:

- Ánodo.
- Cátodo.
- Chip LED.
- Resina epoxi.
- Reflector.
  
- Bigote.

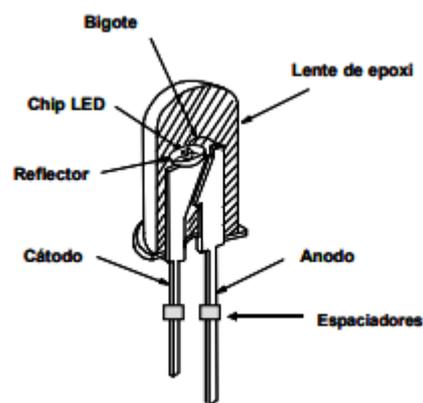


Figura 13. Componentes del diodo emisor de luz [26].

Por último, estas lámparas se alimentan con una fuente de alimentación como ya comentamos antes, ya que necesitan unos valores estables de tensión y corriente. Estas fuentes serán objeto de estudio en nuestro trabajo con el fin de determinar la calidad de la corriente en función de los parámetros a los que estén sometidas. Normalmente se contemplan:

- Buck o reductor.
- Boost o elevador.
- Buck-Boost o reductor elevador.

Nosotros utilizaremos el Buck como objeto de estudio como ya hemos comentado en otras ocasiones.

Más adelante serán especificadas estas fuentes.

#### **4.1.3.1 El proceso de electroluminiscencia.**

El proceso de electroluminiscencia es el fenómeno de emisión de fotones por parte del LED cuando este está polarizado en directa.

Los LED están formados por un material semiconductor de unión PN ya explicado anteriormente [27], que forma la estructura principal de los componentes electrónicos. Está formada por la unión de dos cristales de silicio de naturalezas P y N obtenidos de dopar cristales de metal puro con algún otro metal.

La capa prohibida del semiconductor utilizado es muy pequeña por lo que los electrones de la capa de valencia son capaces de saltar con mayor facilidad a la capa de conducción dejando huecos que permiten la conducción eléctrica (Figura 14). El color del proceso de electroluminiscencia difiere dependiendo del intervalo de la banda de energía que tengamos.

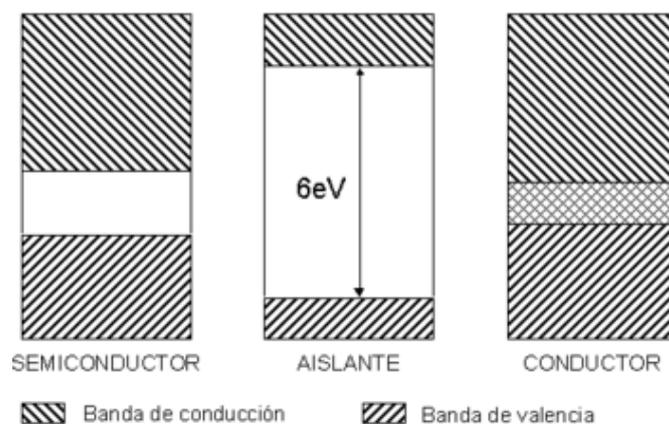


Figura 14. Bandas energéticas. [Wikipedia]

Esta emisión de fotones permite la emisión de ondas electromagnéticas cuya longitud de onda se encuentra dentro del espectro visible que encontramos en la Figura 15, correspondiendo a la emisión de lo que todos conocemos como “luz”. Dentro de ese espectro visible podemos encontrar desde los 330nm hasta 730nm de longitud de onda [28].

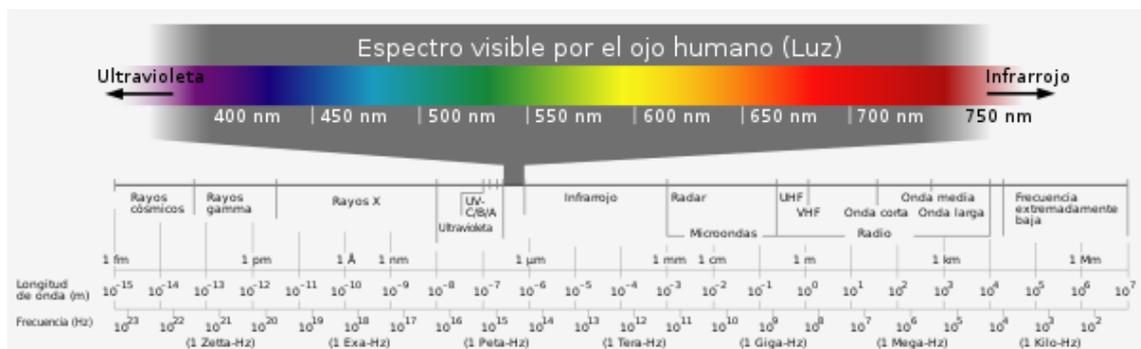


Figura 15. Espectro visible por el ojo humano [Wikipedia].

## CAPÍTULO 5. TIPOS DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA LÁMPARAS LED.

Como ya comentamos en otros capítulos, el objetivo principal es hacer un análisis de las fuentes de alimentación para lámparas LED, en concreto sobre los modelos Buck con sus correspondientes filtrados. Por ello cabe redactar una explicación sobre su funcionamiento teórico.

Los LED en su origen allá por los años 60, se han utilizado para señalizaciones o usos dónde se reclama poca potencia. Esta tecnología era muy simple, basada en una fuente de corriente continua en serie con una resistencia para aplicaciones de corriente reducida. Con el desarrollo de LED de mayor potencia se han desarrollado tecnologías que permiten la alimentación desde la red de distribución alterna a 230V mediante topologías que pretenden minimizar las pérdidas en la lámpara por medio del uso de fuentes conmutadas de alta frecuencia (cuanto mayor sea la frecuencia de conmutación menores son las pérdidas en las resistencias de los circuitos de control). Este nuevo concepto de convertidor AC/DC va a contar en los casos básicos con [24]:

- Filtro EMI que reduce la distorsión que introducen las cargas no lineales a la red.
- Puente rectificador.
- Convertidor DC/DC que mantiene la corriente de alimentación a los LED constante.
- Condensador electrolítico para mantener la tensión de salida constante.
- Corrector del factor de potencia.

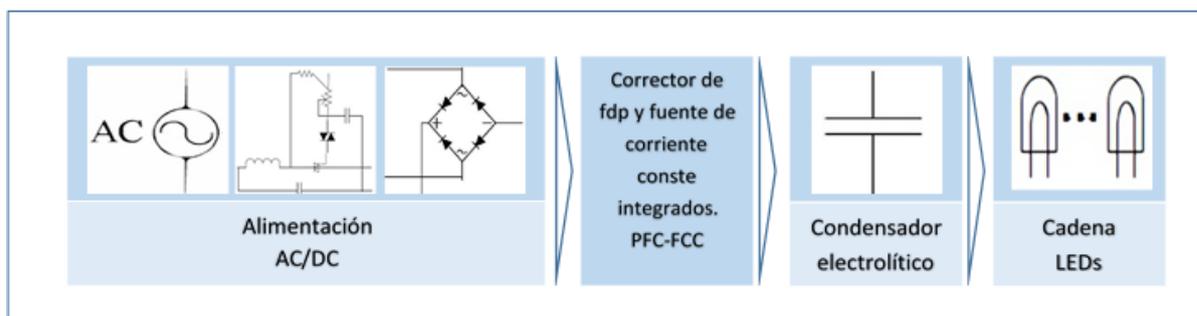


Figura 16. Componentes de una fuente de alimentación de una lámpara LED [24].

### 5.1 Fuentes de alimentación de lámparas LED.

La búsqueda de aumentar la eficiencia a las lámparas LED de bajo coste está aumentando la necesidad de realizar estudios de los circuitos de alimentación sobre su impacto en los parámetros que determinan la calidad de la potencia que consume [3].

Las fuentes de alimentación se dividen en varios bloques con diversas funciones. Partimos de los bloques del condensador electrolítico y la fuente de corriente, cuya función reside principalmente en mejorar la eficiencia de la conversión y la vida útil de la carga [24]. En el estudio de los bloques encontramos una distorsión de la intensidad consumida que corresponde al funcionamiento del puente rectificador, haciendo necesario el uso de un bloque corrector del factor de potencia [24] (Figura 17).

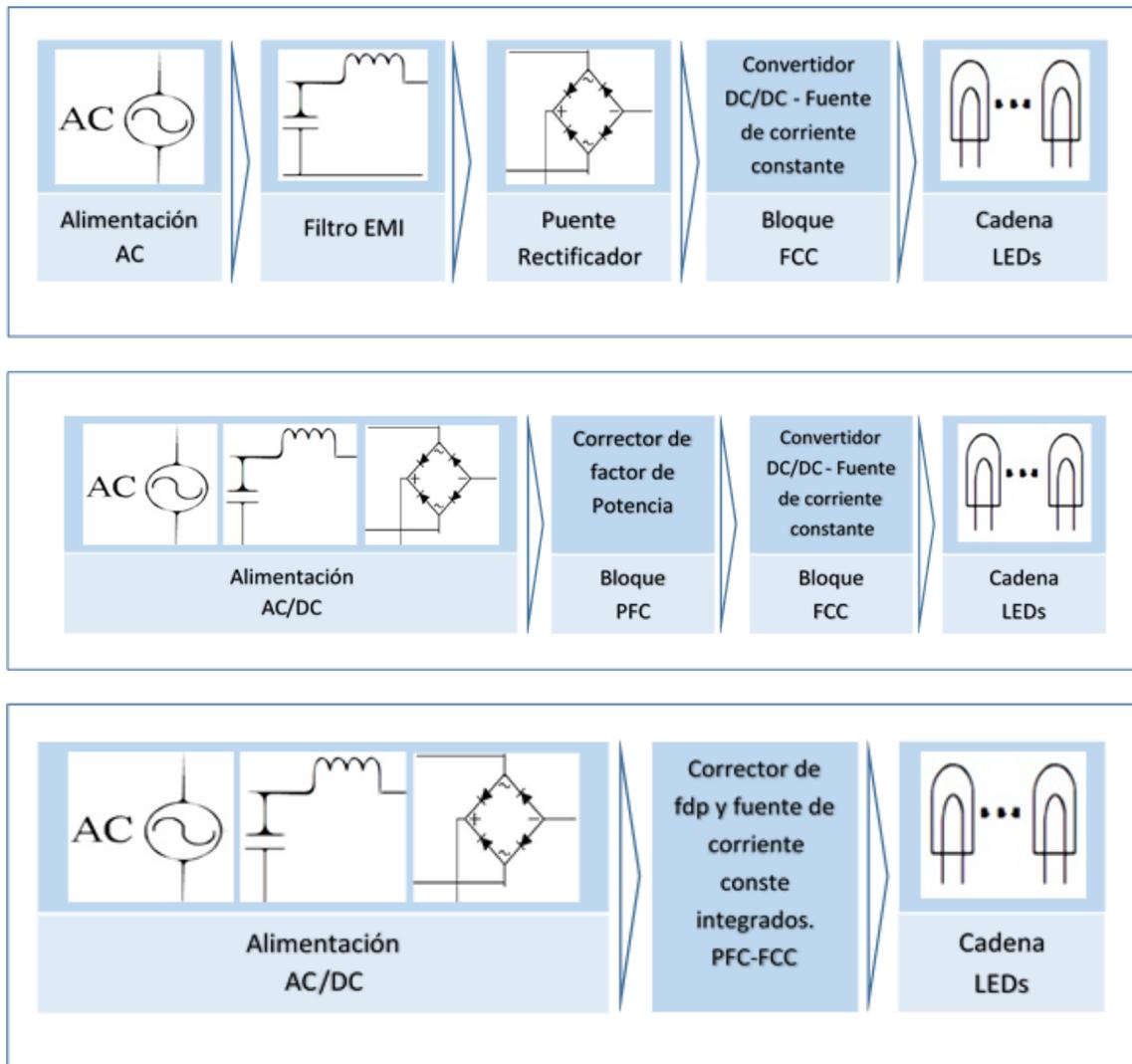


Figura 17. Representa un diagrama de bloques de la alimentación de cargas correspondientes a LEDs. La imagen superior indica una fuente sin corrección del factor de potencia. La imagen intermedia añade el bloque de corrección del FDP. La imagen inferior agrupa la corrección del FDP y la fuente de corriente en un mismo bloque [24].

En la actualidad, las exigencias del mercado indican que es necesaria una regulación de la intensidad lumínica que permita satisfacer las necesidades de visión, comodidad, demanda o eficiencia [24]. El conjunto de bloques de la alimentación de una cadena de LEDs con regulación de corriente no dista mucho de las convencionales, simplemente hay que añadir un bloque que permita realizar la regulación (Figura 18).

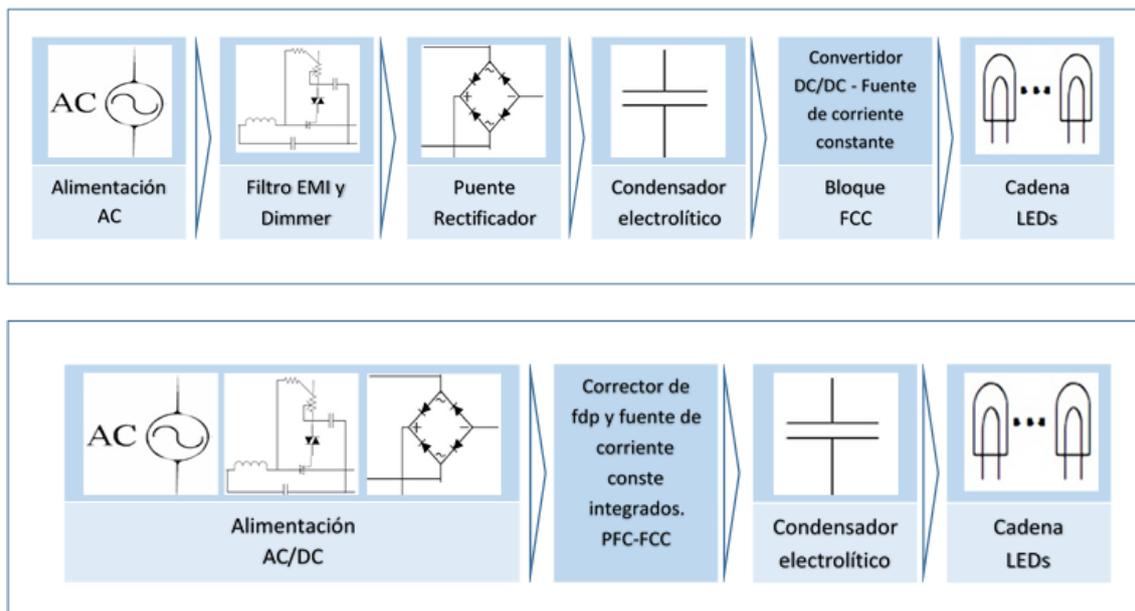


Figura 18. Corresponde al diagrama de bloques de una alimentación con regulación de intensidad lumínica. La diferencia entre ambas es que en la imagen inferior añade el bloque de corrección de factor de potencia [24].

De ahora en adelante vamos a enfocar el estudio de la situación diferenciando entre circuitos electrónicos que precisan de regulación o no, a su vez estudiando casos que añaden mejoras en el circuito.

### 5.1.1 Circuitos electrónicos básicos no regulables.

Para este caso, tendremos que realizar un estudio de los circuitos de alimentación que no adopten una regulación de corriente. Para entender las topologías de alimentación básicas es muy importante entender las fuentes de corriente [29]. La corriente entra rectificada y desde las fuentes de corriente se realiza un control para mantener constante la corriente que alimenta a las cargas.

En [29] nos diferencia tres tipos de fuentes de alimentación en función del control de la fuente de corriente que alimenta a la carga.

- Regulación de fuente de corriente lineal.
  - Regulación de fuente de corriente por histéresis.
  - Regulación de fuente de corriente por PWM.
- 
- Las fuentes de corriente lineales son las más usadas en las aplicaciones de baja potencia debido a su bajo coste, su reducido tamaño y la ausencia de elementos magnéticos como inducciones o transformadores. Son elementos muy fáciles de implementar, dado que los circuitos integrados de tensión constante son muy fáciles de configurar como fuente de corriente [29]. Un ejemplo sencillo es el de la Figura 19. La fuente de corriente consta de una fuente de alimentación,

una referencia de tensión, una carga, un amplificador operacional “U1”, un transistor “Q1” y una resistencia “R1” que actúa de sensor. Su funcionamiento consiste en realimentar la corriente que fluye por la carga y por Q1 por medio de R1 hacia el U1. Cuando el U1 detecta un cambio en la corriente que fluye por la carga actúa sobre el Q1 ajustándolo, consiguiendo una corriente constante por la carga [29].

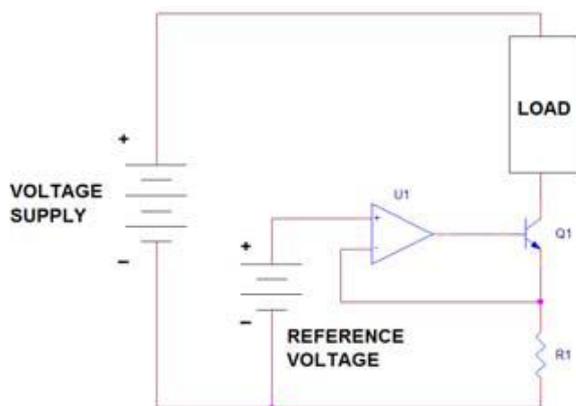


Figura 19. [29]

- La regulación de la fuente de corriente por medio de la histéresis funciona como una fuente conmutada tradicional. Está formado por un switch “Q2”, por un inductor “L2”, un diodo “D2” y un sensor de corriente resistivo “R2” que permite la realimentación a un bloque de control. Por medio de combinaciones de apertura y cierre del transistor y el almacenamiento de energía dentro de la bobina se consigue mantener una corriente constante en la carga. En comparación con los lineales tienen la ventaja de que disipan menos energía, elevando su eficiencia permitiendo elevar la potencia de las cargas conectadas sin aumentar excesivamente la temperatura. El precio encarece respecto a los lineales debido al uso de transistores o elementos FET de conmutación rápida, debido al diodo y la bobina utilizada para almacenar energía. Tanto como lineales como histéresis son de respuesta rápida, permitiendo una regulación de corriente prácticamente inmediata [29]. En la Figura siguiente tenemos un ejemplo.

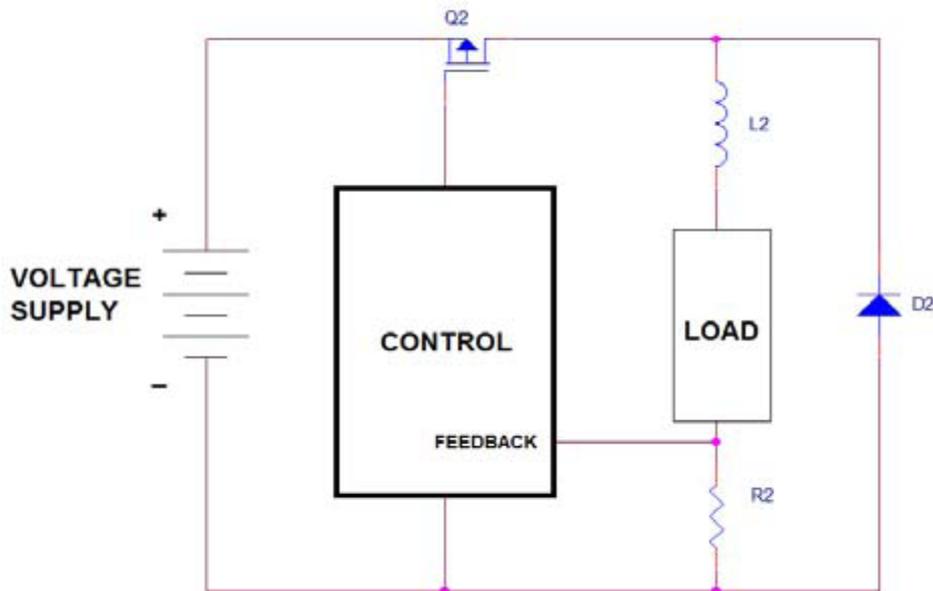


Ilustración 20. [29]

- Los reguladores de corriente por PWM tienen un parecido al regulador por histéresis, teniendo un transistor “Q3”, un diodo “D3” y un sensor de corriente resistivo “R3”. El circuito de la Figura 20 es similar al de histéresis, pero el bloque de control es totalmente diferente. Los controladores PWM gozan de mayor disponibilidad en el mercado que los de histéresis siendo más baratos en la mayoría de los casos [29].

### 5.1.2 Circuitos electrónicos conmutados no regulables.

Para mantener la tensión constante en los LED hacemos uso de un convertidor DC/DC que nos convierta las fluctuaciones de tensión a la entrada con tensión constante a la salida. El objetivo de los convertidores es obtener una tensión continua constante a la salida, ya sea mayor o menor que la tensión a la entrada, siempre teniendo un pequeño porcentaje de rizado a la salida [30]. Podemos diferenciar dos tipos de convertidores DC/DC en función de si hacen uso de aislamiento galvánico entre entrada y salida [31]. Evidentemente la clasificación puede ser mucho más amplia, pero vamos a limitarnos a desglosar esta pequeña clasificación dado que son las que más interés tienen para nuestro trabajo. Dentro de cada situación obtenemos la siguiente clasificación:

- Sin aislamiento galvánico
  - Elevador o “Convertidor Boost”.
  - Reductor o “Convertidor Buck”.
  - Reductor-Elevador “Buck-Boost”.
- Con aislamiento galvánico
  - Convertidor Flyback

Nuestro análisis se va a limitar a los elementos sin aislamiento galvánico, que es un elemento utilizado como mejora del factor de potencia dentro de la alimentación de los LED [24] y haremos una breve introducción al Flyback, dado que su presencia en el mercado es elevada, resultando interesante.

El uso de fuentes conmutadas, que engloban a los tres convertidores sin aislamiento galvánico nombrados anteriormente, permite reducir las pérdidas por conducción, de esta forma podemos aumentar la eficiencia del sistema y reducir el tamaño de sus componentes. Este aumento de eficiencia viene exigido por el creciente aumento de potencia que se está dando en las luminarias, pero como ya hemos comentado en otras ocasiones, las fuentes conmutadas reducen la calidad de la potencia consumida y aumentan las emisiones de armónicos a la red [24].

Esta gama de circuitos tiene como propósito elevar o reducir la tensión entre la entrada y la salida del dispositivo sin utilizar aislamiento galvánico. Esto quiere decir que hay continuidad eléctrica entre la entrada y salida del convertidor. Este tipo de circuitos llevan un conmutador que se abre o cierra a una determinada frecuencia, teniendo en cuenta el tiempo de ciclo "D" que queramos para llegar a la tensión buscada. El tiempo de ciclo corresponde al tiempo que el conmutador está en ON (con el interruptor cerrado) permitiendo el paso de corriente.

-Convertidor elevador "Boost".

Este modelo de convertidor es un diseño de alta eficiencia que eleva la tensión de entrada en la toma de tensión de salida. Muchas aplicaciones industriales, de energías renovables y de la industria del automóvil entre otros necesitan elevadores con una ganancia de tensión elevada [31]. Se compone de tres elementos básicos y fundamentales:

- Inductor (Bobina).
- Diodo rectificador.
- Interruptor unidireccional [32] (Típicamente un transistor).

Estos tres elementos serán comunes al elevador, reductor y reductor-elevador, cuya única diferencia es la distribución de los elementos en el circuito. Estos serán los que limiten la capacidad de obtener la tensión de salida requerida [31].

La función del transistor es controlar la tensión de salida mediante su ciclo de trabajo, abriendo y cerrando el paso de corriente [32], resultando una corriente triangular en la bobina.

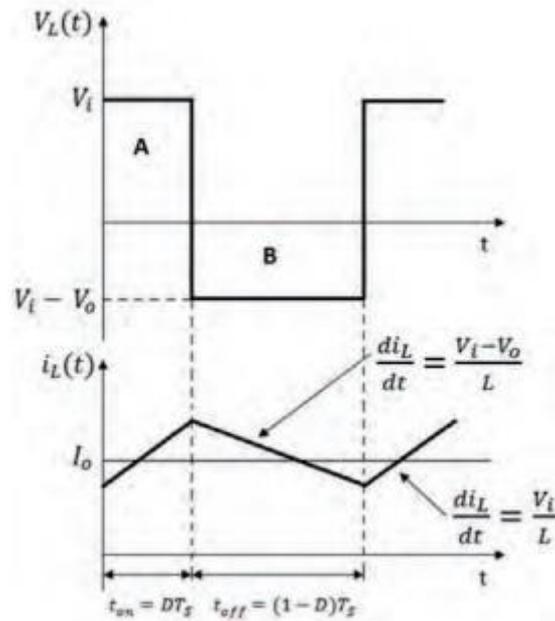


Figura 21. Convertidor trabajando en modo continuo [32].

El convertidor (Buck, Boost y Buck-Boost) puede trabajar en modo continuo (Figura 21) o discontinuo, diferenciándose en que cuando el inductor está en modo continuo la corriente en la bobina nunca llega a cero y en discontinuo si [33]. La topología se refleja en la figura 22.

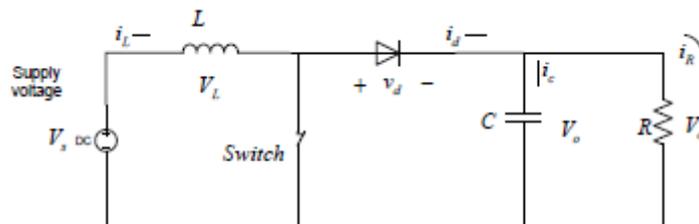


Figura 22. Diagrama básico del convertidor Boost [33].

El rizado de la tensión de salida dependerá en buena parte del valor de la inductancia y la capacidad del condensador que utilizemos.

Mientras el transistor conduce el diodo está polarizado en inversa, permitiendo que el inductor acumule energía, así mientras avanza el tiempo crece la corriente en él. El condensador mientras tanto mantiene la tensión de salida constante [32].

Cuando el interruptor se abre, el diodo se polariza en directa permitiendo la salida de la energía acumulada en el inductor, decreciendo la corriente de este a medida que avanza el tiempo.

En régimen estacionario, la energía que acumulamos en los elementos pasivos durante un ciclo de conmutación es nula, por lo que podemos relacionar la tensión

en la entrada y la salida mediante la ecuación 6 en régimen de conducción continua, dónde D representa el ciclo de trabajo [32].

$$V_o = V_i \cdot \frac{1}{(1 - D)} \quad (6)$$

- Convertidor reductor “Buck”

Este modelo de convertidor lo usamos cuando necesitamos una tensión de salida menor que la que aplicamos en la entrada. Los componentes son los mismos que en el caso anterior, pero tenemos una topología distinta, en la que para este caso ponemos en primer caso el interruptor, en la rama intermedia ponemos el diodo y por último la bobina. Como ya hemos indicado en otros capítulos, este será el modelo [24] objeto de estudio.

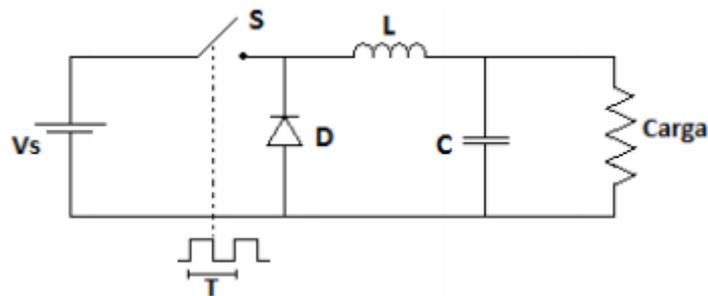


Figura 23. Topología del convertidor tipo Buck [30].

Mientras el transistor está cerrado (Figura 24), la tensión de entrada está aplicada directamente al diodo polarizándolo de forma inversa. En esta fase la corriente se eleva linealmente fluyendo por el inductor [30]. Cuando se abre el conmutador (Figura 25), la corriente acumulada en la bobina sale hacia la carga, ya que al haberse polarizado el diodo en directa permite el flujo de corriente [30].

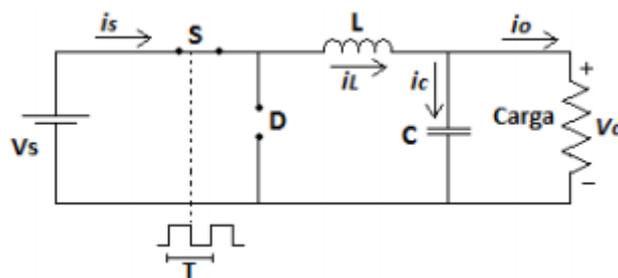


Figura 24. Convertidor tipo Buck en modo ON [30].

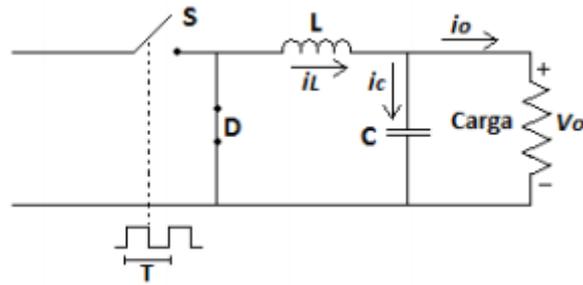


Figura 25. Convertidor tipo Buck en modo OFF [30].

El transistor encargado de hacer la conmutación abre y cierra a una frecuencia dada por el controlador que se encargará de gestionarla, pero el controlador no es objeto de nuestro estudio, nos limitaremos a variar dicha frecuencia. Finalmente, el ciclo de trabajo nos da la relación entre la tensión de entrada y salida del Buck tal y como se refleja en la ecuación (7) [30]. Queda patente que la tensión se reduce dado que el ciclo de trabajo no puede ser mayor que 1 [30].

$$V_s = D * V_e \quad (7)$$

- Reductor-Elevador “Buck-Boost”.

Por último, haremos una breve introducción al Buck-Boost. A efectos prácticos se trata de una combinación entre el elevador y el reductor, debido a que en función de su ciclo de trabajo su tensión de salida puede ser elevada o reducida respecto a su tensión de entrada [34]. La topología de este dispositivo (Figura 26) se compone de los mismos elementos que el Buck y el Boost pero distribuidos de diferente forma.

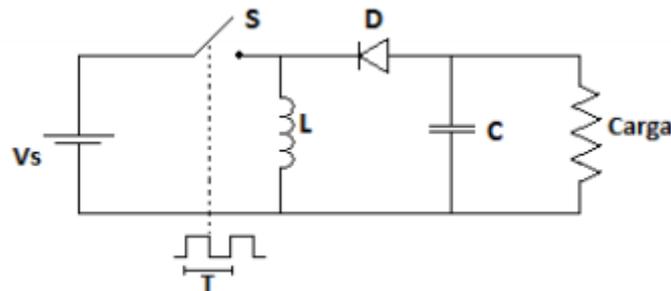


Figura 26. Topología del convertidor Buck-Boost [30].

### 5.1.3 Circuitos electrónicos conmutados no regulables con aislamiento galvánico

Para el caso de los circuitos no regulables con aislamiento galvánico tenemos configuraciones derivadas de las configuraciones normales que combinan un transformador en combinación con un elemento activo [35]. Estudiaremos el caso de convertidor Flyback dado que tiene alta presencia en el mercado.

- El convertidor Flyback (Figura 27) recibe una tensión de entrada y obtiene una tensión más elevada en su salida. Consta de un conmutador “Q” que presumiblemente será un transistor, un transformador con una relación de transformación  $N1/N2$ , un diodo “D”, un condensador “C” y una carga que en nuestro caso sería una luminaria LED [35]. Su funcionamiento se basa en la carga del primario y descarga del secundario del transformador en los momentos de encendido y apagado del conmutador respectivamente [35]. Es uno de los convertidores más usados para aplicaciones de baja potencia dada su baja distorsión armónica, siendo el más utilizado para lámparas y luminarias de menos de 1000W [36][35].

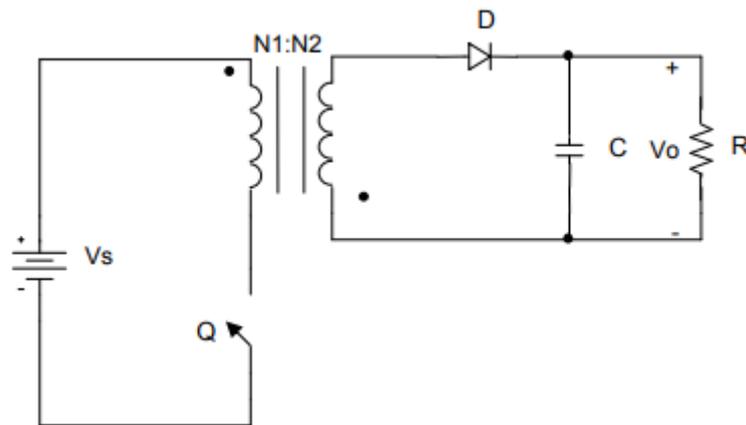


Figura 27. Convertidor tipo FlyBack [35].

#### 5.1.4 Circuitos electrónicos regulables.

En múltiples aplicaciones, por motivos de confort, seguridad, etc., es necesaria la regulación de la intensidad de la luz. La intensidad lumínica depende de la intensidad eléctrica que atraviese el LED. Los circuitos electrónicos de alimentación tienen el inconveniente de que empeoran el factor de potencia y la TDH de la corriente de alimentación, empeorando los datos que ya de por sí traen los tradicionales [3]. Es importante distinguir la técnica usada para regular el brillo de los LED. Hay diferentes mecanismos que pueden ser utilizados para regular el brillo, de los cuales vamos a distinguir la forma analógica, la modulación de ancho de pulso (PWM), el circuito externo de regulación por control de fase AC.

- La regulación analógica lineal regula la corriente alimentada a los LED. Cuando la intensidad se encuentra en nivel máximo, la luminaria usa toda la corriente disponible en el driver, siendo esta reducida linealmente (figura 28) hasta alcanzar el objetivo de iluminación requerido, llegando a poder reducir la iluminación totalmente [12]. Opera en un rango de 0-10V donde cero implica que no proporciona corriente

de salida y diez que deja pasar toda la corriente (Figura 31).

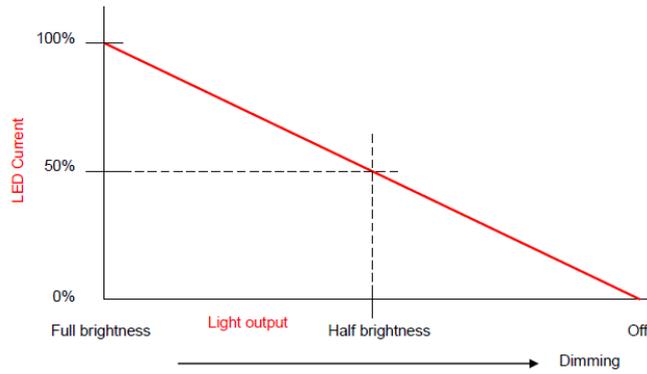


Figura 28. [12]

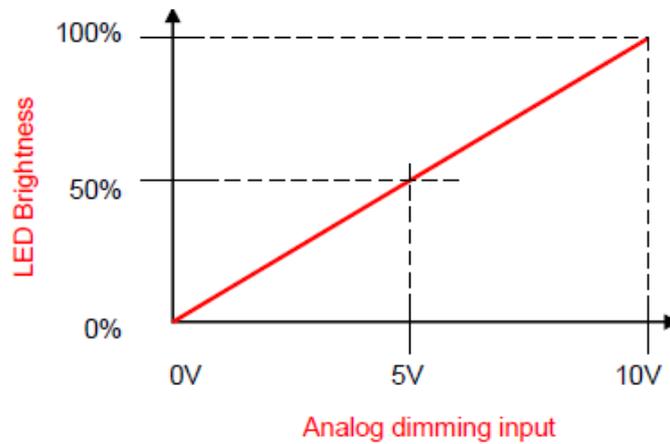


Figura 29. Regulación lineal [12].

- La regulación por ancho de pulso PWM regula la intensidad de los LED en función del ancho de pulso de la onda de corriente. El PWM conmuta la luz a una frecuencia que no reconoce el ojo humano, pero permite variar la intensidad de luz emitida [12].

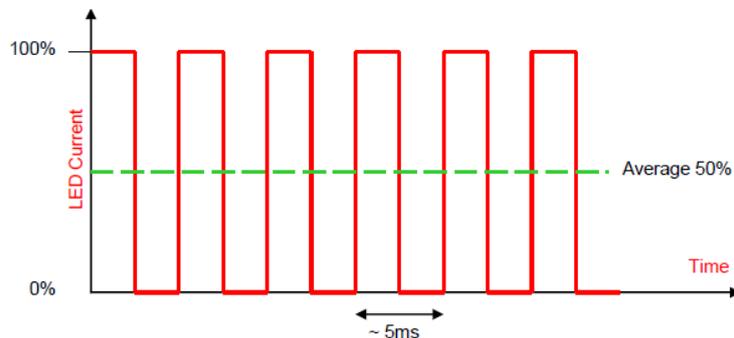


Figura 30. Iluminación por PWM al 50% [12].

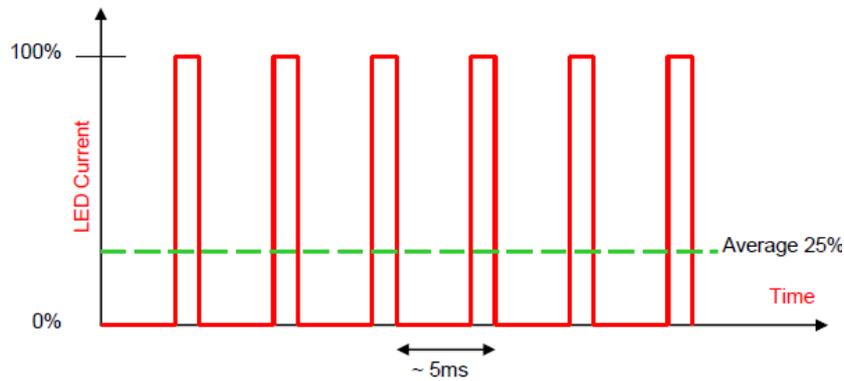


Figura 31. Iluminación por PWM al 25% [12].

Es mucho más complejo que el analógico ya que requiere de un controlador PWM y un conmutador MOSFET [12].

- El control de fase AC es el más utilizado entre los controles de intensidad, llamado también regulación TRIAC [12]. Este regulador trabaja cortando una parte de la onda sinusoidal de alimentación mediante una graduación proporcional a la fase de la onda donde se produce el corte. Puedes realizar el corte en el inicio de la onda, en el inicio y el final, y al final de la onda. En el caso en el que se corta el inicio de la onda, se espera un periodo hasta que conduce el triac, cortando una porción de la primera parte de la onda. Para el segundo caso, se corta una porción simétrica en el inicio y el final. Por último, para el caso en el que se corta el final de la onda llamado también control reverso de fase, el método de operación es similar al del primer caso, pero con la primera parte de la onda [12].

## 5.2 Convertidores Buck mejorados.

Para realizar nuestro estudio, procedemos a investigar más en profundidad la señal de corriente de entrada de diversos convertidores Buck. Para ello, analizaremos los siguientes modelos:

- Convertidor Buck sin mejoras.
- Convertidor Buck con filtro inductivo en el lado AC.
- Convertidor Buck con filtro inductivo en el lado DC.
- Convertidor Buck con filtro LCD en el lado DC.
- Convertidor Buck con filtro valley fill.
- Convertidor Buck con filtro valley fill mejorado.

### 5.2.1 Convertidor Buck sin mejoras.

En la siguiente figura representamos el modelo en SIMULINK [24] que simula el comportamiento de un convertidor Buck sin ningún tipo de filtro. Este apartado evidentemente supone una excepción en la sección de convertidores Buck mejorados, pero es de imprescindible mención.

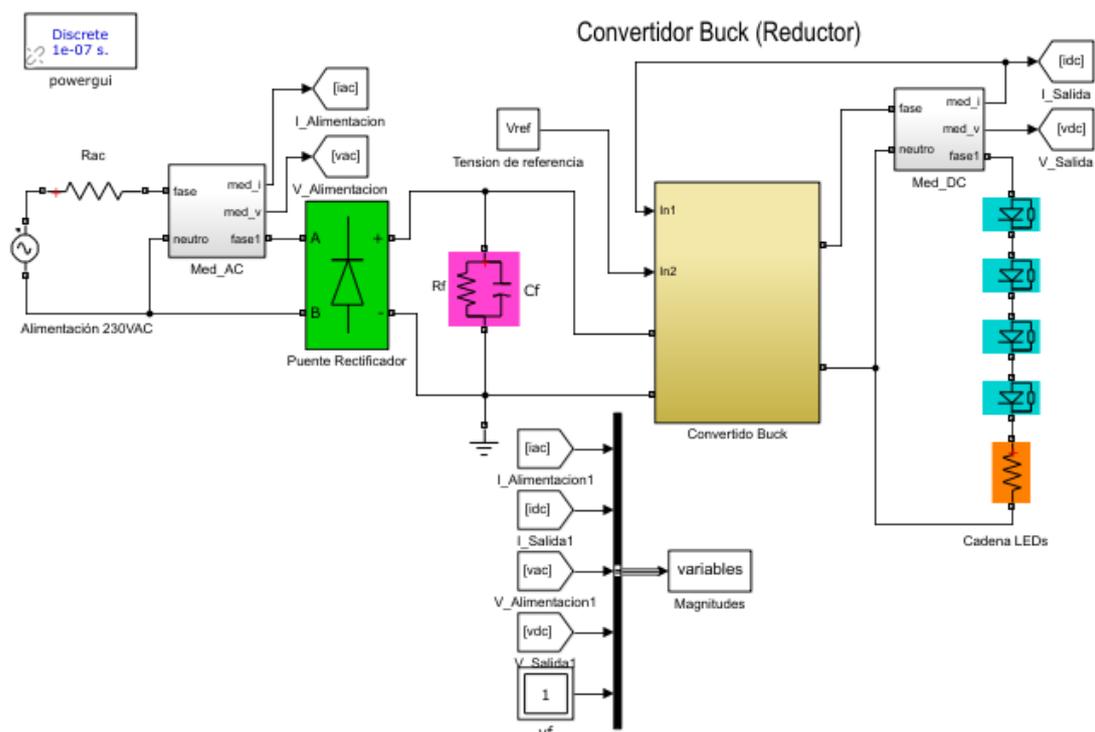


Figura 32. Modelo Buck.

El ejemplo de la Figura 32 es el modelo base que usaremos para nuestro trabajo de investigación. Partimos de un generador de onda senoidal pura que acoplamos en serie con una resistencia simulando la resistencia interna del generador. El siguiente bloque corresponde al rectificado de la señal, que es el primer paso para convertir una señal de alterna a continua.

La Figura 33 la obtenemos de la teoría de la asignatura “Fundamentos de electrónica”, y representa a grandes rasgos el efecto del rectificado sobre la onda senoidal.

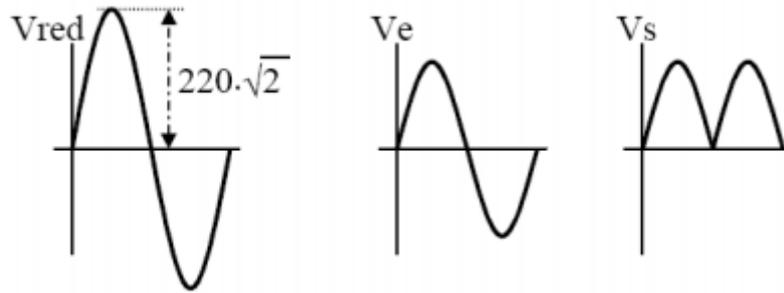


Figura 33. Rectificado de onda completa.

Se ve claro cómo la onda queda limitada a su lado positivo a la salida del rectificador. Posteriormente mediante un filtro capacitivo se consigue eliminar el “rizo” de la onda dejando una señal prácticamente continua.

Por último, esa señal continua se introduce en el convertidor Buck reduciendo su valor de tensión, y a la salida de este iremos directamente a la cadena de LED, que representarán la carga del dispositivo de alimentación.

### 5.2.2 Convertidor Buck con filtro inductivo en el lado AC.

En este caso complementa el convertidor Buck con una bobina en serie con el generador de onda senoidal y la resistencia. Originalmente damos un valor de 0,29H, pero variaremos esos valores (junto a otros que explicaremos más tarde) para ver el efecto que tiene sobre la calidad de la señal de entrada. En la siguiente figura observamos como queda la topología del convertidor.

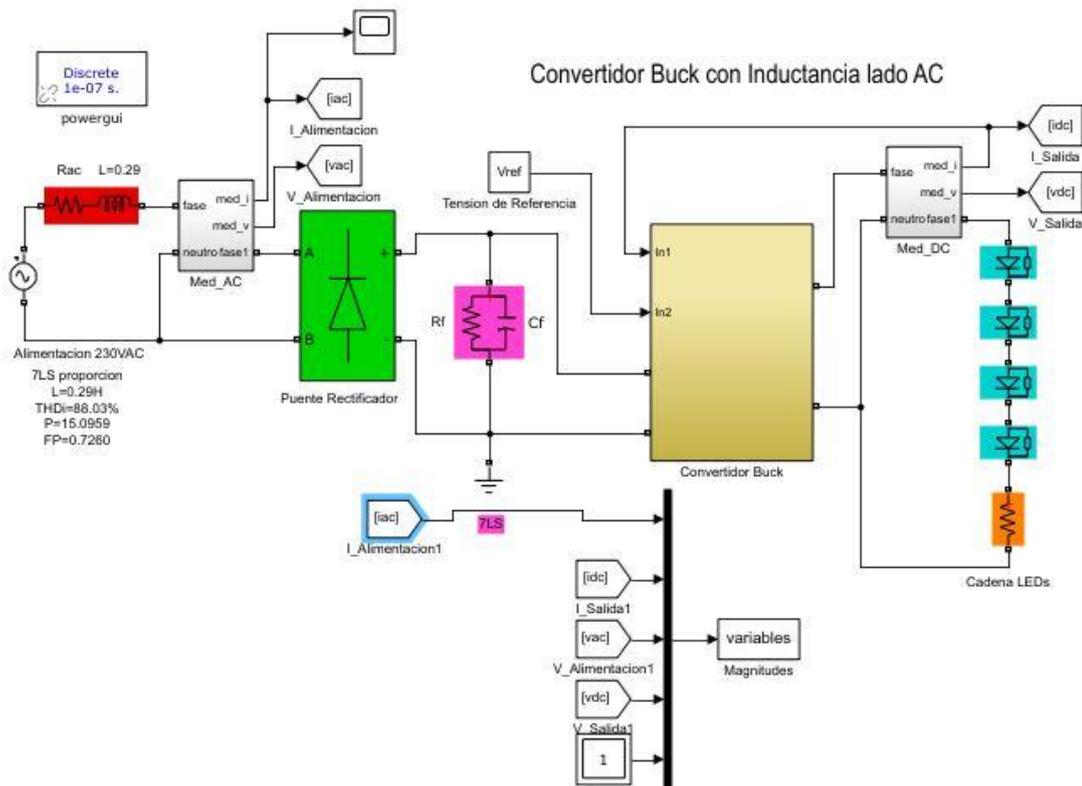


Figura 34. Buck con filtro inductivo en el lado AC.

### 5.2.3 Convertidor Buck con filtro inductivo en el lado DC.

Es un caso similar al anterior pero esta vez la bobina la ponemos ya pasado el rectificado y filtrado de la señal. En la Figura 35 queda representada la topología del convertidor [24].

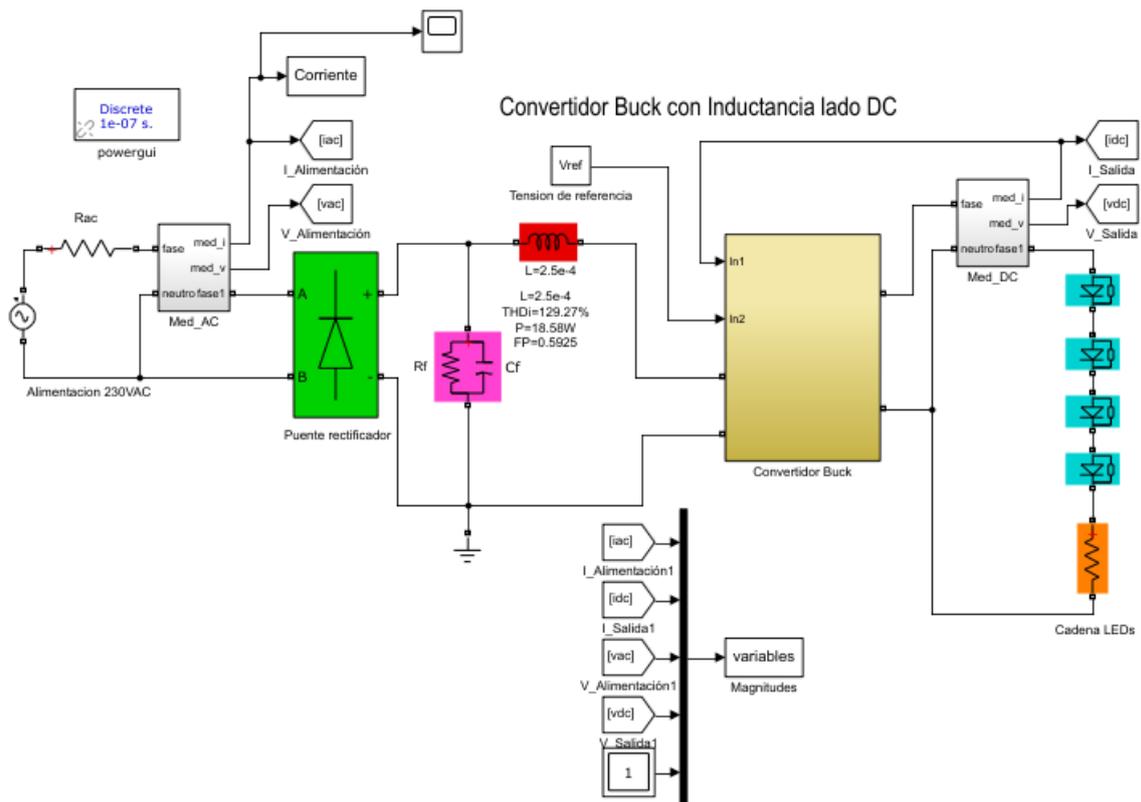


Figura 35. Buck con filtro inductivo en el lado AC.

### 5.2.4 Convertidor Buck con filtro LCD en lado DC

Para este caso contamos con dos diodos led y un condensador una vez pasada la corriente alterna por el rectificador y el filtro. El resto de la configuración queda como en el convertidor original. En la siguiente figura observamos cómo queda la topología del sistema.

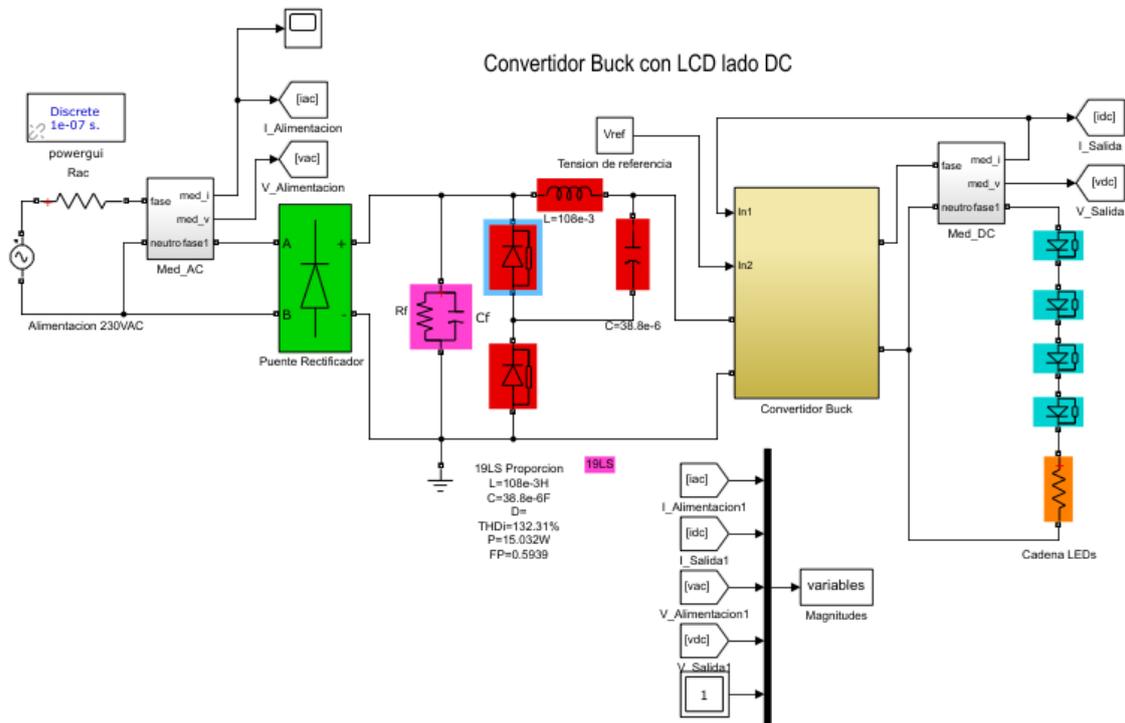


Figura 36. Convertidor Buck con LCD en lado DC.

### 5.2.5 Convertidor Buck con filtro Valley Fill.

Este modelo tiene la particularidad de que a continuación del rectificador añadimos el filtro como se representa en la Figura 37. La composición del filtro se representa en la Figura 38, observándose tres diodos y dos condensadores. En la siguiente tabla reflejamos los valores de los elementos del filtro:

Circuito Valley Fill	
	Magnitud
Condensador (F)	2.20e-05
R snubber ( $\Omega$ )	500
C snubber (F)	2,50e-07

Tabla 6.

Estos valores se utilizan también para el caso mejorado.

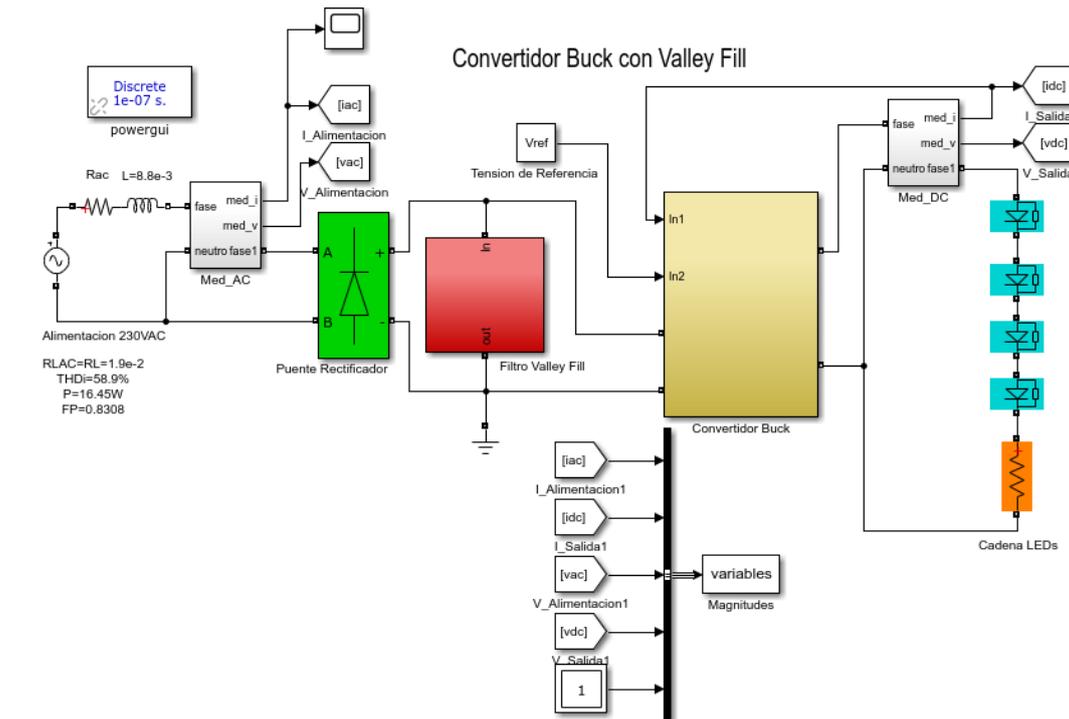


Figura 37. Convertidor Buck con filtro Valley Fill.

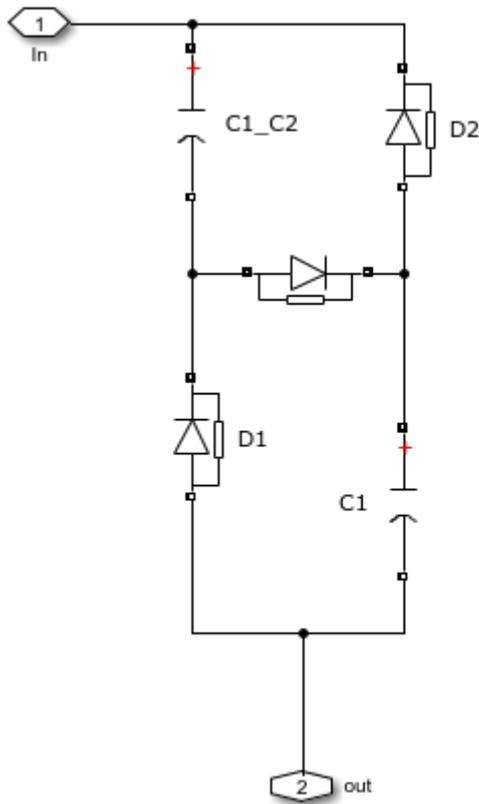


Figura 38. Valley Fill del modelo.

### 5.2.6 Convertidor Buck con filtro Valley Fill mejorado.

En este caso tenemos una topología similar a la que tenemos en el caso normal pero el filtro Valley Fill se completa con cuatro condensadores y dos diodos como se demuestra en la Figura 39. Para este caso se añade un valor diferente para el condensador del divisor con una capacidad de  $6,60e-8F$ .

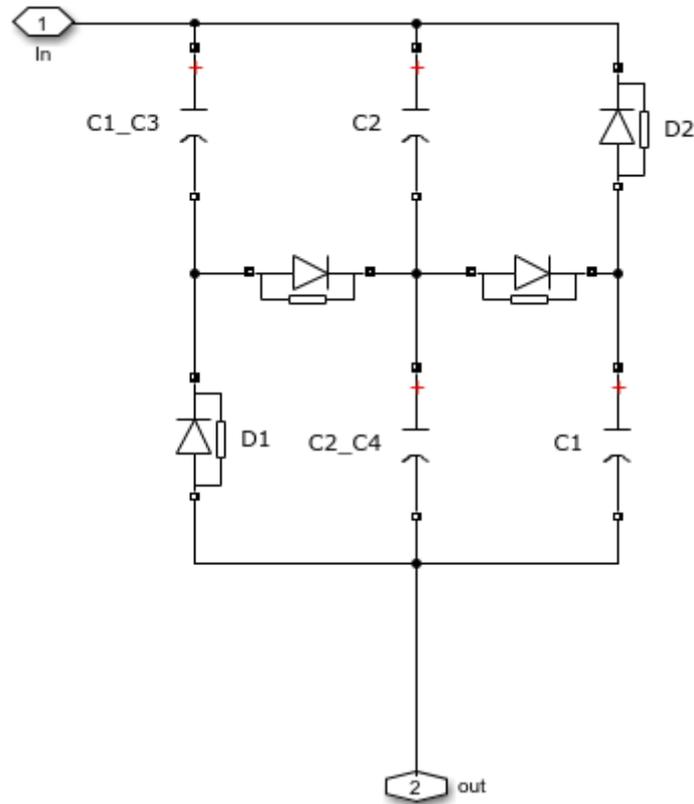


Figura 39. Circuito Valley Fill mejorado.



## CAPÍTULO 6. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS.

Vamos a realizar un estudio de los convertidores de corriente AC/DC (o fuentes de alimentación), con el objetivo de analizar la calidad de la corriente que consumen las cargas (tanto la cadena de diodos como la resistencia en serie que simula la carga en ohmios) que simulan lámparas LED que utilizan diferentes filtrados dentro de la fuente de alimentación.

Lo primero de todo será comentar en términos generales la composición de los bloques que forman el modelo y sus parámetros. Lo siguiente es determinar qué tipo de medida realiza la herramienta “FFT Analysis” que es con la que realizaremos el estudio en frecuencia de la señal de corriente de alimentación.

### 6.1 Análisis del modelo Buck.

En el capítulo anterior mencionamos los modelos de Simulink y comentamos la estructura que llevan. Ahora vamos a mostrar los parámetros que lleva cada bloque.

Las lámparas LED las “conectamos” a la red eléctrica, que en España funciona a 230VAC RMS y 50Hz de frecuencia, que se simula mediante un generador de tensión ideal que permite modificar los parámetros de la señal de alimentación, que vienen dados por variables que se modifican desde el script de Matlab. En la Figura 40 se muestran los datos que definen la señal de alimentación.

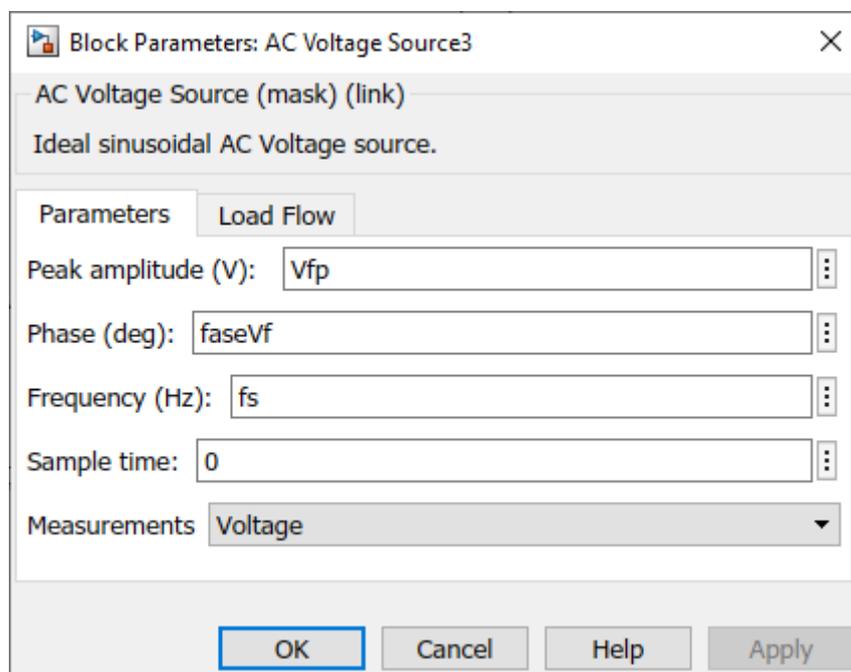


Figura 40. Definición de la alimentación.

El generador se compone de:

- Amplitud pico ( $V_{fp}$ ): Es la máxima tensión que alcanza la señal en función del tiempo. Se obtiene multiplicando el valor 230VAC por raíz de dos.
- Fase (faseVf): Es el desfase entre la tensión y la corriente.
- Frecuencia (fs): Es la cantidad de veces que se repite el periodo por unidad de tiempo, que corresponde a 50Hz.

Los otros dos parámetros son irrelevantes para nuestro análisis.

La corriente que alimenta la carga en este caso tiene que ser continua, por lo que tiene que pasar por un rectificado mediante un puente de diodos. En SIMULINK los puentes de diodos tienen dedicado un bloque propio al igual que la señal de alimentación. En la Figura 41 representamos los parámetros que contiene el bloque:

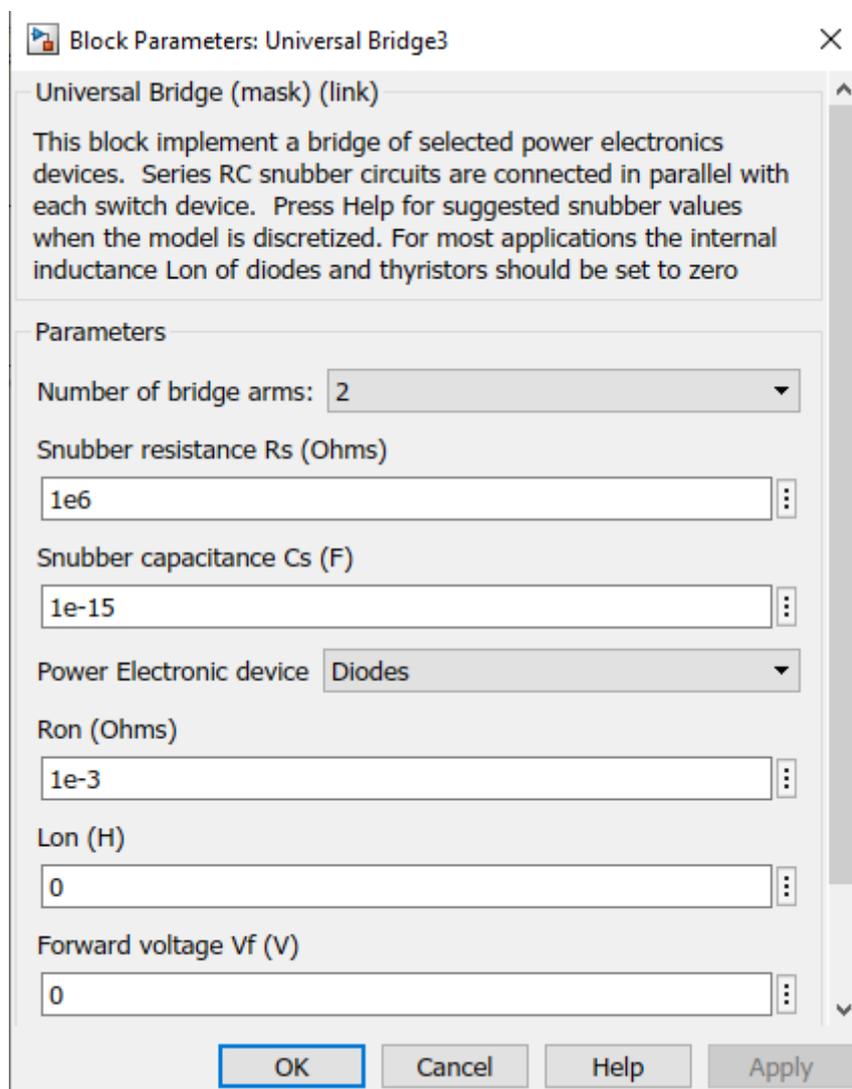


Figura 41. Parámetros del puente de diodos.

Dejamos por defecto todos los parámetros menos los dos siguientes:

- Numero de brazos del puente: Dado que es monofásico necesitamos solamente dos brazos.
- Dispositivo de electrónica de potencia: Elegimos el diodo, ya que por defecto viene el tiristor.

Posteriormente, en función del modelo se hace un tipo de filtrado u otro, pero luego la señal pasa por un “Buck” o reductor de tensión que alimenta a las cargas ya en corriente continua.

El Buck es una configuración que reduce la tensión continua, y se compone de un interruptor, una bobina y un diodo. Como ya explicamos en capítulos anteriores, en función de cómo se ubiquen estos elementos en el dispositivo y del tiempo de ciclo  $D$ , el dispositivo actuará como reductor, elevador o reductor-elevador de tensión.

La configuración del Buck en el Simulink se define en la Figura 42.

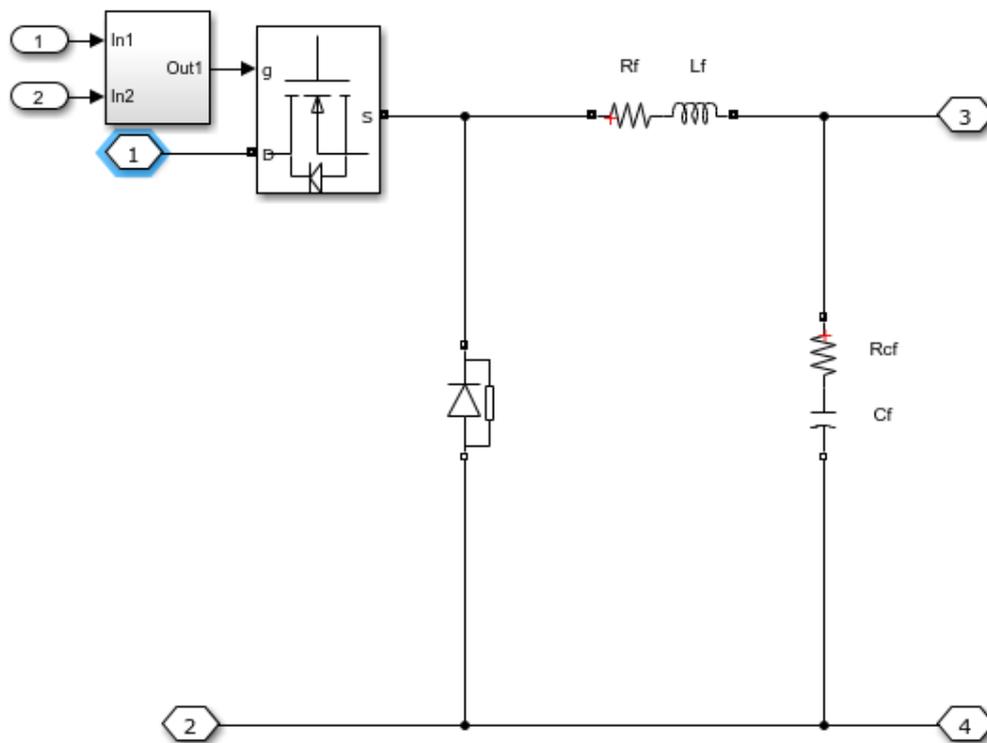


Figura 42. Configuración Buck.

Los parámetros del Buck se configuran en función de la corriente mínima ( $L_{min}$ ) para la que el mismo trabaja en modo de conducción continua, por lo que serán diferentes para cada caso particular que estudiemos.

La conmutación del semiconductor de potencia vendrá condicionada por un parámetro variable a criterio nuestro, que variaremos en las simulaciones para realizar un estudio (entre otros) del impacto de la frecuencia de conmutación en la

señal de entrada. Finalmente nos encontramos con las cargas (diodos LED) que también modificaremos para estudiar la calidad de la señal en función de cada parámetro. Dos aspectos importantes para el análisis son la respuesta en frecuencia y la tasa de distorsión armónica que hemos mencionado en el apartado 3.2.

## **6.2. Comprobación del instrumento de medida virtual.**

Antes de comenzar con el estudio tenemos que comprobar qué información nos da la herramienta de análisis, ya que nos aporta unos datos, pero la tenemos que contrastar con la información teórica que tenemos para cerciorarnos de que el análisis es correcto.

Tenemos que cotejar qué tipo de THD nos aporta, cómo influye la ventana de tiempo de simulación y cada cuánto tomamos una muestra en frecuencia. También hemos de asegurarnos de que nos aporta información a altas frecuencias y a bajas.

Para el análisis en frecuencia usaremos la herramienta que aporta Simulink “Powergui”, cuyo cuadro de diálogo queda representado en la Figura 43, que entre otras cosas nos aporta la herramienta “FFT Analysis” que es la que nosotros usaremos, pero antes de nada tenemos que comprobar qué datos nos entrega y cómo nos los entrega.

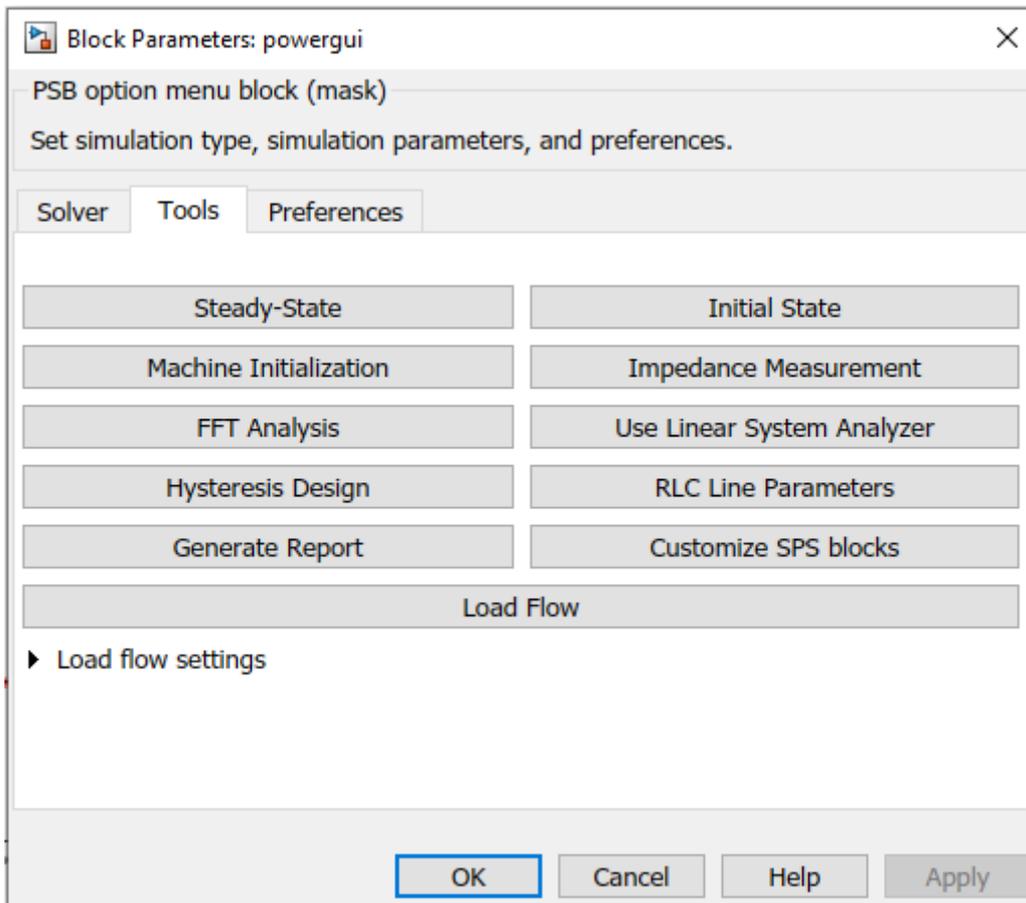


Figura 43. Herramientas del bloque powergui.

Si abrimos el cuadro de diálogo “FFT Analysis” nos encontramos con la Figura 44, que nos ofrece la señal temporal, las componentes en frecuencia de la señal, nos permite seleccionar que señal queremos analizar, nos aporta una tasa de distorsión armónica, la magnitud del fundamental y, por último, elegir el número de ciclos, la frecuencia fundamental, la máxima frecuencia y la forma de representación.

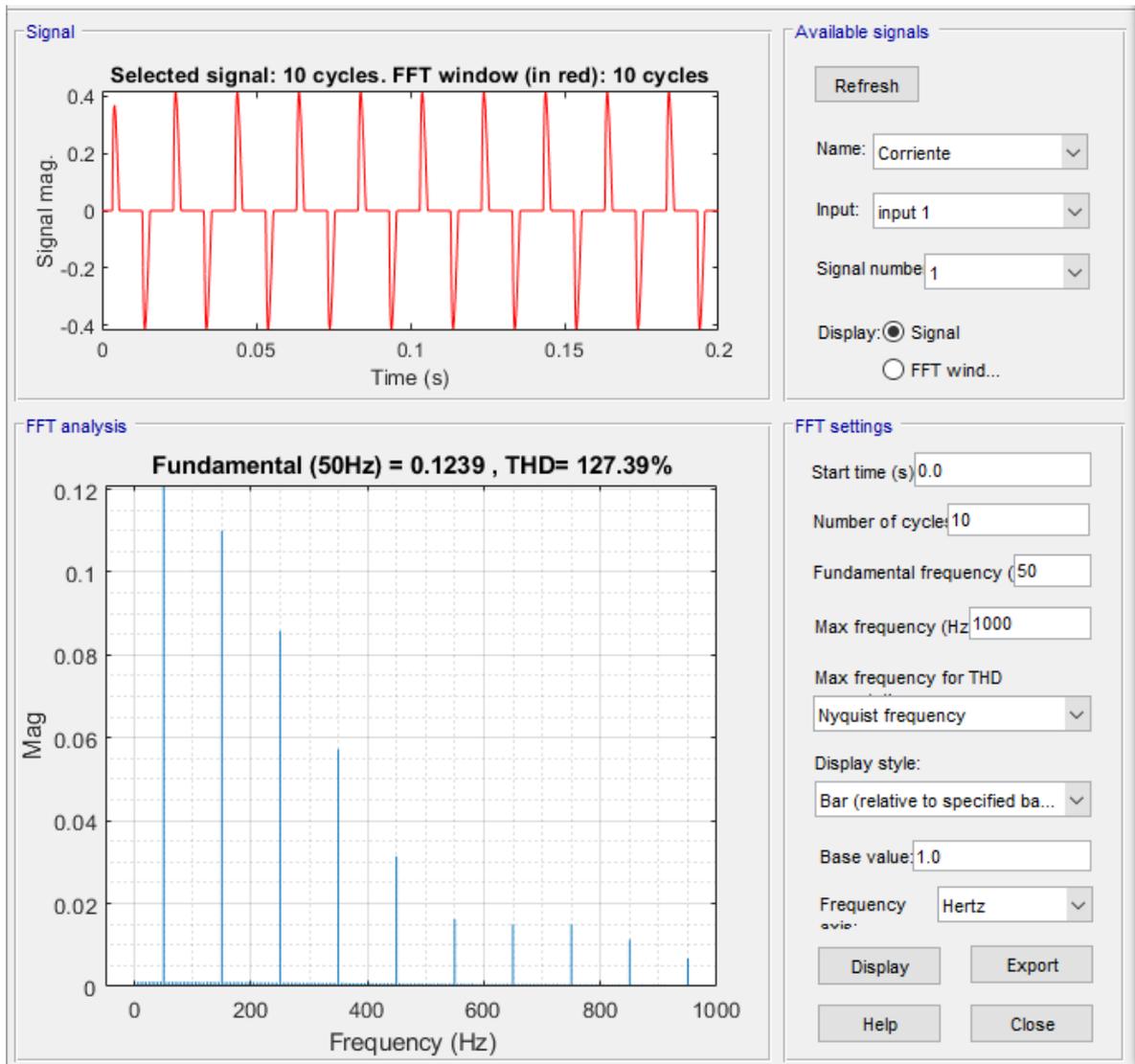


Figura 44. Cuadro de diálogo "FFT Analysis" del bloque powergui.

Nuestras dudas surgían fundamentalmente sobre dos aspectos:

- No quedaba claro si analizaba interarmónicos o solamente nos aportaba datos de los múltiplos del fundamental.
- Nos calcula una tasa de distorsión armónica pero no sabemos cuál.

Para salir de dudas primero empezamos analizando el primer punto. Para ello simulamos un modelo con varias fuentes de tensión alternas en serie que nos permite generar señales "distorsionadas" representadas en la Figura 45 aportando distintos valores de frecuencia y magnitud.

Para comprobar si detectaba interarmónicos ubiqué tres fuentes en serie con 50Hz, 120Hz y 200Hz respectivamente, con una magnitud de 230VAC, 100VAC y 50VAC respectivamente. En la siguiente figura representamos el modelo:

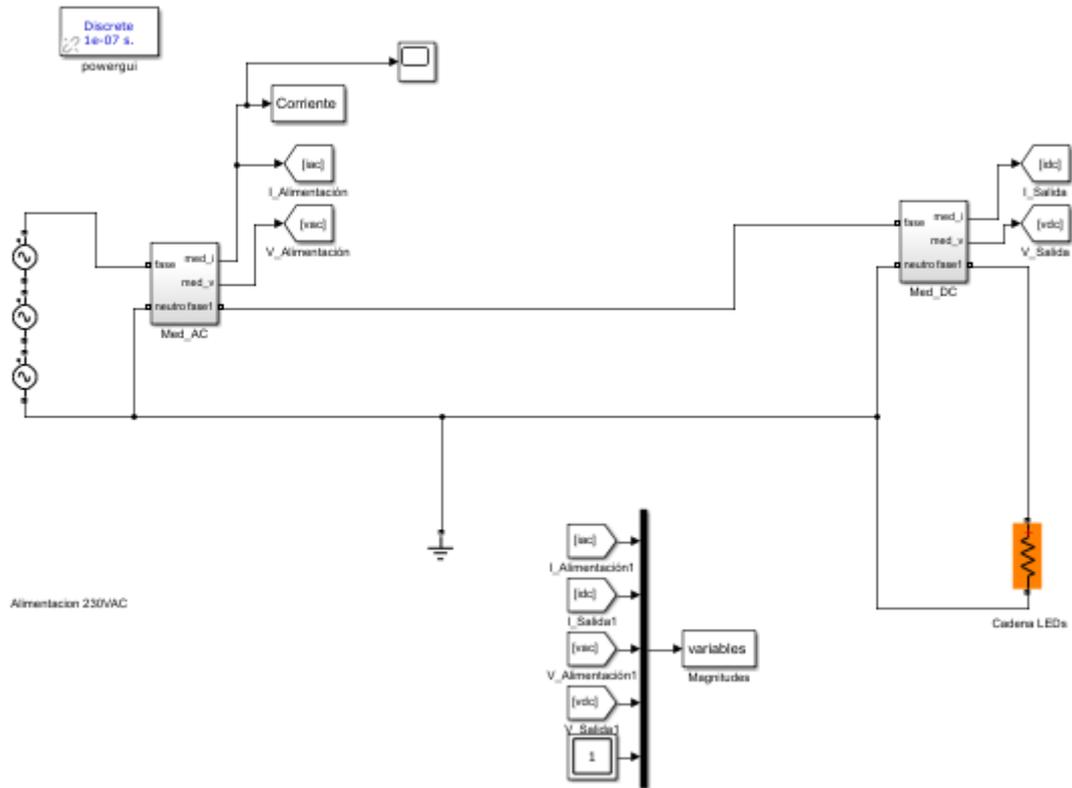


Figura 45. Modelo de simulación.

De aquí concluimos que efectivamente analiza interarmónicos como se representa en la Figura 46.

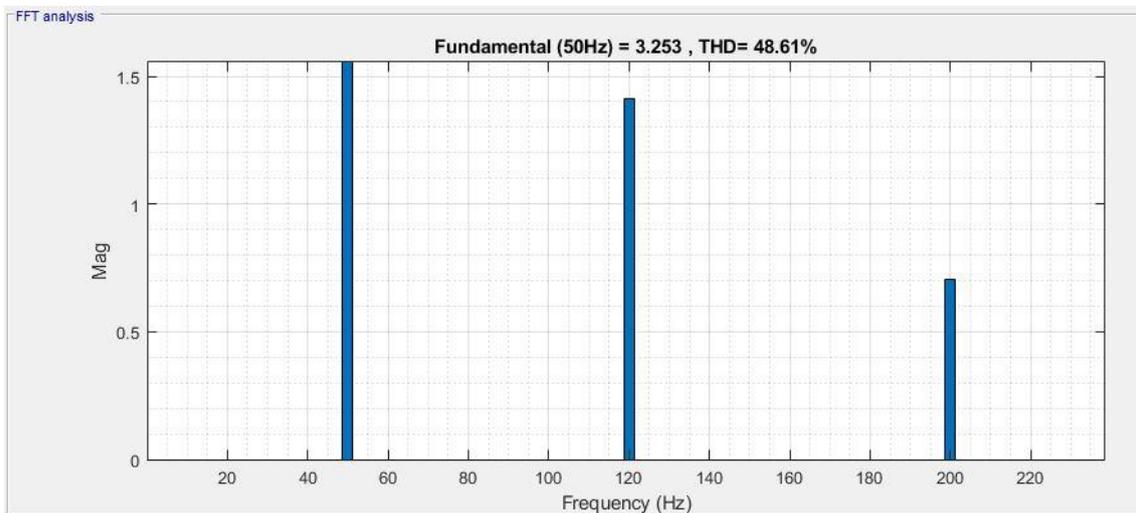


Figura 46. Prueba de interarmónicos,

En la ayuda de Matlab nos confirma que la THD la obtiene de todos los armónicos e interarmónicos que por su ventana de tiempos es capaz de ver, así que obtenemos la fórmula de la teoría y comprobamos que está en lo cierto:

$$THD = \frac{1}{C_1} \sqrt{\sum_{n=2}^N Cn^2} \times 100 = \frac{\sqrt{100^2 + 50^2}}{230} = 48,61\%$$

Como ya indicamos en otro capítulo, la ventana de tiempo “tw” influye a la hora del muestreo de frecuencias. Para una ventana de tiempo dada, en teoría obtendremos una muestra cada  $\frac{1}{t_w}$  Hz. Ahora tenemos que cerciorarnos de que la herramienta “FFT Analisis” coge muestras en frecuencia cada  $\frac{1}{t_w}$  Hz y de que nos capta los supraarmónicos o si de lo contrario sólo obtenemos los armónicos en bajas frecuencias.

Para comprobar que obtenemos los resultados esperados de la herramienta “FFT Analisis” mostramos en formato lista las frecuencias que detectamos para  $t_w = 0,2s$  y para  $t_w = 1s$ .

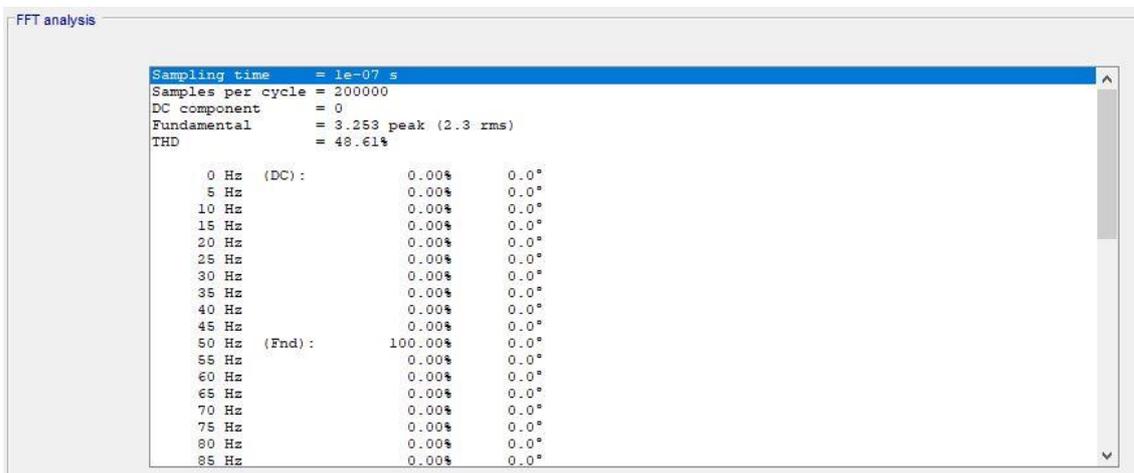


Figura 47.  $t_w = 0,2s$ .

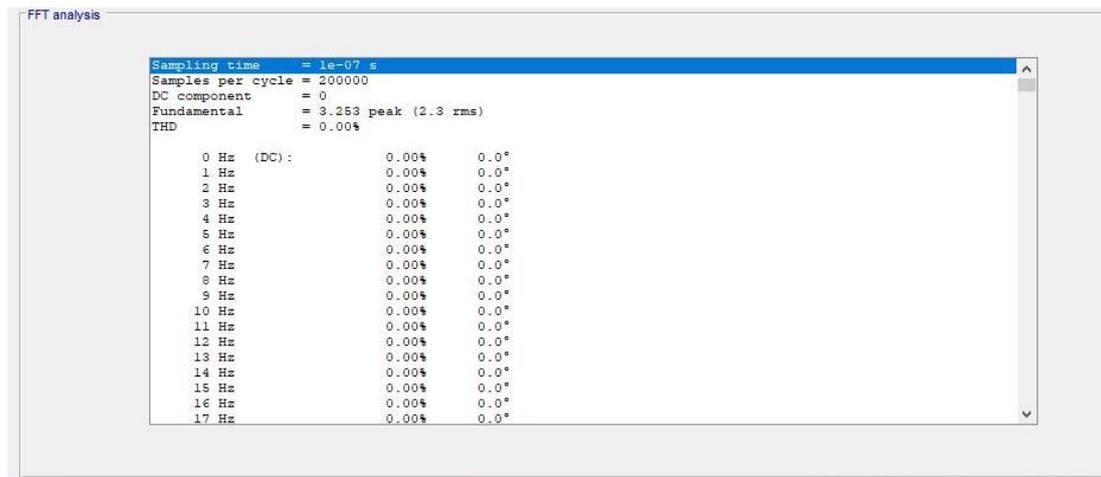


Figura 48.  $t_w = 1s$ .

Aquí queda demostrado que dependiendo de la ventana de tiempo “ $t_w$ ” que tomemos toma una muestra cada  $\frac{1}{t_w}$  hercios.

Finalmente completamos este apartado demostrando que detecta casos de supraarmónicos como el de la frecuencia de conmutación del convertidor (en este caso conmuta a 100kHz) que se muestra en la Figura 49.

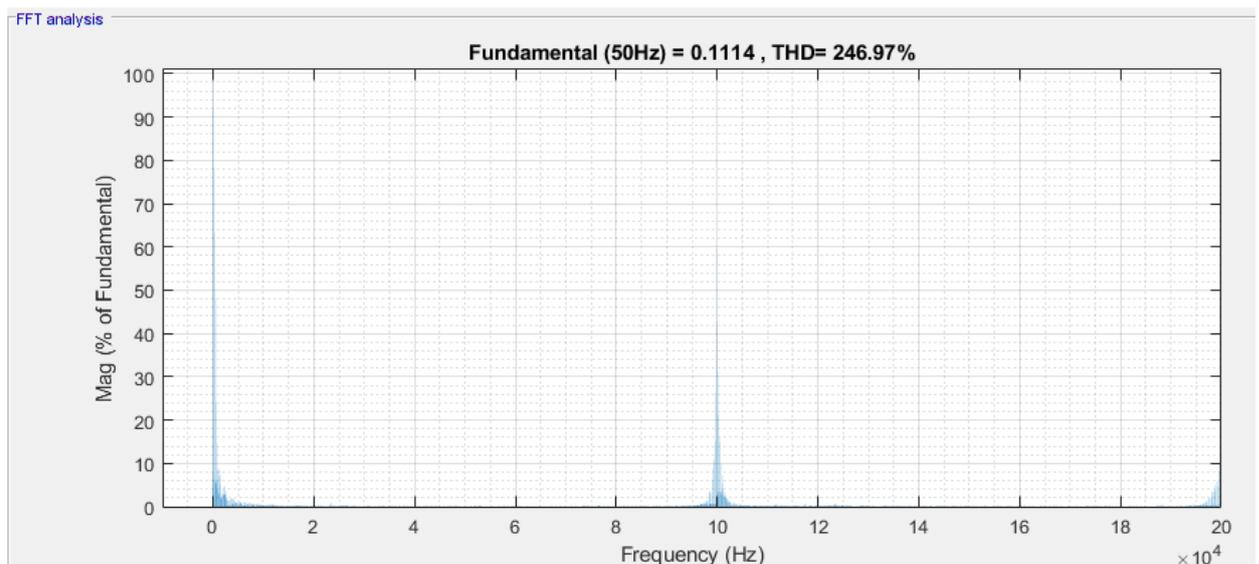


Figura 49. Conmutador a 100kHz.

En este caso se ve claramente cómo aparecen los armónicos a bajas frecuencias, posteriormente se ven los armónicos entorno a 100kHz (con la correspondiente fuga espectral debido a que la ventana de tiempos no era la más adecuada para este análisis) y también observamos que en 200kHz aparecen armónicos que ocurren porque es múltiplo de la frecuencia de conmutación.

También hemos simulado un caso ideal de alta frecuencia para asegurarnos de que el análisis es correcto con un caso a 100kHz, obteniendo el resultado esperado dados los resultados que hemos venido obteniendo con anterioridad.

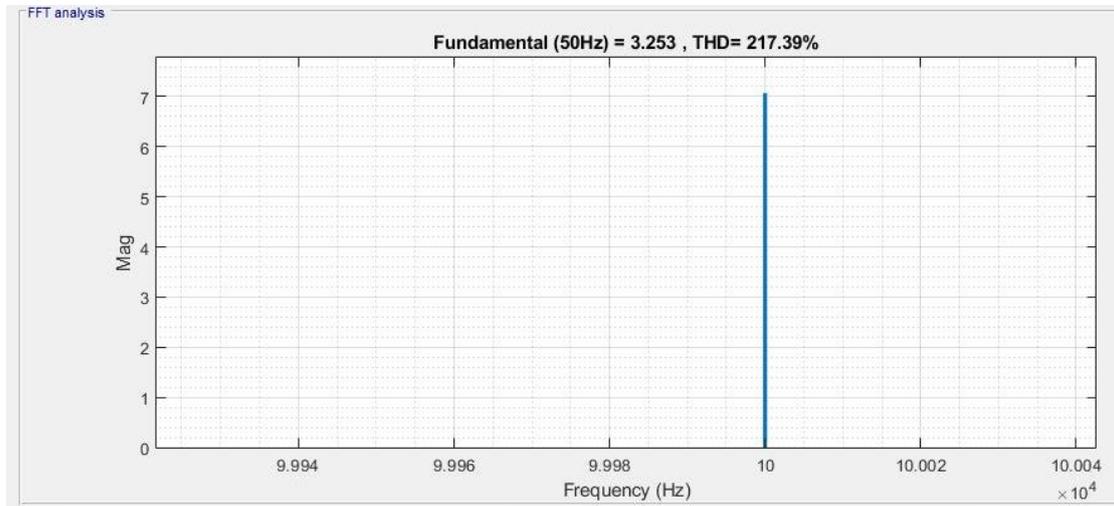


Figura 50. Muestra a 100kHz.

Con esto aclaramos que:

- La THD corresponde a armónicos e interarmónicos que la herramienta detecta en función de la ventana, ya sea para bajas frecuencias o altas.
- La representación en frecuencia viene limitada por el rango que elijamos en el cuadro de diálogo y la ventana de tiempo.

### 6.3 Simulación y análisis de los modelos.

El objetivo principal de las simulaciones que vamos a desarrollar en el presente proyecto es conocer cómo afecta la variación de parámetros dentro del modelo a la calidad de la corriente de alimentación, dado que los convertidores DC/DC se comportan de manera diferente en función de la carga que tengan, del valor de la inductancia y de la frecuencia de conmutación que tenga. Para determinar el efecto de estas variaciones estudiaremos la respuesta en frecuencia, el valor de la magnitud del fundamental y la THD (total, incluyendo altas y bajas frecuencias e interarmónicos).

Un dato relevante respecto al análisis de la frecuencia de conmutación es que por debajo de 20kHz pueden llegar a ser audibles y además exigen un mayor tamaño en los núcleos de las inducciones que vaya a usar la fuente de alimentación. Las inducciones suelen ser de ferrita y a mayor frecuencia aumenta la potencia que entrega a la carga. Esto quiere decir que con mayores frecuencias podemos usar ferritas más pequeñas que nos aporten altas potencias reduciendo el espacio de la

fuentes de alimentación, siendo ventajoso en el caso de las lámparas LED que requieran de poco espacio. En casos como los de ordenadores de sobremesa no importa tanto el tamaño, por lo que tenemos más flexibilidad. Con esto queremos decir que vamos a cambiar el efecto de cambiar la frecuencia de conmutación por ver la influencia sobre la señal, pero a priori sabemos que no se aceptan todas las frecuencias en sistemas reales.

Como ya comentamos, usaremos 6 fuentes de alimentación con convertidores Buck y filtrados diferentes en las que observaremos la influencia de la variación de los parámetros en función de si tiene filtros, si no los tiene y en función del tipo de filtro que lleve.

Para todo esto usamos una ventana de tiempo “ $t_w$ ” de 0.2 segundos que nos aporta una precisión de 5Hz en el análisis en frecuencia, y alimentamos a la fuente con una tensión alterna de 230V RMS a 50Hz monofásica.

### 6.3.1 Efecto de la variación de la carga.

En los modelos [24] a simular las cargas vienen representadas por medio de una resistencia y unos diodos en serie simulando la carga en ohmios que representan los LED sobre la fuente de alimentación como queda indicado en la Figura 52. Nosotros únicamente variaremos el parámetro de la magnitud de la resistencia en ohmios que ejercen los LED, por lo que los parámetros de los diodos (al ser ideales no ofrecen resistencia al paso de la corriente) los dejaremos según los datos originales del modelo.

Vamos a elegir un modelo comercial de led SMD LED 5730, con unos valores recomendados de corriente y tensión de 150mA y 3.5V, que nos ofrece una resistencia en ohmios de  $R = \frac{V}{I} = \frac{3.5}{150 \times 10^{-3}} = 23,3\Omega$  [37].



Figura 51. SMD LED 5730 [37]

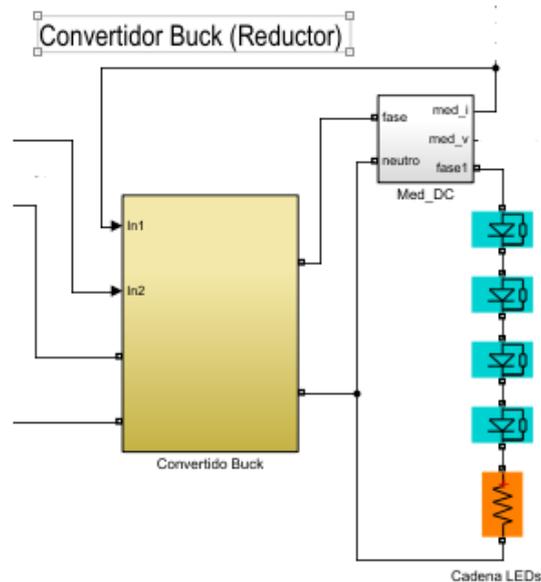


Figura 52. Conexión de las cargas al convertidor DC/DC.

Hemos realizado las pruebas para todos los modelos con una frecuencia de conmutación de 100kHz y el resto de los valores constantes siendo estos los originales, probando con las siguientes cargas:

- 10  $\Omega$  (1 LED).
- 100  $\Omega$  (5 LED).
- 500  $\Omega$  (22 LED).
- 1000  $\Omega$  (44 LED).

Al aumentar la carga en ohmios que aplicamos a la fuente de alimentación podemos observar una tendencia creciente en la magnitud del fundamental, exceptuando en el caso de 1000 $\Omega$  que se experimenta un leve descenso en el valor. En teoría debería darnos un valor inferior de la magnitud del fundamental de corriente, dado que según enuncia la ley de Ohm (Tensión (V)=Intensidad (I) x Resistencia (R)) al aumentar la resistencia, para una tensión constante debería proporcionar un valor inferior de corriente.

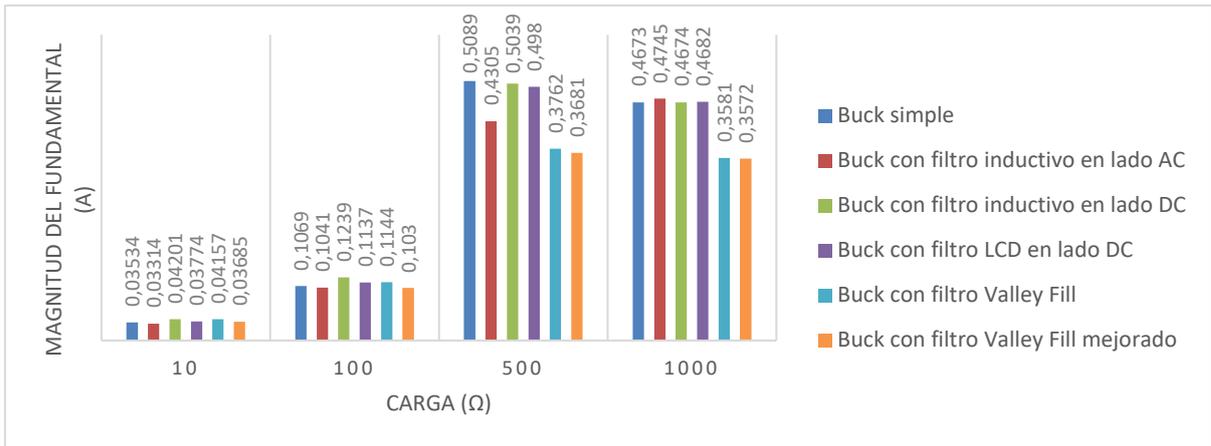


Gráfico 1. Evolución de la magnitud del fundamental en función de la carga en ohmios que le apliquemos.

Si estudiamos el efecto de la carga en la THD observamos una clara tendencia descendente a medida que aumentamos la carga en ohmios. Observamos una particularidad en las fuentes con LCD y Valley Fill, que en el paso de 500 Ω a 1000 Ω aumenta de forma leve la THD. Para el simple, filtro inductivo en el lado DC y filtro LCD el efecto de la carga se acentúa, llegándose a reducir hasta un 100% (desde 180% a 80%) desde el mejor hasta el peor caso. Esto se produce ya que el fundamental crece con la carga como hemos demostrado antes y eso produce que los armónicos pierdan importancia, dado que cuanto mayor sea la magnitud del fundamental respecto a las de los armónicos e interarmónicos menor será la tasa.

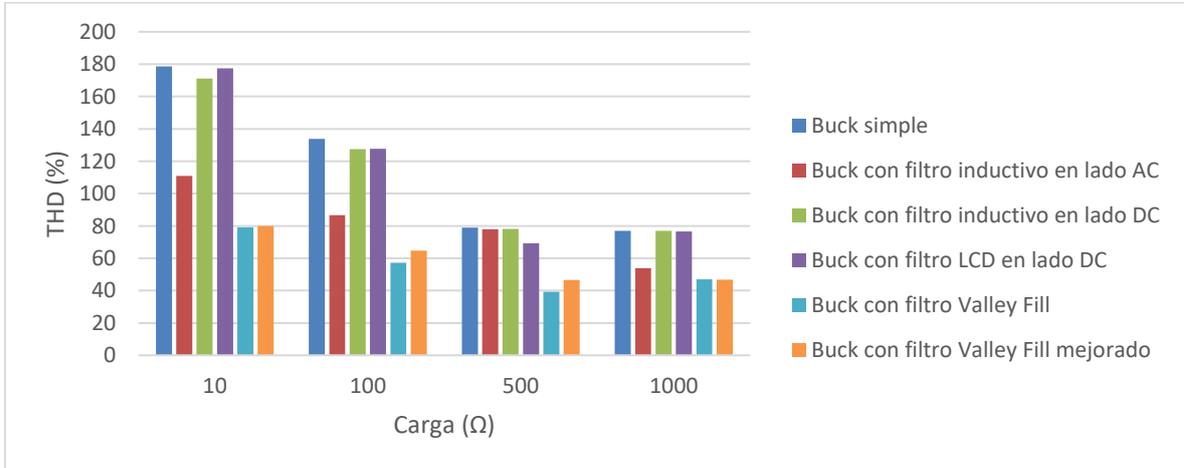


Gráfico 2. Evolución de la tasa de distorsión armónica en función de la carga en ohmios que le apliquemos.

En la respuesta en frecuencia de las seis fuentes podemos observar que en general se reduce la presencia de interarmónicos (aunque debido a la propia fuente y a sus filtrados no es muy elevada) y se reduce la influencia de los armónicos sobre la magnitud del fundamental a medida que aumenta la frecuencia de estos, siendo partícipe directo de la caída de la THD que hemos podido observar. También se reduce la presencia de armónicos en el rango de altas frecuencias. Todo esto

queda reflejado entre las Figuras 53-64, quedando reflejado cómo se reduce la presencia de interarmónicos a medida que elevamos la carga.

En las Figuras 53-54 representamos la respuesta en frecuencia del Buck simple para cargas de  $10\ \Omega$  y  $1000\ \Omega$ . La magnitud corresponde a las componentes de corriente armónicas en la señal de alimentación.

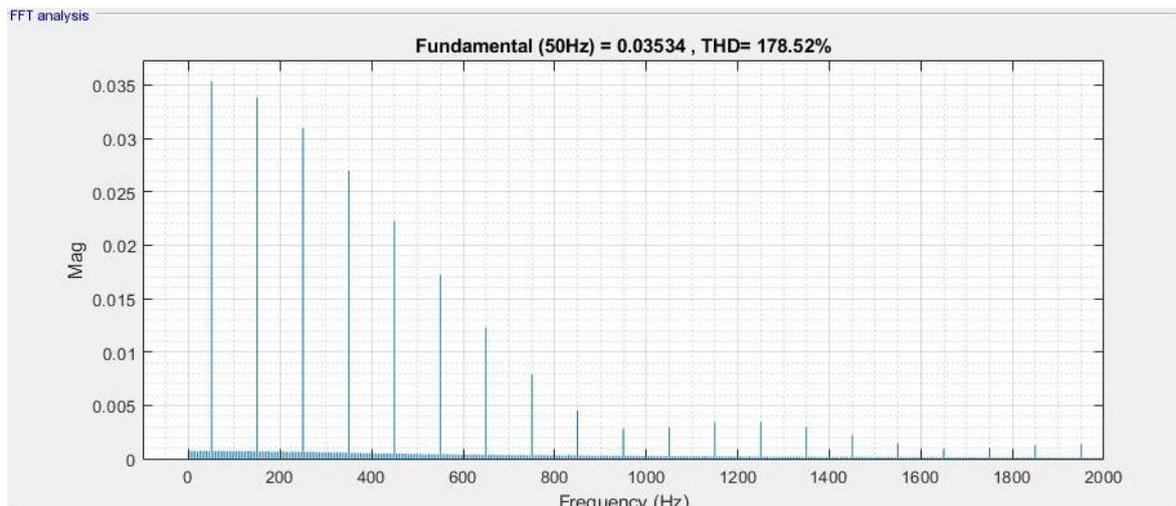


Figura 53. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una carga de  $10\ \Omega$ .

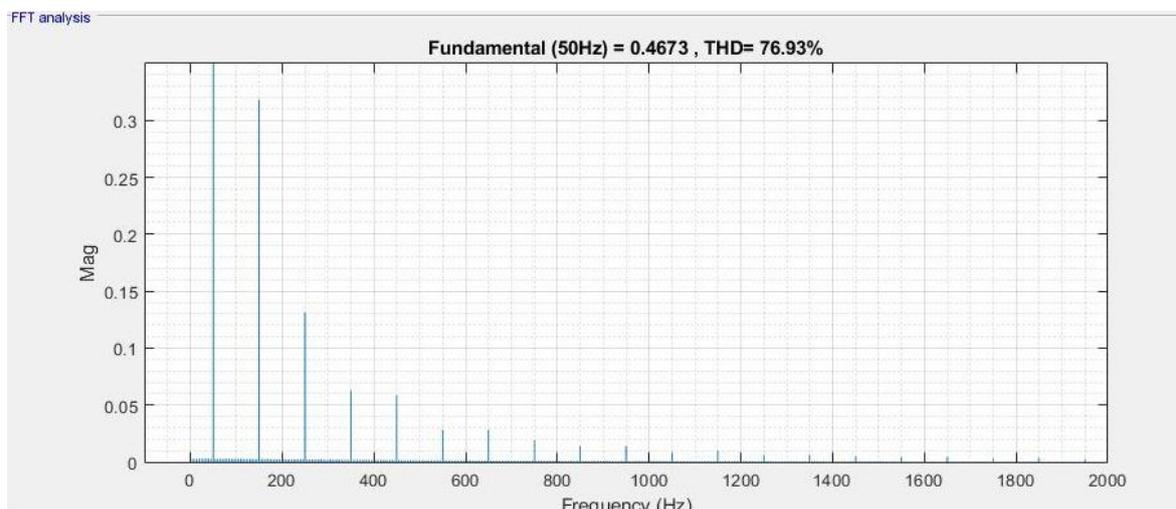


Figura 54. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una carga de  $1000\ \Omega$ .

En las Figuras 55-56 representamos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para unas cargas de  $10\ \Omega$  y  $1000\ \Omega$ .

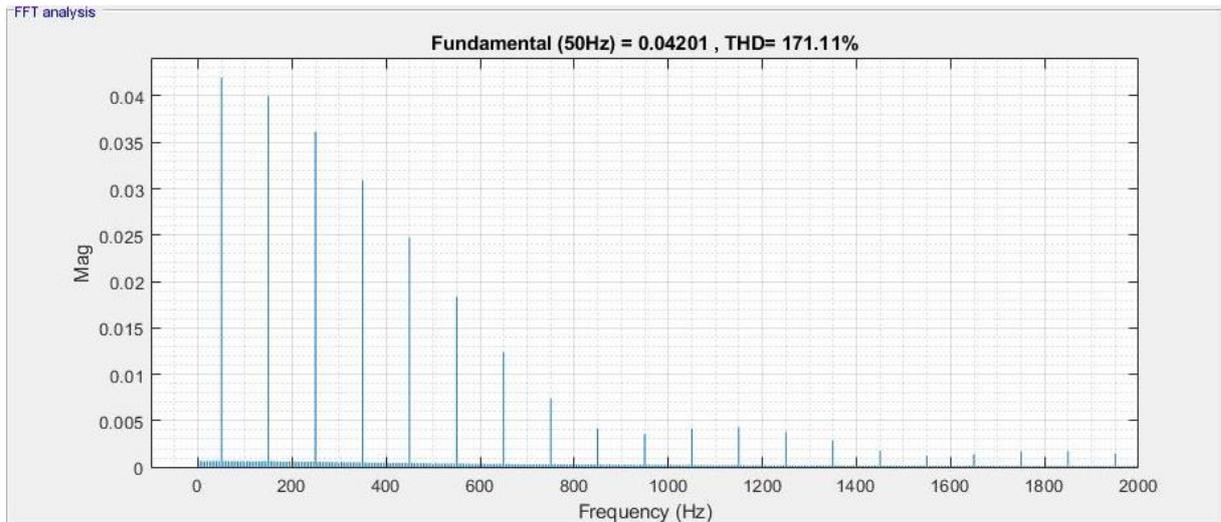


Figura 55. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una carga de  $10\ \Omega$ .

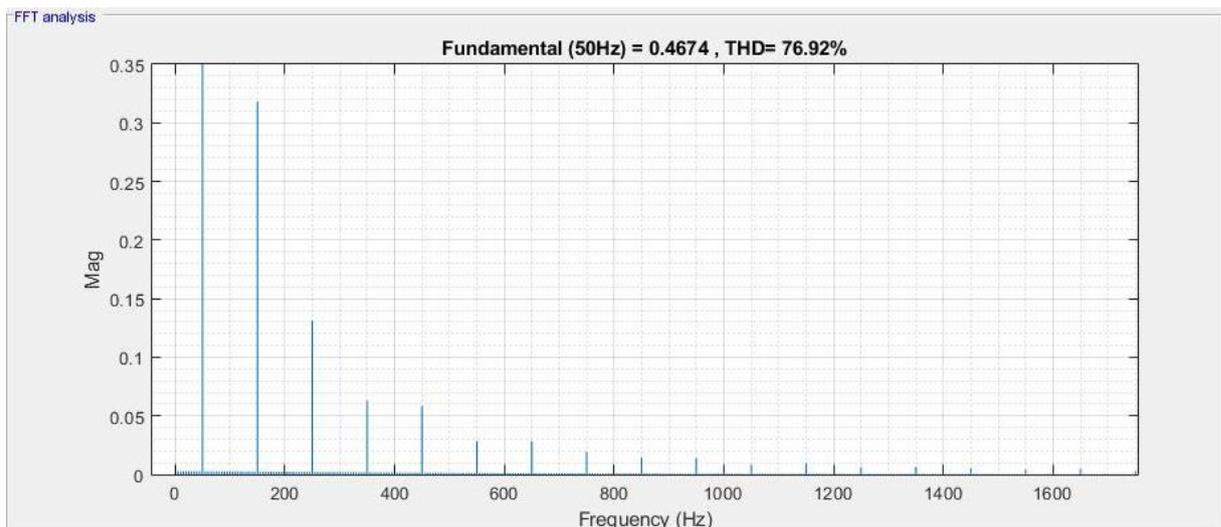


Figura 56. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una carga de  $1000\ \Omega$ .

En las Figuras 57-58 representamos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para cargas de  $10\ \Omega$  y  $1000\ \Omega$ . En este caso particular, aumenta la presencia de interarmónicos a bajas frecuencias en el caso de mayor carga en ohmios.

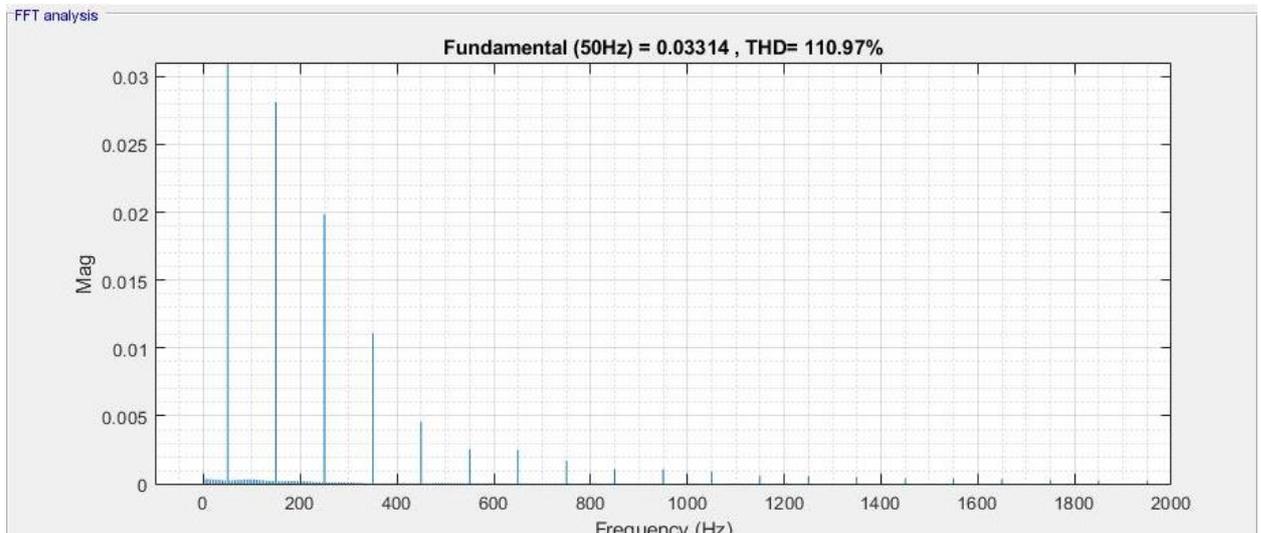


Figura 57. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una carga de  $10\ \Omega$ .

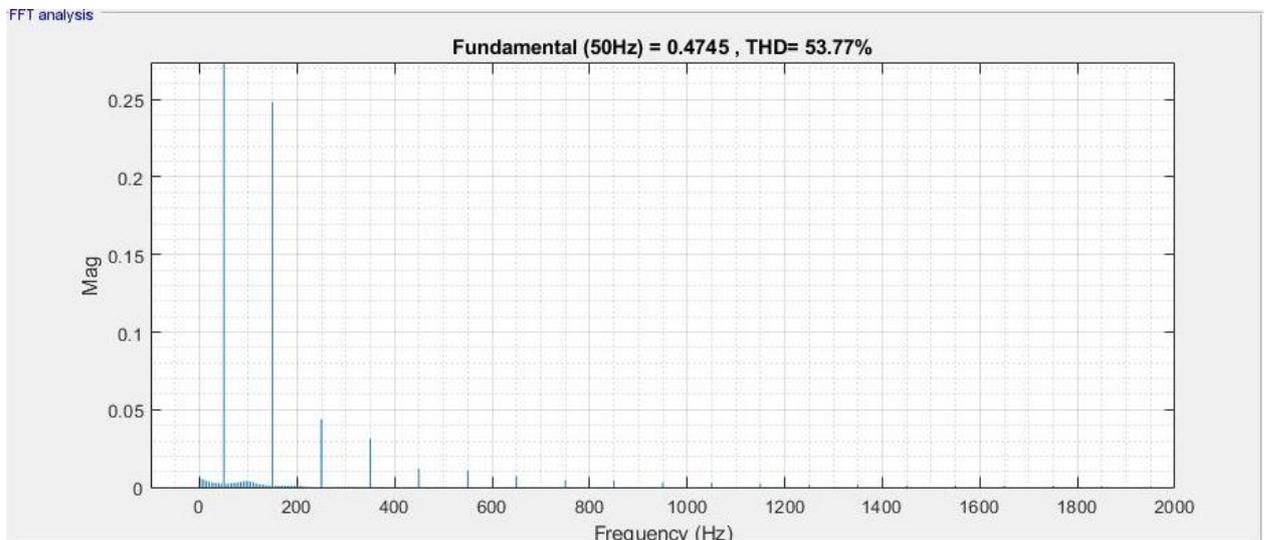


Figura 58. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una carga de  $1000\ \Omega$ .

En las Figuras 59-60 representamos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para cargas de  $10\ \Omega$  y  $1000\ \Omega$ .

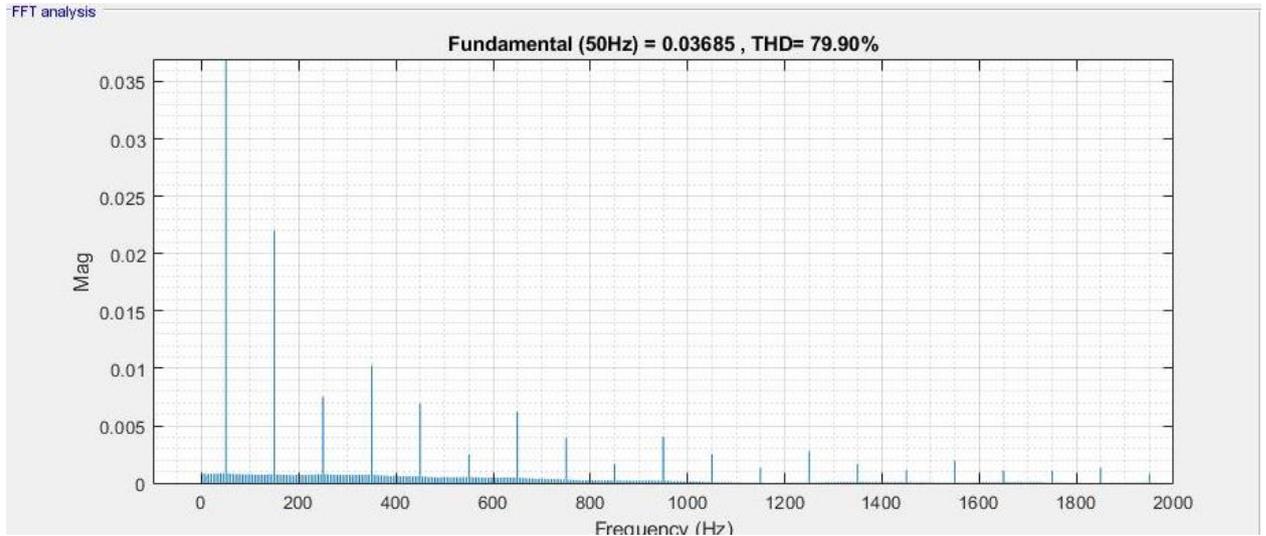


Figura 59. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una carga de  $10\ \Omega$ .

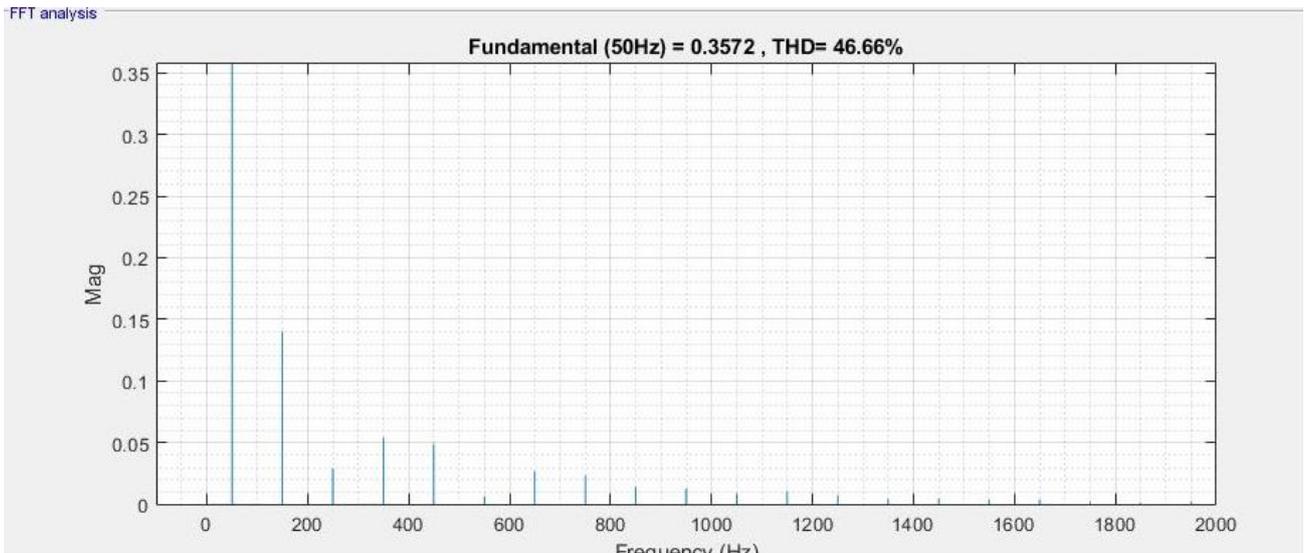


Figura 60. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una carga de  $1000\ \Omega$ .

En las Figuras 61-62 representamos la respuesta en frecuencia para Buck con filtro Valley Fill simple para cargas de  $10 \Omega$  y  $1000 \Omega$ . En este caso la presencia de interarmónicos se reduce de forma significativa.

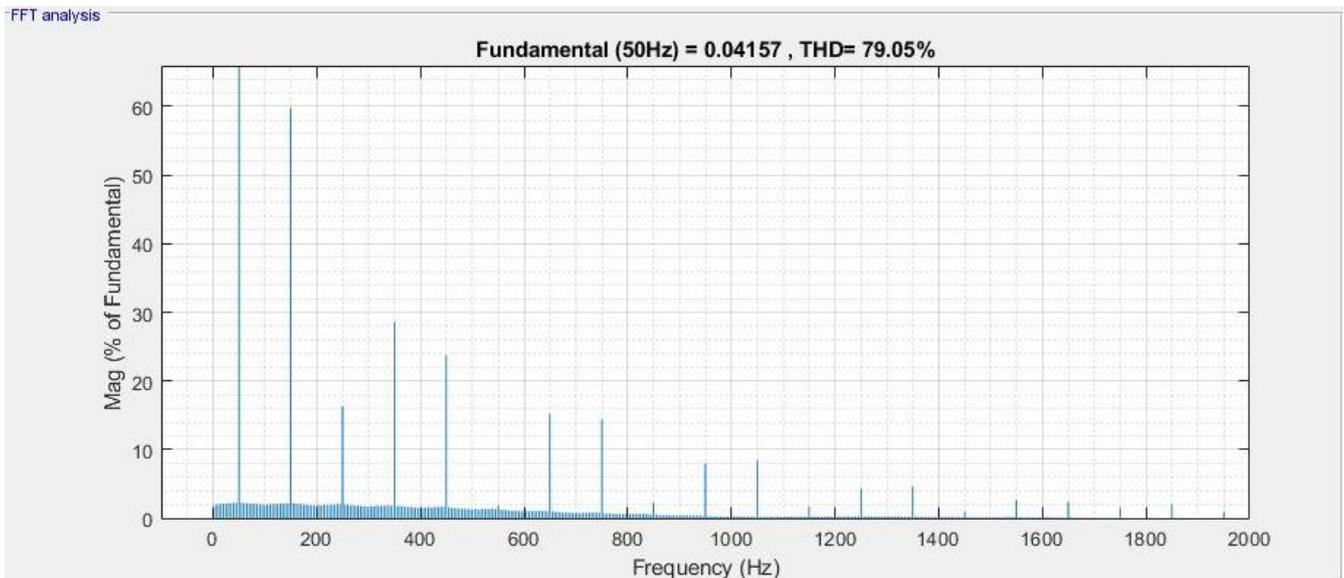


Figura 61. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una carga de  $10 \Omega$ .

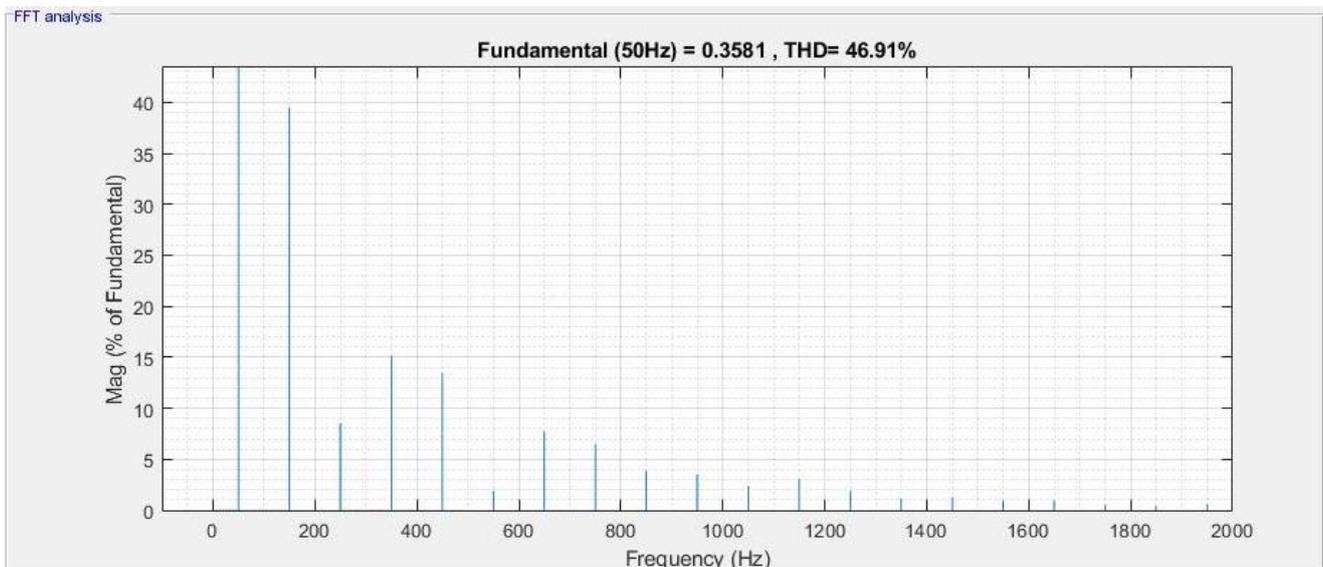


Figura 62. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una carga de  $1000 \Omega$ .

Y finalmente representamos la respuesta en frecuencia para un Buck con filtro LCD en el lado DC para una carga de  $10\ \Omega$  y de  $1000\ \Omega$ .

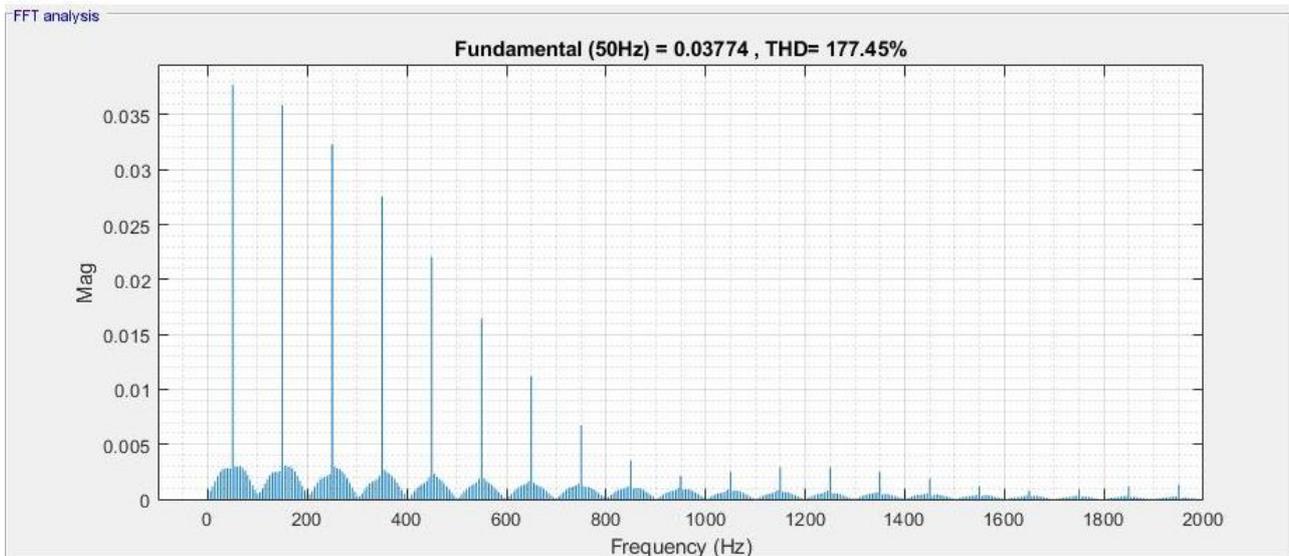


Figura 63. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una carga de  $10\ \Omega$ .

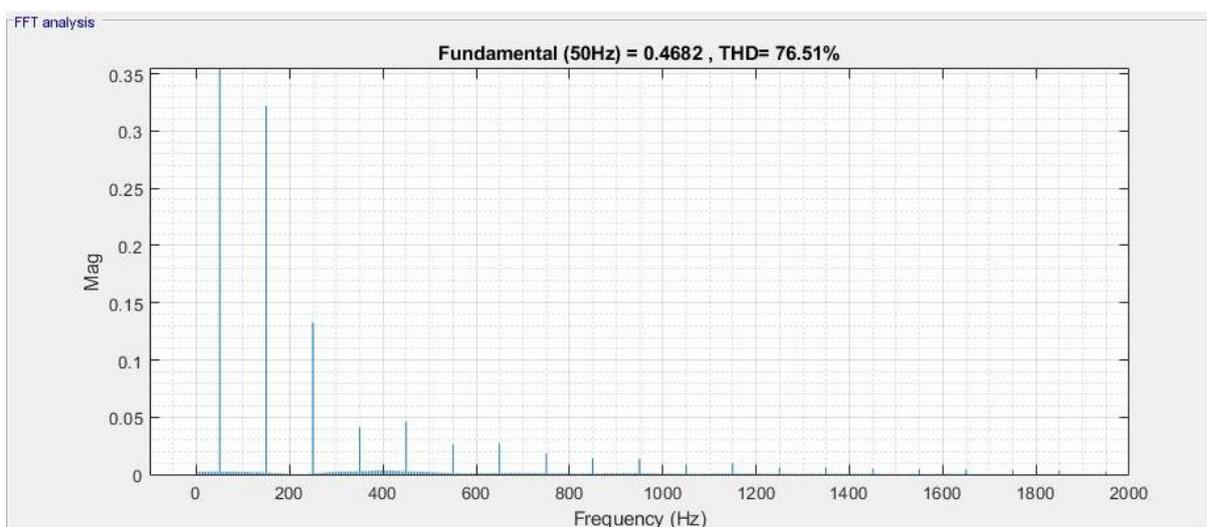


Figura 64. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una carga de  $1000\ \Omega$ .

### 6.3.2 Efecto de la variación en la frecuencia de conmutación.

Otra variable de estudio es la frecuencia a la que conmutan los polos de potencia de las fuentes de alimentación. En nuestro caso, la topología Buck tiene un polo de potencia acompañado de una bobina y un diodo. Vamos a estudiar el efecto que tiene la variación de este parámetro. A continuación, mostramos la configuración del convertidor DC/DC:

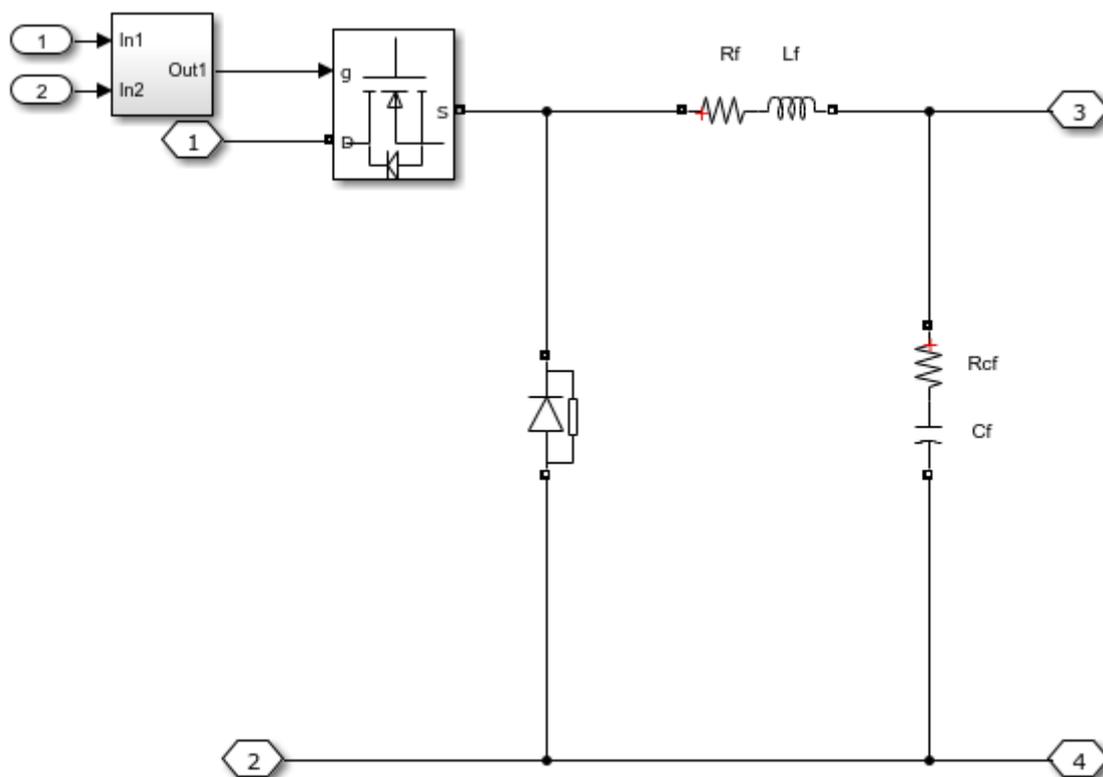


Figura 65. Distribución del convertidor DC/DC.

Para realizar este apartado hemos probado con las siguientes frecuencias:

- 2kHz.
- 10kHz.
- 100kHz.
- 200kHz.

Todo ello lo hemos probado con una carga de  $100\Omega$  y el resto de los valores constantes según venía de forma original en el modelo.

A simple vista podemos comprobar que el efecto sobre la magnitud del fundamental y sobre la THD no es muy notable. Si bien es cierto, la magnitud del fundamental tiene una ligera tendencia ascendente observándose de forma más clara en los casos con filtro inductivo.

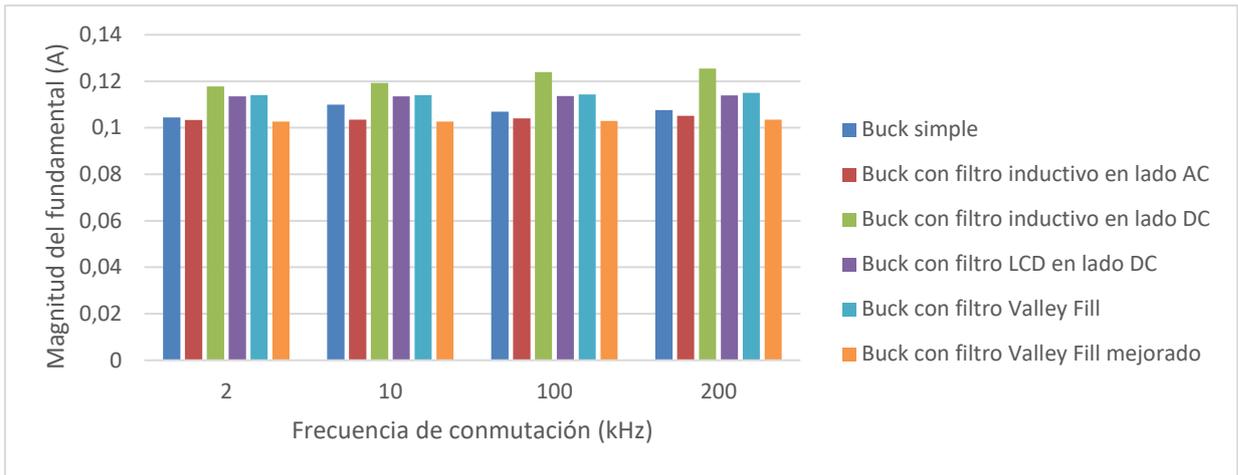


Gráfico 3. Magnitud del fundamental en función de la frecuencia de conmutación.

Nuevamente, podemos comprobar que en la THD la influencia es escasa, si bien es cierto tiene sus efectos. Podemos comprobar, sobre todo en los casos con filtro inductivo, que la THD desciende a medida que aumentamos la frecuencia, pero en cualquier caso la influencia de la frecuencia de conmutación es muy leve en la calidad de la corriente de alimentación.

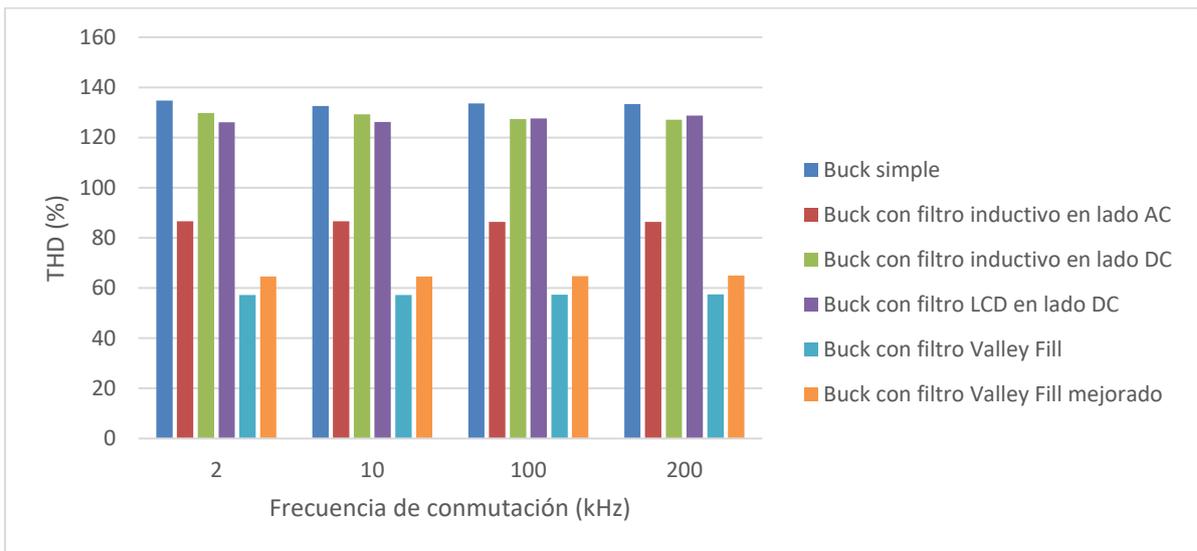


Gráfico 4. THD en función de la frecuencia de conmutación.

La respuesta en frecuencia se caracteriza por la disminución de los interarmónicos a medida que aumentamos las frecuencias en cálculos generales. Se repite el patrón exceptuando el caso para los filtros Valley Fill, que como ya hemos visto en otras situaciones tiene un comportamiento un poco diferente a los demás, creciendo de forma leve la THD. A continuación, mostramos las respuestas en frecuencia de la señal de corriente de entrada que hemos obtenido para los casos de menor y mayor frecuencia de conmutación, así obtenemos una comparación representativa, que corresponden a las Figuras 66-77. Representa de forma muy clara cómo se reduce la influencia de interarmónicos a medida que aumentamos la

frecuencia de conmutación. En las Figuras 73-74 observamos que se rompe ese patrón, observando un crecimiento en la presencia de interarmónicos.

En las Figuras 66-67 representamos la respuesta en frecuencia del Buck simple para las frecuencias de 10kHz y 200kHz. La magnitud corresponde a las componentes de corriente armónicas en la señal de alimentación.

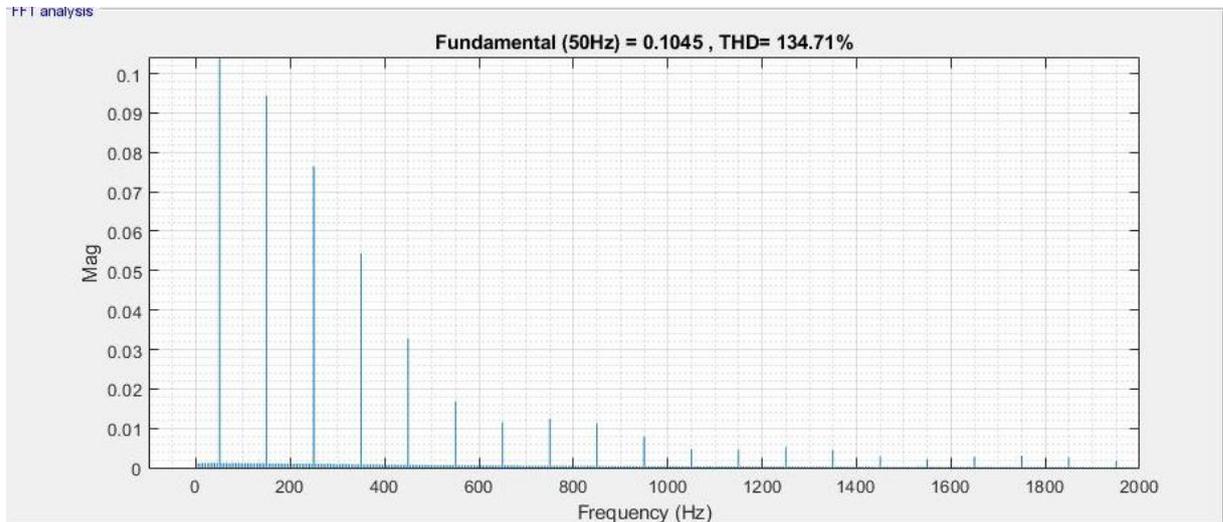


Figura 66. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una frecuencia de 10kHz.

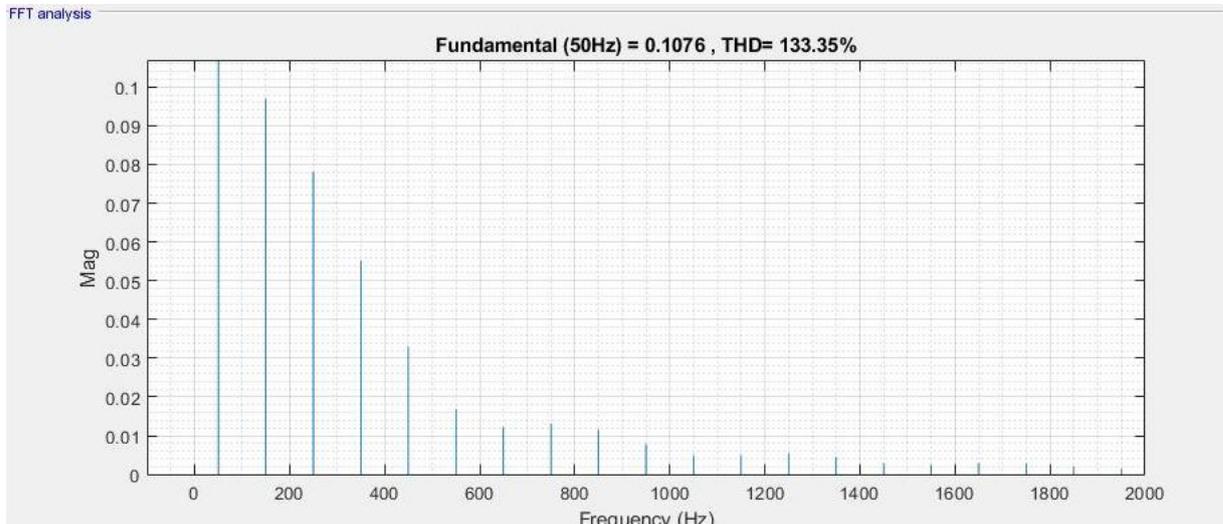


Figura 67. Respuesta en frecuencia del Buck Simple para una frecuencia de 200kHz.

En las Figuras 68-69 representamos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para las frecuencias de 10kHz y 200kHz.

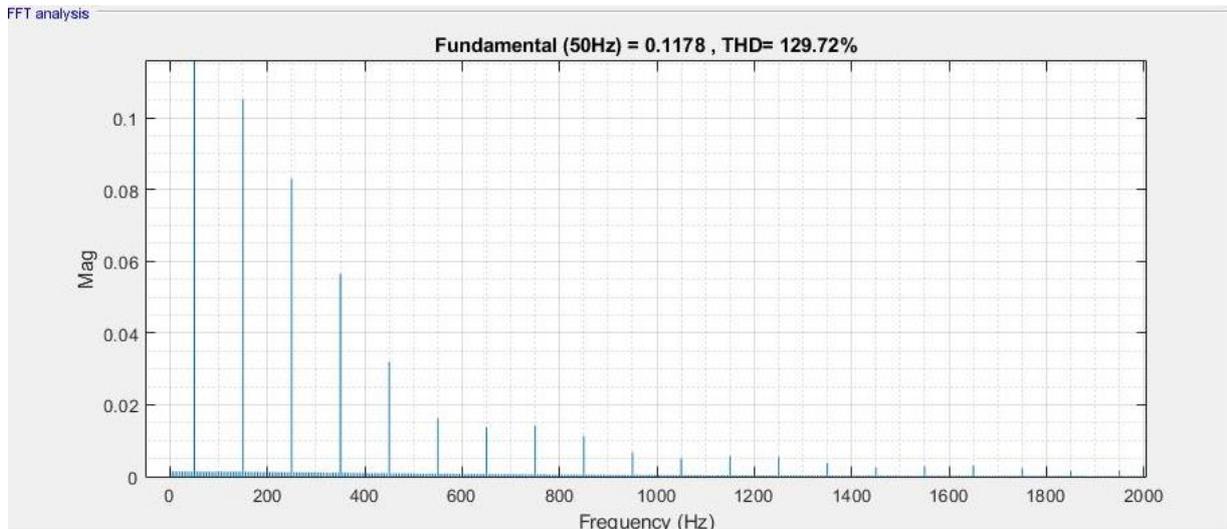


Figura 68. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para una frecuencia de 10kHz.

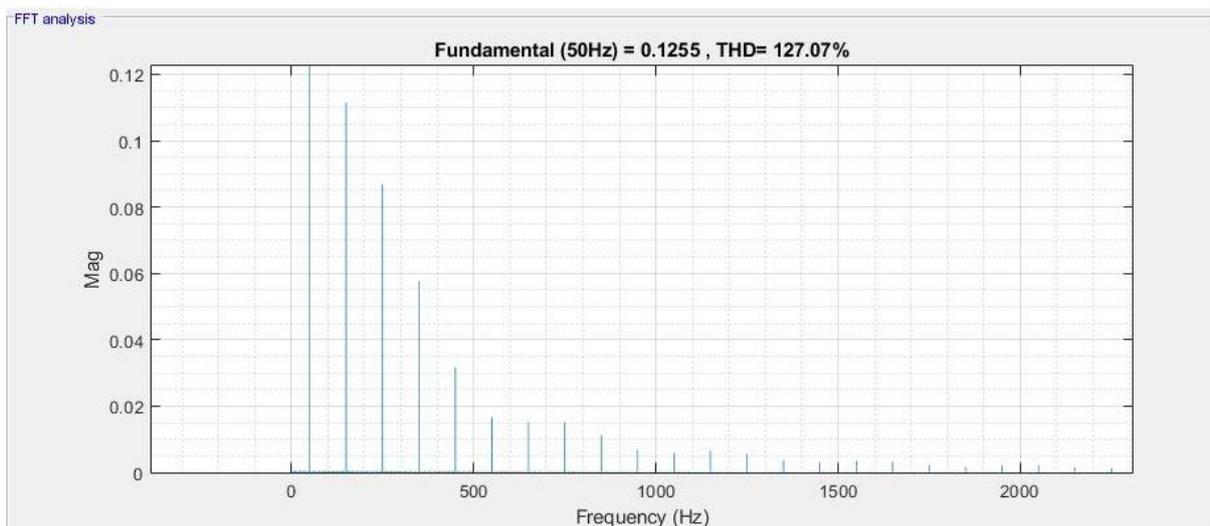


Figura 69. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado DC para una frecuencia de 200kHz.

En las Figuras 70-71 representamos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado AC para las frecuencias de 10kHz y 200kHz.

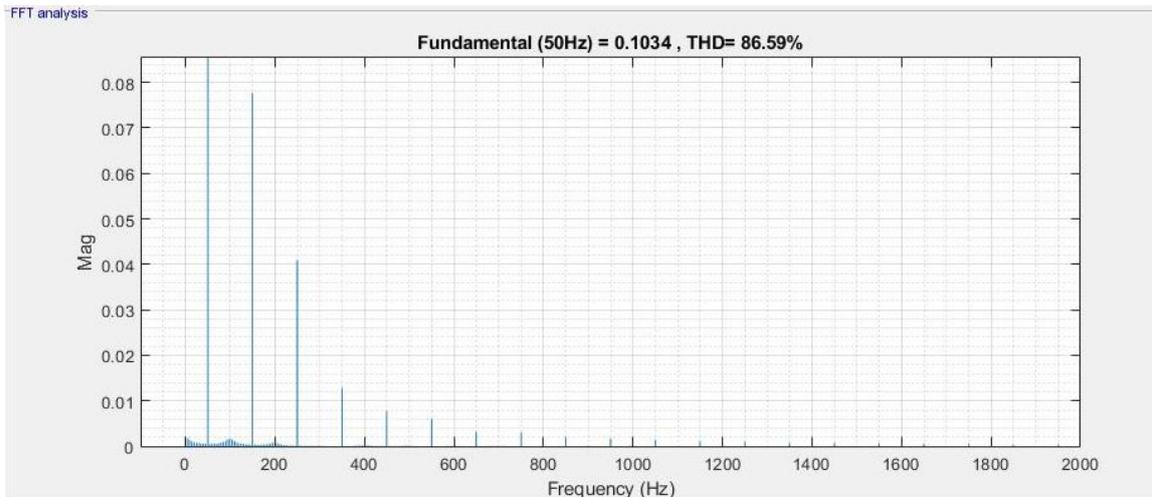


Figura 70. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado AC para una frecuencia de 10kHz.

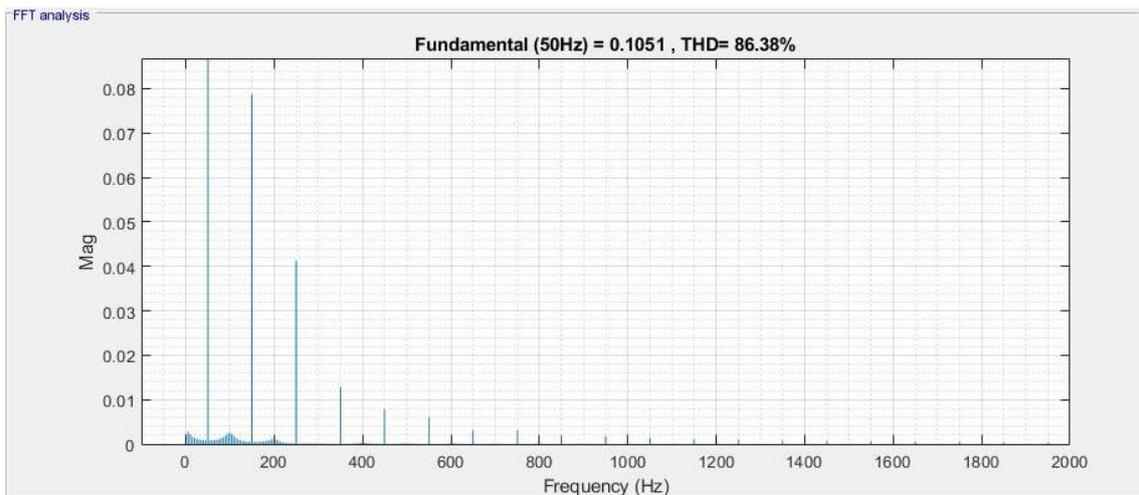


Figura 71. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en el lado AC para una frecuencia de 200kHz.

En las Figuras 72-73 obtenemos la respuesta en frecuencia del Buck con Filtro Valley Fill mejorado para las frecuencias de 10kHz y 200kHz.

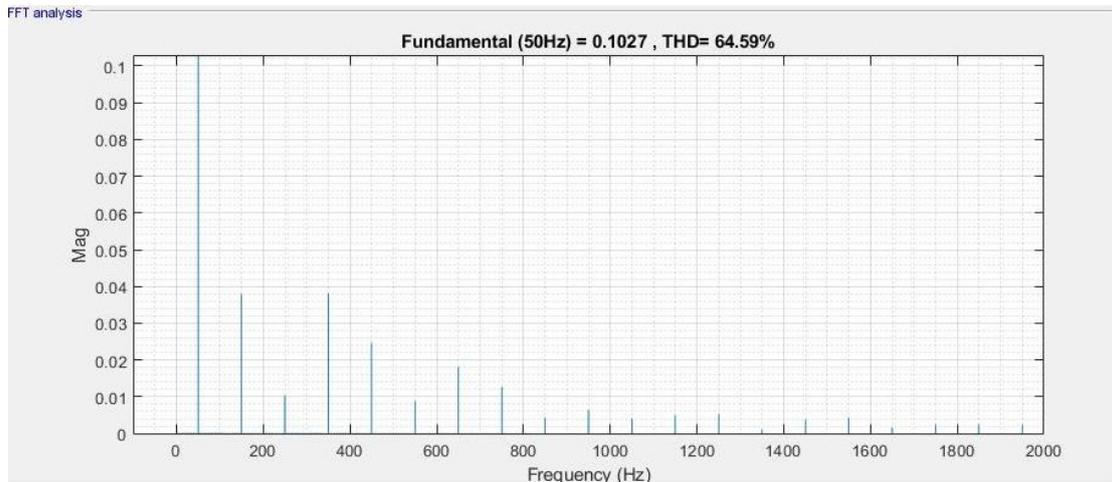


Figura 72. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una frecuencia de 10kHz.

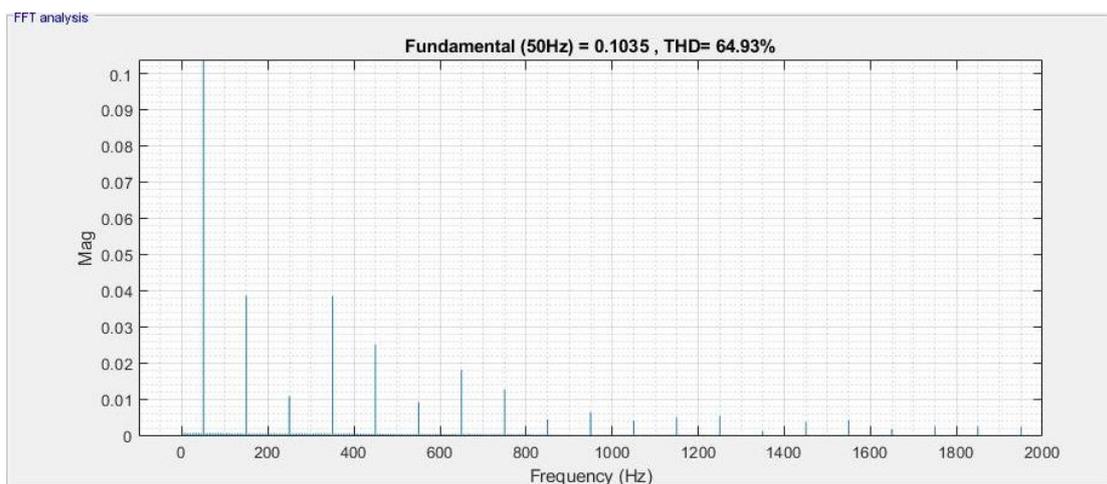


Figura 73. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill mejorado para una frecuencia de 200kHz.

En las Figuras 74-75 obtenemos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para las frecuencias de 10kHz y 200kHz.

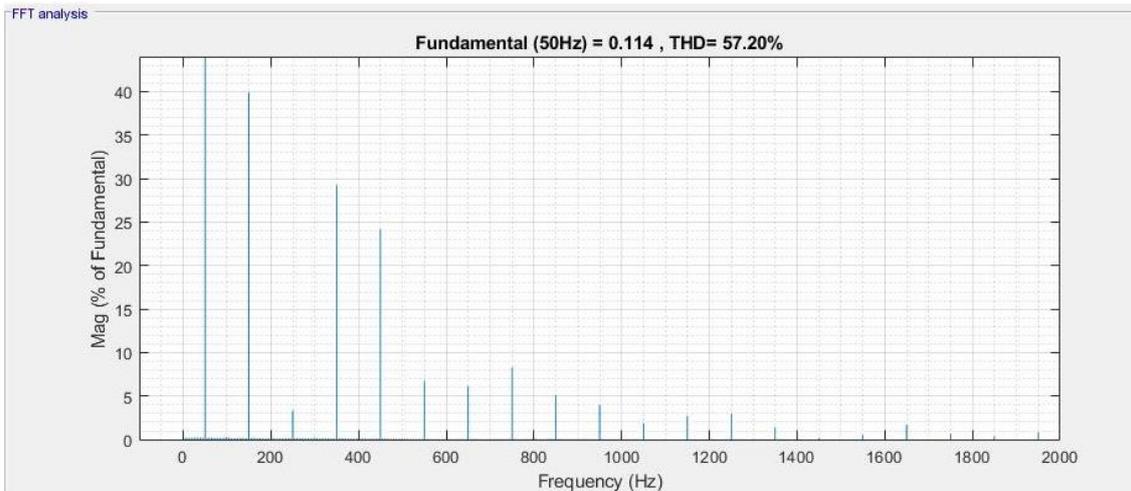


Figura 74. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una frecuencia de 10kHz.

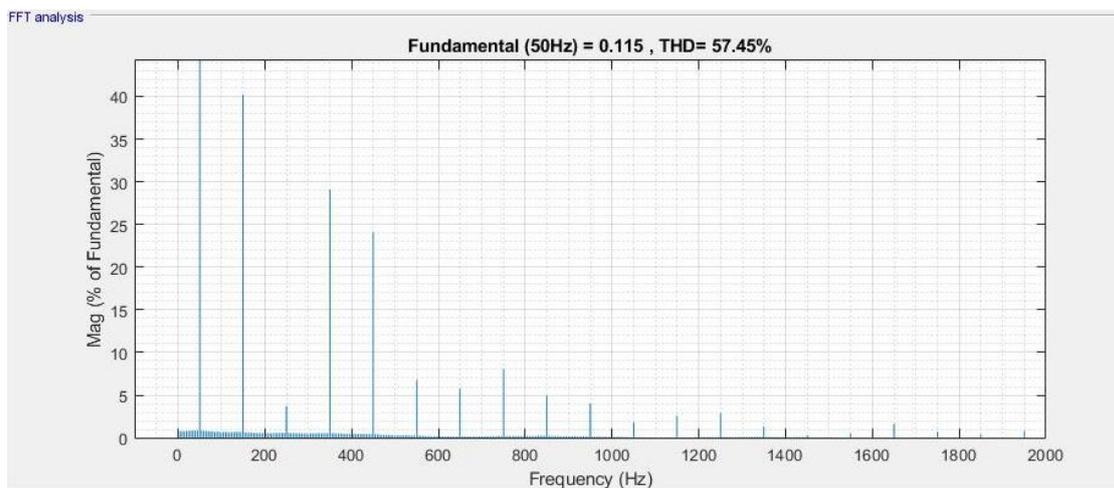


Figura 75. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro Valley Fill para una frecuencia de 200kHz.

En las Figuras 76-77 obtenemos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para las frecuencias de 10kHz y 200kHz.

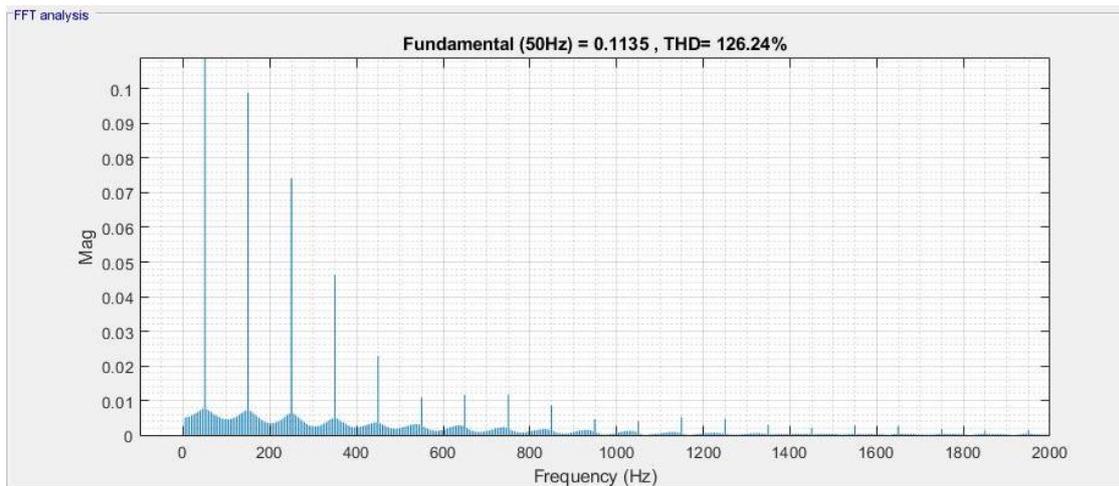


Figura 76. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una frecuencia de 10kHz.

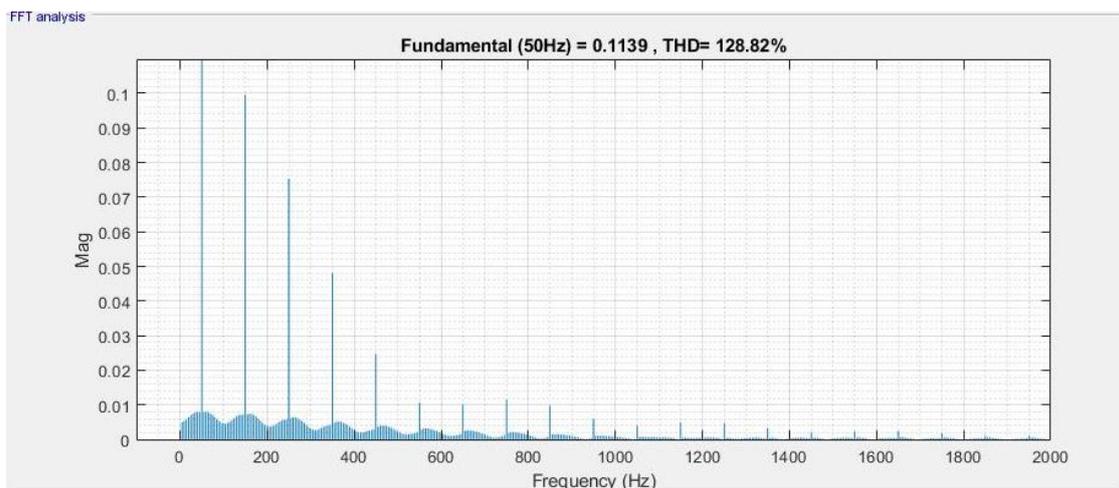


Figura 77. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro LCD en el lado DC para una frecuencia de 200kHz.

### 6.3.3 Efecto de la variación en la inductancia.

En este caso, sólo pudimos operar con cuatro casos de los seis con los que veníamos trabajando hasta ahora. Puesto que los valores originales en cada uno de los modelos eran diferentes (exceptuando los casos Valley Fill, que en ese caso coinciden), tendrán valores de inductancia particulares. En este caso la variación del parámetro “L” será bastante más significativo para el análisis que en el caso de la frecuencia de conmutación, y nos ofrecerá una visión clara de que el filtro Valley Fill tiene un comportamiento diferente al resto.

En el caso de la magnitud del fundamental no encontramos un patrón aclaratorio, seguramente sea porque la bobina se encuentra en un lugar diferente en el modelo, teniendo un efecto dispar en la calidad de la señal.

Para el caso con filtro inductivo en el lado AC podemos observar que la magnitud desciende a medida que aumentamos el valor de la inductancia (Gráfico 5), pero en el caso con filtro inductivo en el lado DC comprobamos que esta aumenta según crece el valor de la inductancia (Gráfico 6). Finalmente, como ya pudimos comprobar en otros casos, la magnitud del fundamental en los casos Valley Fill se salen de todo patrón que pudiéramos observar en los demás modelos (Gráfico 7). Para el caso de Valley Fill simple observamos que desciende a medida que aumentamos el valor, pero en el caso Valley Fill mejorado obtenemos un caso muy variable. A continuación, mostramos las gráficas con los valores obtenidos:

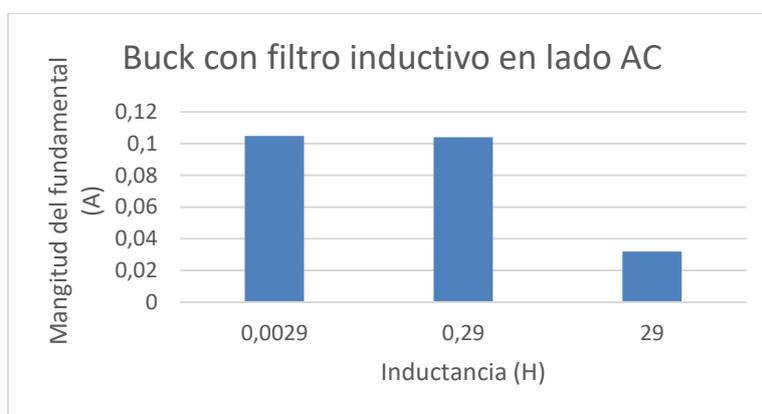


Gráfico 5. Magnitud del fundamental en función de la inductancia.

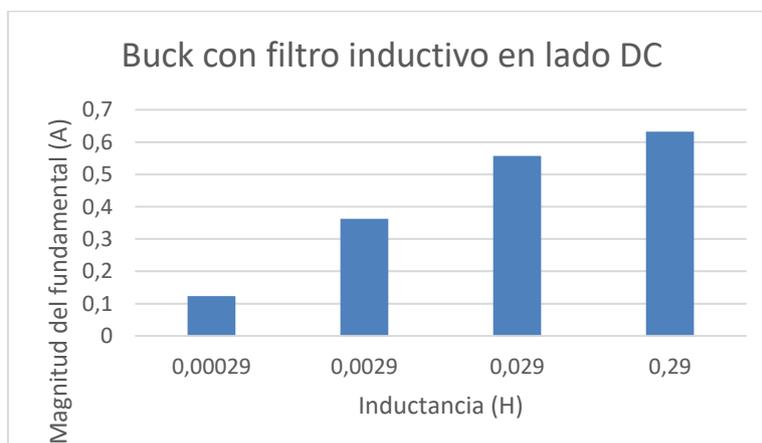


Gráfico 6. Magnitud del fundamental en función de la inductancia.

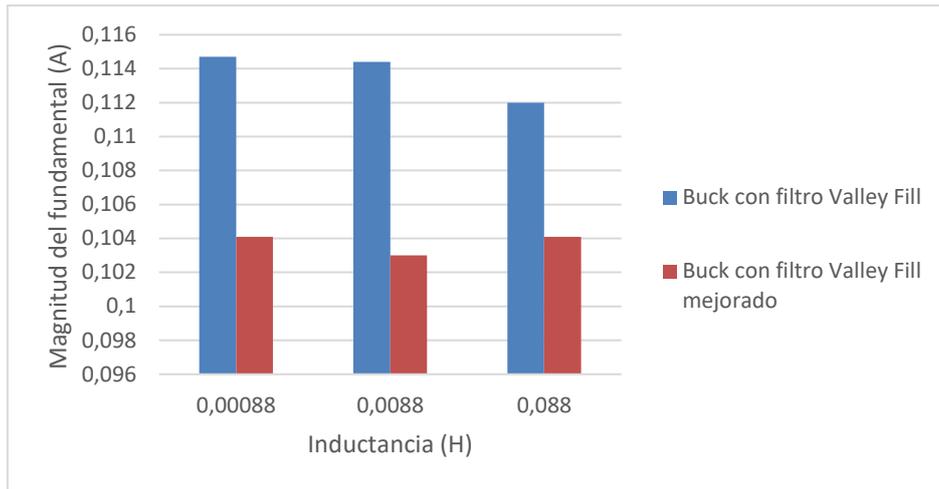


Gráfico 7. Magnitud del fundamental en función de la inductancia.

En el análisis del efecto de la inductancia en la THD observamos que en los filtros inductivos (Gráficos 8 y 9) se reduce de forma muy significativa la THD, reduciéndose hasta un 120%, pero en los casos Valley Fill (Gráfico 10) el efecto no es el mismo. En los casos Valley Fill se mantiene más o menos de forma constante, variando de forma ligera del mismo modo que varía la magnitud del fundamental.

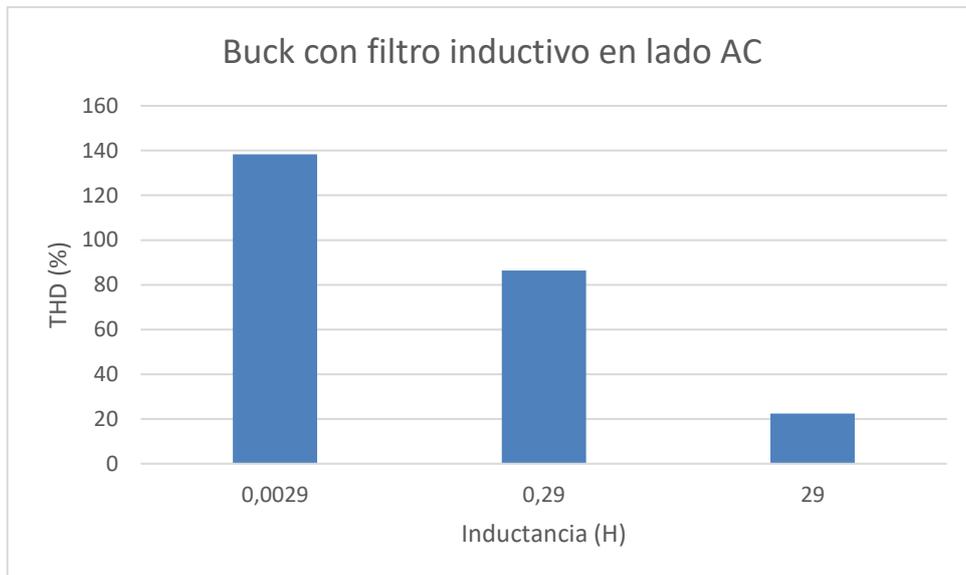


Gráfico 8. THD en función de la inductancia.

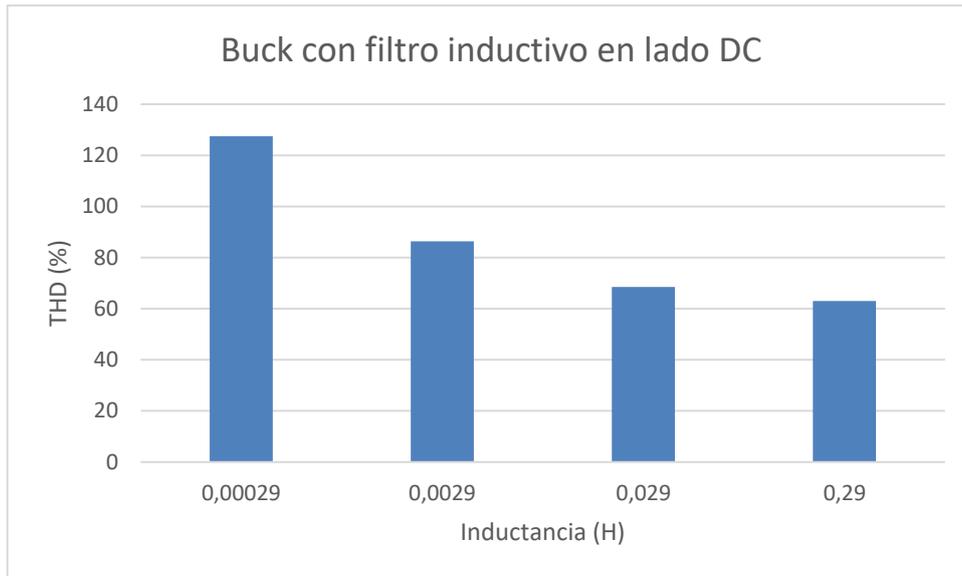


Gráfico 9. THD en función de la inductancia.

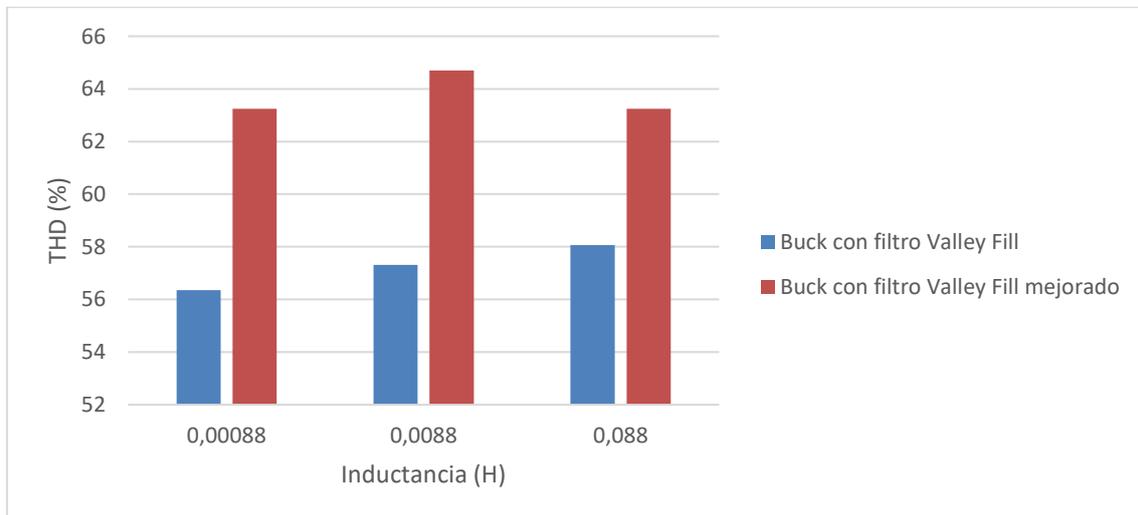


Gráfico 10. THD en función de la inductancia.

En el análisis de la respuesta en frecuencia podemos encontrar que los armónicos a altas frecuencias se reducen siendo el causante de que la THD se reduzca en la mayoría de los casos, apareciendo interarmónicos de forma generalizada a bajas frecuencias medida que aumentamos el valor de la inductancia como se demuestra en las Figuras 78-85, que apenas influyen en la calidad ya que su tamaño respecto al fundamental es insignificante. En líneas generales, exceptuando en el caso del Valley Fill simple, tenemos una grata mejoría de la calidad de la señal de alimentación (en el caso de Valley Fill mejorado la mejoría es evidente pero no actúa de una forma tan notable como en el caso de los filtros inductivos).

A continuación, mostramos las respuestas en frecuencia del menor y mayor caso que corresponden a las Figuras 78-85 para obtener una visión representativa. La

magnitud corresponde a las componentes de corriente armónicas en la señal de alimentación.

En las Figuras 78-79 obtenemos la respuesta en frecuencia del Buck con filtro en lado DC para valores de 0,00029H y 0,29H. Exceptuando el caso Buck con filtro inductivo en lado DC (Figuras 77-78), observamos que se incrementan los interarmónicos a bajas frecuencias, pero no influye de manera negativa en la THD.

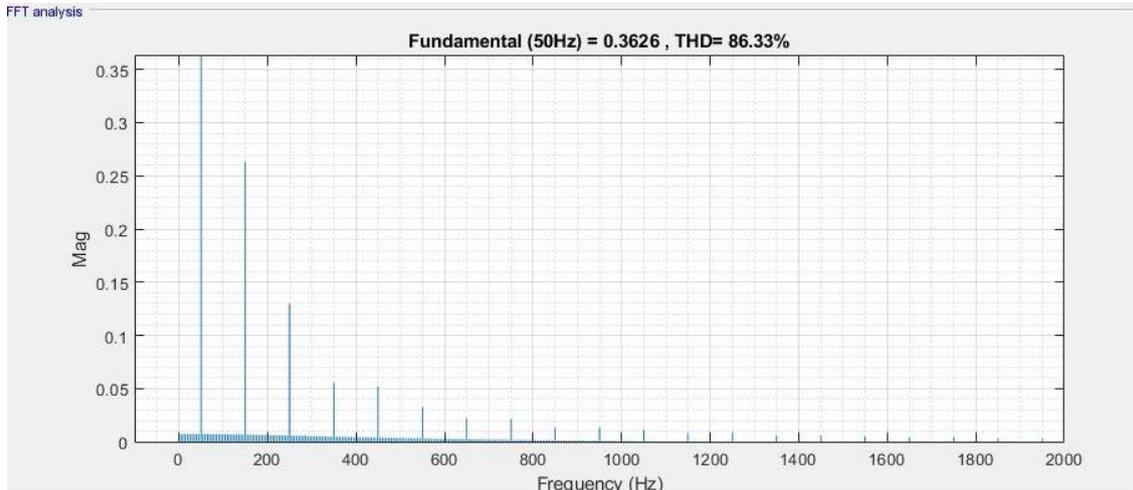


Figura 78. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una inductancia de 0,00029H.

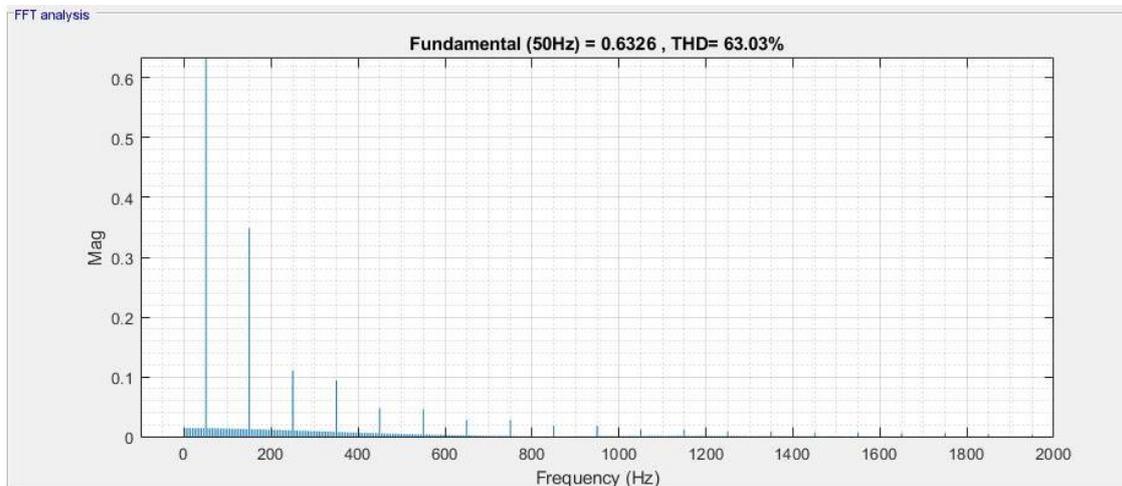


Figura 79. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado DC para una inductancia de 0,29H.

En las Figuras 80-81 obtenemos la respuesta en frecuencia para el Buck con filtro inductivo en el lado AC para valores de 0,0029H y 29H.

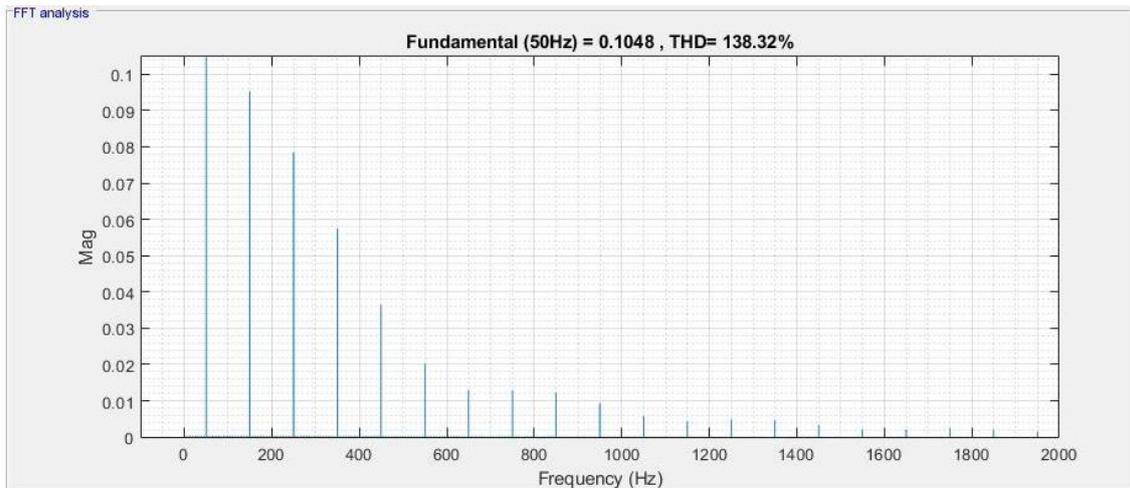


Figura 80. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una inductancia de 0,0029H.

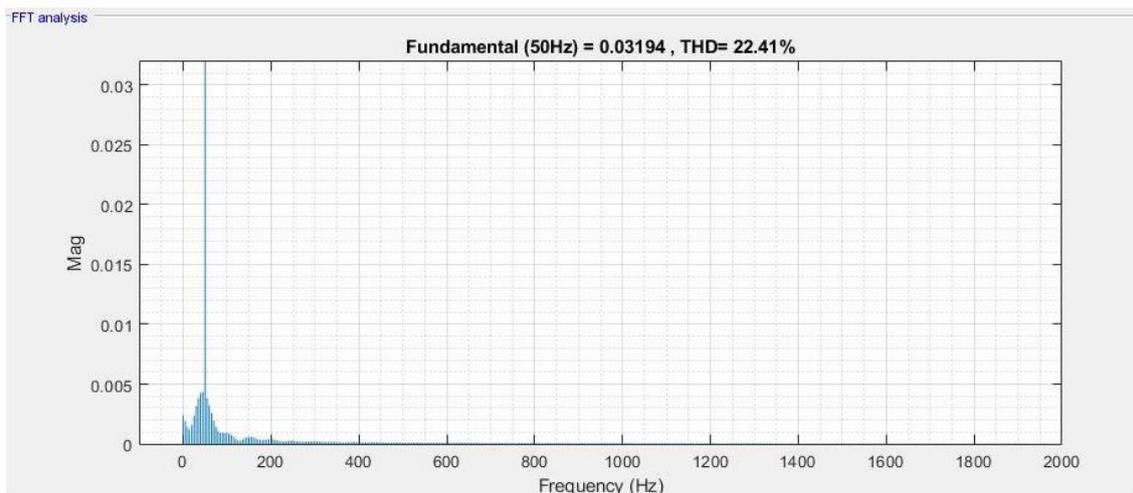


Figura 81. Respuesta en frecuencia del Buck con filtro inductivo en lado AC para una inductancia de 29H.

Las Figuras 82-83 representan la respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill mejorado para valores de 0,00088H y 0,0088H.

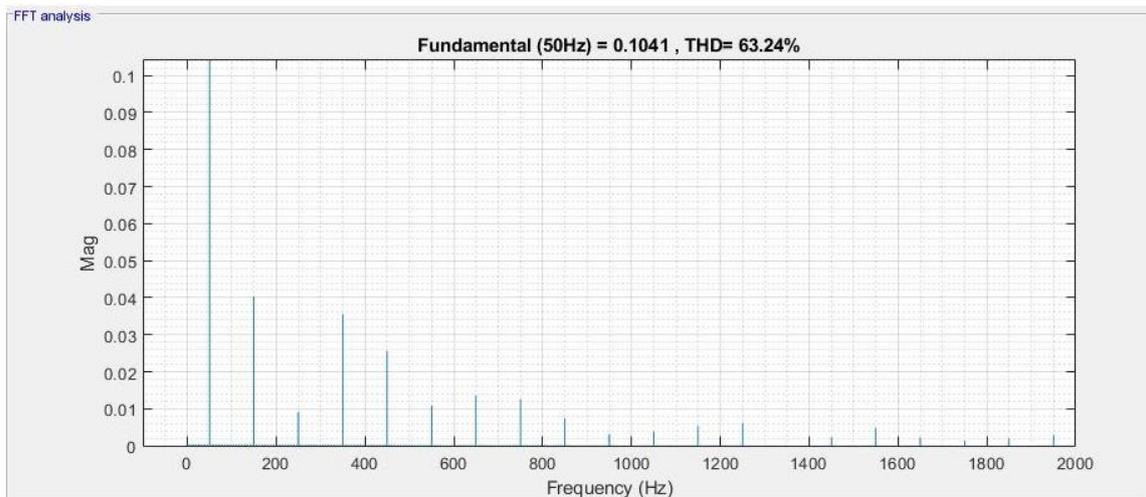


Figura 82. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill mejorado para una inductancia de 0,00088H.

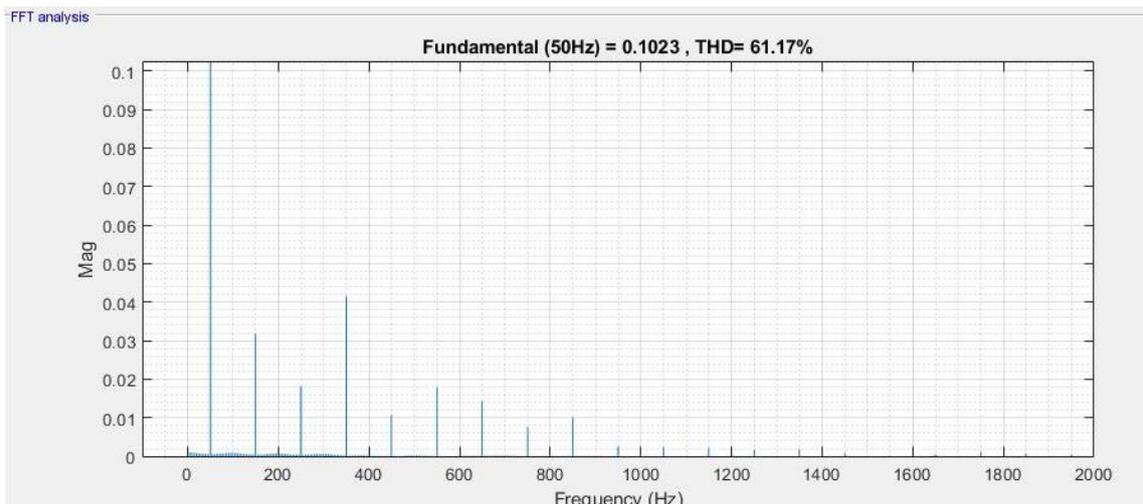


Figura 83. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill mejorado para una inductancia de 0,0088H.

Las Figuras 84-85 representan la respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill simple para valores de 0,00088H y 0,088H.

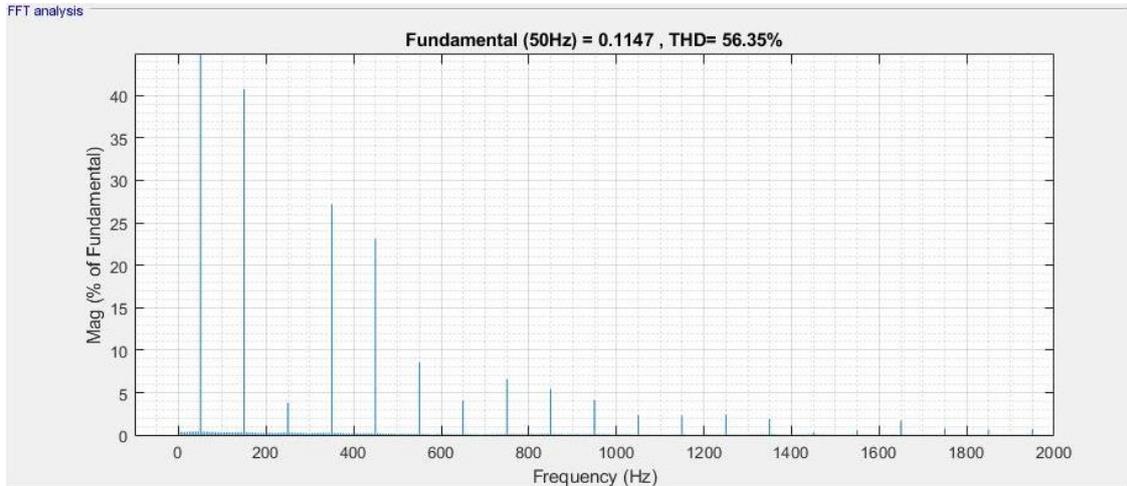


Figura 84. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill para una inductancia de 0,00088H.

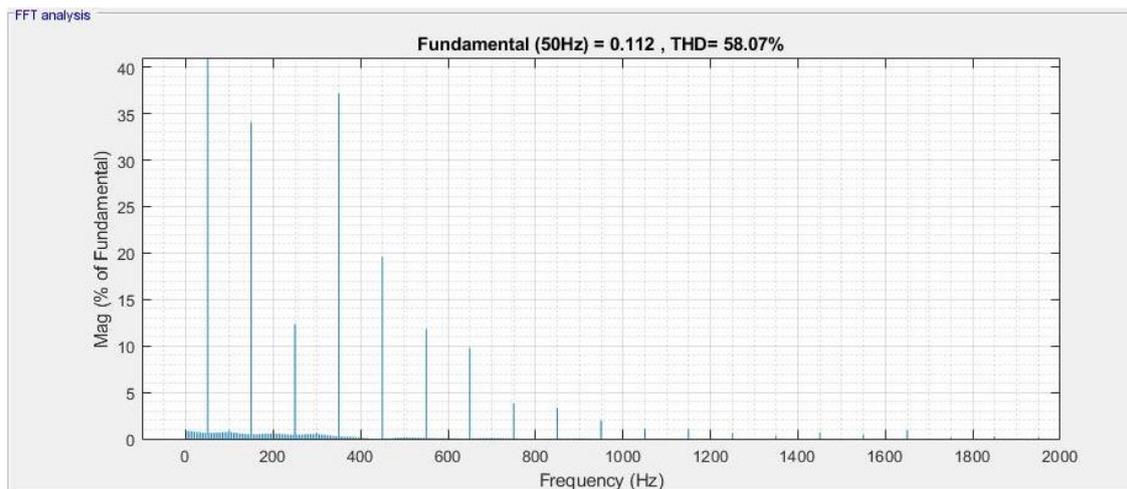


Figura 85. Respuesta en frecuencia del Buck con Valley Fill para una inductancia de 0,088H.

## 6.4 Comprobación del cumplimiento de la normativa.

En este apartado vamos a comprobar que cumplimos la normativa vigente en materia de emisión de armónicos a la red pública.

En el capítulo 2 mencionamos la norma UNE-EN IEC 61000-3-2:2019, que regula la emisión de armónicos de corriente para dispositivos que consumen  $\leq 16$  A amperios por fase que se puedan conectar a la red pública.

Nosotros nos vamos a centrar en los dispositivos que clasifica la norma como de "Clase C", que corresponden a las luminarias.

Por medio de una hoja de cálculo hemos podido comprobar si se cumplen o no los preceptos que recogíamos en el apartado 2.4, que debido a las dimensiones de esta las adjuntaremos en anexos.

Los resultados han sido llamativos, ya que ninguna de las fuentes de alimentación con LEDs que consumen una potencia mayor a 25W cumple la norma, ya que se vuelve más restrictiva.

Los modelos que la cumplen son los siguientes:

- Buck con filtro inductivo en lado AC con una carga de  $10\Omega$ .
- Buck con filtro Valley Fill con una carga de  $10\Omega$ .
- Buck con filtro Valley Fill mejorado con una carga de  $10\Omega$ .
- Buck con filtro inductivo en el lado AC con una frecuencia de conmutación de 2 kHz.
- Buck con filtro inductivo en el lado AC con una frecuencia de conmutación de 200 kHz.
- Buck con filtro Valley Fill mejorado con una frecuencia de conmutación de 2 kHz.
- Buck con filtro Valley Fill mejorado con una frecuencia de conmutación de 200 kHz.
- Buck con filtro inductivo en lado AC para una inductancia de 29H.
- Buck con filtro Valley Fill mejorado con una inductancia de 0,00088H.
- Buck con filtro Valley Fill mejorado con una inductancia de 0,088H.

Queda reflejado que el que mejores resultados aporta en cuanto a calidad de señal de corriente emitida a la red es el modelo con filtro Valley Fill mejorado. El modelo con filtro inductivo en lado AC aporta también buenos resultados.



## 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

En este capítulo comentaremos las conclusiones de nuestro trabajo y, por último, comentaremos futuras líneas de investigación.

### 7.1 Conclusiones.

A lo largo del trabajo hemos hecho un estudio de la normativa a cumplir, que se recoge en el capítulo dos. También hemos hecho un análisis de la situación de las tecnologías de la iluminación y hemos estudiado el concepto de los armónicos y sus herramientas de estudio. Por último, hemos investigado las fuentes de alimentación de las lámparas LED y hemos simulado los modelos.

Tras realizar un estudio sobre seis tipos diferentes de filtrados de fuentes de alimentación tipo Buck hemos podido obtener numerosas conclusiones.

Quedó patente que las fuentes de alimentación obtenían **mejores resultados** en cuanto a calidad de la señal de alimentación (THD y presencia de armónicos) **a medida que se eleva la carga ( $\Omega$ )**, aunque podemos observar que a partir de una carga de  $500\Omega$  se estabiliza el valor de la THD, evidenciando que para valores elevados de carga en ohmios no es válida esa afirmación. Esto se explica dado que las fuentes de alimentación conmutadas y en general los convertidores DC/DC funcionando en vacío ganan en inestabilidad y pierden rendimiento. Es un caso parecido a los inversores fotovoltaicos (que cuentan de forma interna con convertidores DC/DC) que tienen un rendimiento más elevado a medida que la carga se acerca a su potencia nominal, pues en los drivers que usamos para alimentar lámparas LED ocurre un efecto similar. Elevando la carga ( $\Omega$ ) a valores entre  $500\Omega$  y  $1000\Omega$  podrían mejorarse los resultados de la THD, pero al elevarse la potencia consumida se clasifican en potencias superiores a  $25W$  y no cumplen los requisitos, por lo que aunque mejore los resultados de la THD nos conviene reducir la carga en ohmios.

Hemos detectado una **caída en la presencia de armónicos en altas frecuencias y una caída en la presencia de interarmónicos a medida que aumentamos la carga en ohmios**. Esto puede influir de manera positiva en la calidad de la corriente de alimentación. Los armónicos que no desaparecen terminan perdiendo influencia respecto al fundamental, ya que cuanto mayor sea el fundamental respecto a los armónicos menor será la THD. **De aquí deducimos que el valor óptimo de la carga en ohmios para que las fuentes de alimentación simuladas obtengan una buena THD y buena respuesta en frecuencia ronda en torno a  $500\Omega$ .**

Aun habiendo obtenido resultados diferentes en los casos Valley Fill, en el modelado realizado con diferentes cargas hemos obtenido resultados similares en cuanto a comportamiento en los seis casos estudiados.

Si bien hemos obtenido resultados aclaratorios en el caso de la carga, para el caso de la variación de **la frecuencia de conmutación hemos concluido que no influye tanto en la calidad de la señal.**

Hemos detectado que en casos generales aumentar la frecuencia de conmutación permite reducir en pocos puntos la THD en los casos:

- Buck Simple.
- Buck con filtro inductivo en lado DC.
- Buck con filtro inductivo en lado AC.

En los casos con filtrado Valley Fill se mantiene constante, pero en el caso de filtrado LCD en lado DC obtenemos un leve aumento en la THD.

Un resultado significativo indica que la **presencia de interarmónicos a altas frecuencias se reduce a medida que aumentamos la frecuencia de conmutación, por lo que un valor óptimo se puede situar entorno a 100kHz y 200kHz.**

Por último, hemos analizado el efecto que tiene la variación de los elementos inductivos en los filtros, resultando casos más dispares dado que en cada caso la bobina juega un papel diferente dentro de su modelo. En este caso sólo hemos analizado cuatro elementos:

- Buck con filtro inductivo en lado DC.
- Buck con filtro inductivo en lado AC.
- Buck con filtro Valley Fill.
- Buck con filtro Valley Fill mejorado.

**En los dos primeros casos se reduce la THD de forma muy severa, afectando de forma muy positiva a medida que aumentamos el valor de la inductancia.** Desde el peor hasta el mejor caso conseguimos reducir hasta un 120% la tasa, siendo un valor muy positivo para tener en cuenta. **Por lo que para el filtro inductivo en el lado DC y AC con valores de 29H y 0.29H respectivamente tendríamos muy buenos resultados en relación con la THD,** así que es importante tener en cuenta que aumentando el valor de “L” mejoraríamos los resultados de la THD, pero deberíamos tener en cuenta que eso podría influir en el tamaño final de la fuente de alimentación, ya que podría complicar el diseño.

**En los filtros Valley Fill se mantiene de forma aparentemente constante pero el resultado final es un pequeño incremento de la tasa a medida que aumentamos el valor de la inductancia.** A efectos prácticos, en las fuentes con filtro Valley Fill apenas tiene incidencia la variación de la inductancia.

Como ya mencionamos en el apartado de normativa, la UNE 61000-3-2 nos obliga a cumplir una de las dos premisas que a continuación vamos a nombrar:

- El tercer armónico no debe superar el 86% del fundamental.
- El quinto armónico no debe superar el 61% del fundamental.

Otro de nuestro cometido es comprobar si las luminarias que hemos experimentado cumplen la normativa, ya que de lo contrario no se podrían comercializar. De aquí pudimos comprobar que sólo dos modelos examinados cumplen la norma, que son:

- Buck con filtro Valley Fill mejorado.
- Buck con filtrado inductivo en el lado AC.

Y no todos, sólo cumplen la normativa para determinados parámetros.

Además, hemos de tener en cuenta que sólo cumplen la normativa los modelos de una potencia inferior a 25W como se indica en el apartado 6.4, dado que la normativa para potencias mayores es más restrictiva y sólo la cumplen los modelos con filtrados más efectivos, por lo que la calidad de la corriente de alimentación es mejor.

## 7.2 Futuras líneas de investigación.

Tenemos en cuenta que nuestro trabajo puede servir de trampolín hacia futuras investigaciones en el campo de las fuentes de alimentación a lámparas LED.

Una línea de investigación podría ser la mejora de los filtrados que no han cumplido la normativa.

Otra línea de investigación importante sería el estudio del efecto la variación de otros parámetros dentro del propio Buck, o el estudio de otras fuentes de alimentación con convertidores diferentes.

Sería interesante estudiar la razón por la que al aumentar la carga en ohmios de la fuente se eleva la magnitud del fundamental de la corriente, cuando debería de ser, al contrario.

Si bien hemos comprobado que algunos modelos cumplen la normativa según las simulaciones, se podría realizar un modelo de forma física y analizar los datos, variando los parámetros como hemos hecho en este trabajo.

Por último, sería interesante realizar un estudio de los balastos electrónicos de las lámparas fluorescentes.



## BIBLIOGRAFÍA.

(UNE-ISO 690)

- [1] INDALUX. *Luminotecnia*.
- [2] HERNÁN, F. Y GÓMEZ. *Corrección activa del factor de potencia en cargas no lineales*. Colombia: D. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Abril 2004.
- [3] RADWA M. ABDALAAL Y CARL NGAI MAN HO. *Characterization of Commercial LED Lamps for Power Quality Studies*. Winnipeg: Universidad de Manitoba. 2017.
- [4] GUERRERO CRUZ, LEANDRO. *Viabilidad del uso de luminarias LED en la empresa comandante Ernesto Che Guevara*. Cuba: Instituto superior minero de moa 2013.
- [5] SERRANO, ANA., MARTÍNEZ, ABELARDO., GUARDDON, OSCAR., SANTAOLAYA, JOSÉ LUIS. *Analysis of energy saving in industrial LED lighting: A case study*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Abril 2015.
- [6] HERRANZ, CARLOS., OLLÉ, JOSEP M.<sup>a</sup>., JÁUREGUI, FERNANDO. *La iluminación con led y el problema de la contaminación lumínica*.
- [7] BARBOSA, ANDRÉS FELIPE., NOGUERA, LUIS ANTONIO., GIRAL, WILLIAM MAURICIO. *Análisis de distorsión armónica en iluminación LED*. Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Diciembre 2017.
- [8] DARIEL ARCILA, JOSÉ. *Armónicos en sistemas eléctricos*. Ingeniería Especializada S.A.
- [9] A. TEJADA, A. LLAMAS. *Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos*.
- [10] CARRILLO GONZÁLEZ, CAMILO JOSÉ. *Fundamentos del Análisis de Fourier*. Vigo: Universidade de Vigo. 2003.
- [11] BLANCO, ANA MARÍA., STIEGLER, ROBERT., MEYER, JAN. *Power Quality Disturbances caused by Modern Lighting Equipment (CFL and LED)*. Monterrey: Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey.
- [12] COOPER, DAVE. *Dimming LED Lighting*. AEG. Noviembre 2011.
- [13] GARRIDO, JOAQUÍN., MORENO, ANTONIO., GIL, AURORA., PALLARES, VÍCTOR., MORALES, TOMÁS. *Supraharmonics emission from LED lamps: A reduction proposal based on random pulse-width modulation*. Córdoba (España): Universidad de Córdoba. 2018.
- [14] UDDIN, SOHEL., SHAREEF, HUSSAIN., MOHAMED, AZAH., HANNAN. *An Analysis of Harmonic Diversity Factors Applied to LED Lamps*. Bangi (Malaysia): Universiti Kebangsaan Malaysia.

- [15] CARRILLO GONZÁLEZ, CAMILO JOSÉ. *Fundamentos del Análisis de Fourier*. Vigo: Universidade de Vigo. 2003.
- [16] UDDIN, SOHEL., SHAREEF, HUSSAIN., MOHAMED, AZAH., HANNAN. *An Analysis of Harmonics from LED Lamps*. Bangi (Malaysia): Universiti Kebangsaan Malaysia. 2012.
- [17] ARRANZ GIMÓN, ÁNGEL EUGENIO. *Medida de armónicos en el marco de los estándares IEC para la caracterización de variadores de frecuencia*. Valladolid (España): Universidad de Valladolid. 2020
- [18] WIKIPEDIA. Transformada de Fourier discreta. "[https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_de\\_Fourier\\_discreta](https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier_discreta)".
- [19] DÉLEG, MANUEL. *Tecnología LED*. Cuenca (Ecuador): Universidad Politécnica Salesiana.
- [20] WIKIPEDIA. Lámpara incandescente. "[https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara\\_incandescente](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_incandescente)".
- [21] MORENO HERNÁNDEZ, IVÁN. *Evolución en Iluminación*. Zacatecas (México): Universidad Autónoma de Zacatecas. Julio 2012.
- [22] CUNILL, SOLÁ. *Estudio y caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas de baja potencia*. Barcelona: Universitat politècnica de Catalunya. Septiembre 2017.
- [23] WIKIPEDIA. LED. <https://es.wikipedia.org/wiki/Led>
- [24] RIVERA SIERRA, ROBERTO. *Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación LED y su comportamiento armónico*. Barcelona: Universitat de Barcelona. Junio 2014.
- [25] WIKIPEDIA. Dopaje (semiconductores). "[https://es.wikipedia.org/wiki/Dopaje\\_\(semiconductores\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Dopaje_(semiconductores))".
- [26] BLANCO CASTAÑEDA, ANA MARÍA. *Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds (light emitting diodes)*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 2010.
- [27] WIKIPEDIA. Unión PN. "[https://es.wikipedia.org/wiki/Unión\\_PN](https://es.wikipedia.org/wiki/Unión_PN)".
- [28] CASTILLO MARTÍNEZ, JAVIER. *Calidad eléctrica y análisis de perturbaciones en lámparas LED, microled y CFL*. Almería (España): Universidad de Almería. 2014.
- [29] KEENE, MICHAEL. *DC to DC Power for Driving LED-Backlit LCDs*. Wayne St: Endicott Research Group, Inc.

- [30] OCHOA ARREDONDO, ALBA TATIANA., RODRÍGUEZ CAMPIÑO, STEVEN. “Control en lazo cerrado de un convertidor cc/cc tipo buck utilizando lógica difusa mediante la implementación de arduino”. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Septiembre 2017.
- [31] TYAGI, PRETI., KOTAK., SUNDER SINGH. *Design high gain dc-dc boost converter with coupling inductor and simulation in psim*. Mumbai (India): International Journal of Research in Engineering and Technology. Abril 2014.
- [32] ALESSIO., GONZÁLEZ., CÁCERES. *Diseño y Construcción de un Convertidor Boost de Pequeña Potencia, con Propósitos Educativos y de Investigación*. Mérida (Venezuela), Cuenca (Ecuador): Universidad de los Andes, Universidad de Cuenca. Diciembre 2014.
- [33] HABIB, KASHIF., ALAM, AFTAB., KHAN SHAHBAZ. *Average Current Control Mode Boost Converter for the Tuning of Total Harmonic Distortion & Power Factor Correction using PSIM*. China: Northwestern Polytechnical University. 2014.
- [34] ARTEAGA OROZCO, MARÍA ISABEL. *Control no lineal de convertidores conmutados CC/CC: Análisis de prestaciones y verificación experimental*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Noviembre 2006.
- [35] BOLAÑOS RODRÍGUEZ, VÍCTOR ARMANDO. *Diseño y construcción de un sistema de alimentación para LEDs de potencia utilizando el convertidor CD/CD tipo Flyback*. Huajuapán de León: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Febrero 2009.
- [36] BRUSIL GUAMÁN, MAYTÉ CAROLINA. *Análisis de perturbaciones armónicas producidas por luminarias de tecnología LED en una red de alumbrado público*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Abril 2020.



## ANEXOS

### Anexo 1. Comprobación de cumplimiento de la normativa.

Fuentes de una potencia  $\leq 25W$

Fuente de alimentación	Parámetro	Tensión (V)	Corriente del fundamental
Buck simple	10 $\Omega$	230	0,03534
Buck con filtro inductivo en lado AC	10 $\Omega$	230	0,03314
Buck con filtro inductivo en lado DC	10 $\Omega$	230	0,04201
Buck con filtro LCD en lado DC	10 $\Omega$	230	0,03774
Buck con filtro Valley Fill	10 $\Omega$	230	0,04157
Buck con filtro Valley Fill mejorado	10 $\Omega$	230	0,03685
Buck simple	2kHz	230	0,1045
Buck con filtro inductivo en lado AC	2kHz	230	0,1034
Buck con filtro inductivo en lado AC	200kHz	230	0,1051
Buck con filtro Valley Fill mejorado	2kHz	230	0,1027
Buck con filtro Valley Fill mejorado	200kHz	230	0,1035
Buck con filtro inductivo en lado AC	0,0029H	230	0,1048
Buck con filtro inductivo en lado AC	29H	230	0,03194
Buck con filtro Valley Fill mejorado	0,00088H	230	0,1041
Buck con filtro Valley Fill mejorado	0,088H	230	0,1023

Potencia	Tercer armónico	Quinto armónico	% Tercer armónico
8,1282	0,034	0,031	96,21
7,6222	0,028	0,02	84,49
9,6623	0,04	0,036	95,22
8,6802	0,036	0,032	

			95,39
9,5611			60,00
8,4755	0,022	0,008	59,70
24,035	0,092	0,076	88,04
23,782	0,078	0,041	75,44
24,173	0,079	0,042	75,17
23,621	0,038	0,01	37,00
23,805	0,038	0,01	36,71
24,104	0,095	0,078	90,65
7,3462	0,00051	0,0003	1,60
23,943	0,04	0,01	38,42
23,529	0,032	0,018	31,28

<b>% Quinto armónico</b>	<b>Cumple la normativa</b>
87,72	<b>NO</b>
60,35	<b>SI</b>
85,69	<b>NO</b>
84,79	<b>NO</b>
29,10	<b>SI</b>
21,71	<b>SI</b>
72,73	<b>NO</b>
39,65	<b>SI</b>
	<b>SI</b>

39,96	
9,74	SI
9,66	SI
74,43	NO
0,94	SI
9,61	SI
17,60	SI

Potencia >25W

Fuente de alimentación	Parámetro	Tensión (V)	Corriente del fundamental
Buck simple	1000Ω	230	0,4673
Buck con filtro inductivo en lado AC	1000Ω	230	0,4745
Buck con filtro inductivo en lado DC	1000Ω	230	0,4674
Buck con filtro LCD en lado DC	1000Ω	230	0,4682
Buck con filtro Valley Fill	1000Ω	230	0,3581
Buck con filtro Valley Fill mejorado	1000Ω	230	0,3572
Buck simple	200kHz	230	0,4673
Buck con filtro inductivo en lado DC	2kHz	230	0,1178
Buck con filtro inductivo en lado DC	200kHz	230	0,1255
Buck con filtro LCD en lado DC	2kHz	230	0,1135
Buck con filtro LCD en lado DC	200kHz	230	0,1139
Buck con filtro Valley Fill	2kHz	230	0,114
Buck con filtro Valley Fill	200kHz	230	0,115
Buck con filtro inductivo en lado DC	0,00029H	230	0,3626
Buck con filtro inductivo en lado DC	0,29H	230	0,6326
Buck con filtro Valley Fill	0,00088H	230	0,1147
Buck con filtro Valley Fill	0,088H	230	0,112

Potencia	Tercer armónico	Quinto armónico
107,479	0,32	0,13
109,135	0,25	0,04
107,502	0,32	0,13
107,686	0,32	0,13
82,363		
82,156	0,14	0,03
107,479	0,33	0,13
27,094	0,105	0,085
28,865	0,106	0,083
26,105	0,098	0,074
26,197	0,1	0,075
26,22		
26,45		
83,398	0,265	0,13
145,498	0,35	0,12
26,381		
25,76		

Séptimo armónico	Noveno armónico	% Tercer armónico
0,060	0,059	68,48
0,030	0,010	52,69
0,061	0,059	68,46
0,040	0,049	68,35
		39,20
0,060	0,059	39,19
0,060	0,050	70,62
0,055	0,030	89,13
0,057	0,032	84,46
0,046	0,024	86,34
0,048	0,025	87,80

		40,00
		40,00
0,060	0,050	73,08
0,010	0,005	55,33
		41,00
		34,00

<b>% Quinto armónico</b>	<b>% Septimo armónico</b>	<b>% Noveno armónico</b>
27,82	12,84	12,63
8,43	6,32	2,11
27,81	13,05	12,62
27,77	8,54	10,47
7,50	15,00	13,00
8,40	16,80	16,52
27,82	12,84	10,70
72,16	46,69	25,47
66,14	45,42	25,50
65,20	40,53	21,15
65,85	42,14	21,95
3,20	29,00	24,00
3,90	29,00	24,00

35,85	16,55	13,79
18,97	1,58	0,79
4,00	26,00	23,00
12,00	37,00	19,00

Cumple la normativa	FP
NO	
NO	0,8397
NO	
NO	0,7963
NO	
NO	

## Anexo 2. Comparación de resultados de las simulaciones.

Buck simple		
Carga (ohms)	Magnitud Fundamental	THD
10	0,03534	178,52
100	0,1069	133,75
500	0,5089	78,98
1000	0,4673	76,93

**Buck con filtro inductivo en lado AC**

Carga (ohms)	Magnitud Fundamental	THD
10	0,03314	110,97
100	0,1041	86,63
500	0,4305	77,98
1000	0,4745	53,77

**Buck con filtro inductivo en lado DC**

Carga (ohms)	Magnitud Fundamental	THD
10	0,04201	171,11
100	0,1239	127,39
500	0,5039	78,08
1000	0,4674	76,92

**Buck con filtro LCD en lado DC**

Carga (ohms)	Magnitud Fundamental	THD
10	0,03774	177,45
100	0,1137	127,64
500	0,498	69,18
1000	0,4682	76,51

**Buck con filtro Valley Fill**

Carga (ohms)	Magnitud Fundamental	THD
10	0,04157	79,05
100	0,1144	57,31
500	0,3762	39,3
1000	0,3581	46,91

**Buck con filtro Valley Fill mejorado**

Carga (ohms)	Magnitud Fundamental	THD
10	0,03685	79,9
100	0,103	64,7
500	0,3681	46,6
1000	0,3572	46,66

**Buck simple**

Frecuencia (kHz)	Magnitud Fundamental	THD
2	0,1045	134,71
10	0,11	132,52
100	0,1069	133,65
200	0,1076	133,35

Buck con filtro inductivo en lado DC

Frecuencia (kHz)	Magnitud Fundamental	THD
2	0,1178	129,72
10	0,1193	129,24
100	0,1239	127,39
200	0,1255	127,07

Buck con filtro Valley Fill

Frecuencia (kHz)	Magnitud Fundamental	THD
2	0,114	57,21
10	0,114	57,2
100	0,1144	57,31
200	0,115	57,45

Buck con filtro inductivo en lado AC

Frecuencia (kHz)	Magnitud Fundamental	THD
2	0,1034	86,59
10	0,1035	86,58
100	0,1041	86,36
200	0,1051	86,38

Buck con filtro LCD en lado DC

Frecuencia (kHz)	Magnitud Fundamental	THD
2	0,1135	126,12
10	0,1135	126,24
100	0,1137	127,64
200	0,1139	128,82

Buck con filtro Valley Fill mejorado

Frecuencia (kHz)	Magnitud Fundamental	THD
2	0,1027	64,61
10	0,1027	64,59
100	0,103	64,7
200	0,1035	64,93

Buck con filtro inductivo en lado AC

Inductancia (H)	Magnitud Fundamental	THD
0,0029	0,1048	138,32
0,29	0,1041	86,36
29	0,03194	22,41

Buck con filtro Valley Fill			
Inductancia (H)	Magnitud Fundamental	THD	
0,00088		0,1147	56,35
0,0088		0,1144	57,31
0,088		0,112	58,07

Buck con filtro inductivo en lado DC			
Inductancia (H)	Magnitud Fundamental	THD	
0,00029		0,1239	127,39
0,0029		0,3626	86,33
0,029		0,5574	68,48
0,29		0,6326	63,03

Buck con filtro Valley Fill mejorado			
Inductancia (H)	Magnitud Fundamental	THD	
0,00088		0,1041	63,24
0,0088		0,103	64,7
0,088		0,1041	63,24