

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES



**CALIDAD ELÉCTRICA Y ANÁLISIS DE PERTURBACIONES EN
LÁMPARAS LED, MICROLED Y CFL.**

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Javier Castillo Martínez

Director

Francisco Gil Montoya

Septiembre 2014

Índice general

Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	xiii
Agradecimientos.....	xvii
Capítulo 1. Interés y objetivos.	1
1.1. Motivación y objetivos del proyecto.....	1
1.2. Estructura del documento.	3
Capítulo 2. Revisión bibliográfica.....	5
2.1. Historia de la iluminación eléctrica.	5
2.2. Normativa Europea.	9
2.3. Parámetros de interés eléctrico y lumínico.	13
2.3.1. Parámetros y elementos de interés eléctrico en corriente continua.	13
2.3.2. Parámetros y elementos de interés eléctrico en circuitos en régimen estacionario sinusoidal.....	16
2.3.3. Parámetros y elementos de interés eléctrico en circuitos en régimen estacionario no sinusoidal.....	27
2.3.4. Parámetros de interés lumínico.....	32
2.4. Tipos de lámparas.	35
2.4.1. Bombillas incandescentes.....	38
2.4.2. Lámparas fluorescentes compactas (CFL).	39
2.4.3. Lámparas LED.....	41
Capítulo 3. Material y métodos.	43
3.1. Fuente AGILENT 6812B.....	43
3.2. Lámparas utilizadas para el ensayo.....	47
3.3. Series y transformada de Fourier.....	51

3.3.1.	Introducción.....	51
3.3.2.	Series de Fourier.	52
3.3.3.	Forma compleja de la serie de Fourier.....	54
3.3.4.	Transformada de Fourier.....	56
3.3.5.	Transformada discreta de Fourier.....	57
3.3.6.	Transformada rápida de Fourier.	58
3.3.7.	Función de Gauss.	62
Capítulo 4. Ensayos y resultados.....		63
4.1.	Condiciones normales de alimentación.	63
4.1.1.	Lámpara 1.	64
4.1.2.	Lámpara 2.	65
4.1.3.	Lámpara 3.	66
4.1.4.	Lámpara 4.	67
4.1.5.	Lámpara 5.	68
4.1.6.	Lámpara 6.	69
4.1.7.	Lámpara 7.	70
4.1.8.	Lámpara 8.	71
4.1.9.	Lámpara 9.	72
4.1.10.	Lámpara 10.....	73
4.1.11.	Lámpara11.....	74
4.1.12.	Lámpara 12.....	75
4.1.13.	Lámpara 13.....	76
4.1.14.	Lámpara 14.....	77
4.1.15.	Lámpara 15.....	78
4.1.16.	Lámpara 16.....	79
4.2.	Combinaciones de diferentes grupos de lámparas.....	81

4.2.1.	Lámparas LED.....	83
4.2.2.	Lámparas microled.....	84
4.2.3.	Lámparas CFL sin balasto electrónico.....	85
4.2.4.	Lámparas CFL con balasto electrónico.....	86
4.2.5.	Lámparas LED y microled.....	87
4.2.6.	Lámparas LED y CFL sin balasto electrónico.....	88
4.2.7.	Lámparas LED y CFL con balasto electrónico.....	89
4.2.8.	Lámparas microled y CFL sin balasto electrónico.....	90
4.2.9.	Lámparas microled y CFL con balasto electrónico.....	91
4.2.10.	Lámparas CFL con y sin balasto electrónico.....	92
4.2.11.	Lámparas LED, microled y CFL sin balasto electrónico.....	93
4.2.12.	Lámparas LED, microled y CFL con balasto electrónico.....	94
4.2.13.	Lámparas LED y CFL con y sin balasto electrónico.....	95
4.2.14.	Lámparas microled, y CFL con y sin balasto electrónico.....	96
4.2.15.	Todas las tecnologías de lámparas.....	97
4.3.	El contador digital.....	99
4.3.1.	Plan de sustitución de equipos de medida.....	99
4.3.2.	El contador tradicional de potencia activa.....	100
4.3.3.	El contador digital.....	102
4.3.4.	Ensayo del contador.....	104
4.4.	Transitorios en la tensión de alimentación.....	107
4.4.1.	Sobretensiones y bajadas de tensión.....	108
4.4.2.	Microcortes.....	117
4.5.	Alimentación con tensión distorsionada.....	135
4.5.1.	Lámpara número 1 (LED).....	137
4.5.2.	Lámpara número 4 (microled).....	140

4.5.3.	Lámpara número 10 (CFL con balasto).....	143
4.5.4.	Lámpara número 11 (CFL sin balasto).....	146
4.5.5.	Contador.....	149
Capítulo 5. Discusión y conclusiones.		151
5.1.	Diferentes tecnologías de lámparas. Semejanzas, diferencias y conclusiones.	151
5.1.1.	Características de las diferentes tecnologías de iluminación.....	152
5.1.2.	Sejemanzas y diferencias.....	153
5.2.	Combinación de lámparas. Conclusiones y cumplimiento del Teorema de Boucherot.....	155
5.2.1.	LED.....	156
5.2.2.	Microled.....	156
5.2.3.	CFL sin balasto.....	157
5.2.4.	CFL con balasto.	157
5.2.5.	LED y microled.....	158
5.2.6.	LED y CFL sin balasto.	158
5.2.7.	LED y CFL con balasto.	158
5.2.8.	Microled y CFL sin balasto.	158
5.2.9.	Microled y CFL con balasto.	159
5.2.10.	CFL con y sin balasto.	159
5.2.11.	LED, microled y CFL sin balasto.	159
5.2.12.	LED, microled y CFL con balasto.	159
5.2.13.	LED y CFL con y sin balasto.....	159
5.2.14.	Microled y CFL con y sin balasto.....	160
5.2.15.	Todas las tecnologías de lámparas.	160
5.3.	Sobretensiones, bajadas de tensión y microcortes. Conclusiones del ensayo.	161
5.4.1.	Análisis del efecto de sobretensiones y bajadas de tensión.	161

5.4.2. Análisis de del efecto de microcortes.	164
5.4. Armónicos en tensión. Conclusiones del ensayo.	167
5.5.1. Armónicos en tensión.	168
5.5.2. Ensayo del contador con armónicos en tensión.	171
5.5. Resumen general de conclusiones.	173
Capítulo 6. Bibliografía.	177

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de bombilla incandescente. Fuente: http://jorgeatk.blogspot.com.es	6
Figura 2: luminaria compacta fluorescente. Fuente: www.lamparasmino.com	7
Figura 3: evolución de la retirada gradual de bombillas poco eficientes. Fuente: ec.europa.eu	10
Figura 4: Ahorro energético de bombillas de bajo consumo. Fuente: ec.europa.eu	11
Figura 5: Representación gráfica de una onda de tensión sinusoidal. Fuente: Circuitos eléctricos (Jesús Fraile Mora).....	18
Figura 6: Bobina. Fuente: Circuitos eléctricos (Jesús Fraile Mora)	19
Figura 7: condensador de placas paralelas. Fuente: Circuitos eléctricos (Jesús Fraile Mora) .	20
Figura 8: Ondas de tensión e intensidad en fase debido a una carga puramente resistiva. ...	21
Figura 9: Ondas de tensión e intensidad de una carga puramente inductiva.	22
Figura 10: Ondas de tensión e intensidad de una carga puramente capacitiva.....	23
Figura 11: Triángulo de potencias.	24
Figura 12: Comparación de régimen estacionario sinusoidal con no sinusoidal.	27
Figura 13:Ángulo sólido de valor un estereorradián. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores(Enrique Marrufo González)	33
Figura 14: Longitudes de ondas electromagnéticas. Fuente: http://iesmjuncalero.juntaextremadura.net/	35
Figura 15: Curva espectral de eficiencia luminosa para la visión fotópica. Fuente: http://www.gusgsm.com/	36
Figura 16: Comparativa de la eficiencia luminosa de noche y de día. Fuente: http://www.veoveoqueves.com/	37
Figura 17: Efecto de luminiscencia. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González).....	39
Figura 18: Luminiscencia en lámpara de descarga. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González).....	40
Figura 19: Luminiscencia en lámpara fluorescente. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González).....	40
Figura 20: Diodo emisor de luz (LED). Fuente: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/	41

Figura 21: Fuente Agilent 6812B.	43
Figura 22: Modos de programación del equipo. Fuente: Guía de programación Agilent para las series 6800.	46
Figura 23: Lámparas utilizadas para el proyecto.	47
Figura 24: Contador digital utilizado en el proyecto.	48
Figura 25: Espectro de amplitud.	55
Figura 26: Resultado de la transformada rápida de Matlab.	59
Figura 27: Espectro de amplitud de la transformada rápida de Matlab.	60
Figura 28: Detalle de la zona central de la figura 27.	60
Figura 29: Simetría de la transformada de Fourier.	62
Figura 30: Gráfico de la lámpara 1.	64
Figura 31: Gráfico de la lámpara 2.	65
Figura 32: Gráfico de la lámpara 3.	66
Figura 33: Gráfico de la lámpara 4.	67
Figura 34: Gráfico de la lámpara 5.	68
Figura 35: Gráfico de la lámpara 6.	69
Figura 36: Gráfico de la lámpara 7.	70
Figura 37: Gráfico de la lámpara 8.	71
Figura 38: Gráfico de la lámpara 9.	72
Figura 39: Gráfico de la lámpara 10.	73
Figura 40: Gráfico de la lámpara 11.	74
Figura 41: Gráfico de la lámpara 12.	75
Figura 42: Gráfico de la lámpara 13.	76
Figura 43: Gráfico de la lámpara 14.	77
Figura 44: Gráfico de la lámpara 15.	78
Figura 45: Gráfico de la lámpara 16.	79
Figura 46: Gráfico de lámparas LED.	83
Figura 47: Gráfico de lámparas microled.	84
Figura 48: Gráfico de lámparas CFL sin balasto electrónico.	85
Figura 49: Gráfico de lámparas CFL con balasto electrónico.	86
Figura 50: Gráfico de lámparas LED y microled.	87
Figura 51: Gráfico de lámparas LED y CFL sin balasto electrónico.	88
Figura 52: Gráfico de lámparas LED y CFL con balasto electrónico.	89

Figura 53: Gráfico de lámparas microled y CFL sin balasto electrónico.....	90
Figura 54: Gráfico de lámparas microled y CFL con balasto electrónico.	91
Figura 55: Gráfico de lámparas CFL con y sin balasto electrónico.	92
Figura 56: Gráfico de lámparas LED, microled y CFL sin balasto electrónico.	93
Figura 57: Gráfico de lámparas LED, microled y CFL con balasto electrónico.....	94
Figura 58: Gráfico de lámparas LED y CFL con y sin balasto electrónico.	95
Figura 59: Gráfico de lámparas microled y CFL con y sin balasto electrónico.....	96
Figura 60: Gráfico de todas las tecnologías de lámparas.	97
Figura 61: Contador analógico de electricidad (energía activa). Fuente: http://educativa.catedu.es/	100
Figura 62: Esquema interno de un contador de inducción (energía activa). Fuente: http://educativa.catedu.es/	101
Figura 63: Gráfico de la forma de onda y armónicos con los que trabaja el contador.	105
Figura 64: Sobretensión en una lámpara LED.....	109
Figura 65: Bajada de tensión en una lámpara LED.....	110
Figura 66: Sobretensión en una lámpara microled.	111
Figura 67: Bajada de tensión en una lámpara microled.....	112
Figura 68: Sobretensión en una lámpara CFL con balasto electrónico.	113
Figura 69: Bajada de tensión en una lámpara CFL con balasto electrónico.....	114
Figura 70: Sobretensión en una lámpara CFL sin balasto electrónico.	115
Figura 71: Bajada de tensión en una lámpara CFL sin balasto electrónico.	116
Figura 72: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=0$ grados.	118
Figura 73: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=15$ grados.	119
Figura 74: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=30$ grados.	119
Figura 75: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=45$ grados.	120
Figura 76: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=60$ grados.	120
Figura 77: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=75$ grados.	121
Figura 78: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=90$ grados.	121
Figura 79: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=0$ grados.	122
Figura 80: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=15$ grados.	123
Figura 81: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=30$ grados.	123
Figura 82: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=45$ grados.	124
Figura 83: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=60$ grados.	124

Figura 84: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=75$ grados.	125
Figura 85: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=90$ grados.	125
Figura 86: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=0$ grados.	126
Figura 87: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=15$ grados.	127
Figura 88: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=30$ grados.	127
Figura 89: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=45$ grados.	128
Figura 90: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=60$ grados.	128
Figura 91: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=75$ grados.	129
Figura 92: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=90$ grados.	129
Figura 93: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=0$ grados.	130
Figura 94: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=15$ grados.	131
Figura 95: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=30$ grados.	131
Figura 96: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=45$ grados.	132
Figura 97: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=60$ grados.	132
Figura 98: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=75$ grados.	133
Figura 99: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=90$ grados.	133
Figura 100: Gráfico de lámpara 1 bajo combinación 1.	137
Figura 101: Gráfico de lámpara 1 bajo combinación 2.	138
Figura 102: Gráfico de lámpara 1 bajo combinación 3.	139

Figura 103: Gráfico de lámpara 4 bajo combinación 1.	140
Figura 104: Gráfico de lámpara 4 bajo combinación 2.	141
Figura 105: Gráfico de lámpara 4 bajo combinación 3.	142
Figura 106: Gráfico de lámpara 10 bajo combinación 1.....	143
Figura 107: Gráfico de lámpara 10 bajo combinación 2.....	144
Figura 108: Gráfico de lámpara 10 bajo combinación 3.....	145
Figura 109: Gráfico de lámpara 11 bajo combinación 1.....	146
Figura 110: Gráfico de lámpara 11 bajo combinación 2.....	147
Figura 111: Gráfico de lámpara 11 bajo combinación 3.....	148
Figura 112: Gráfico del ensayo del contador en presencia de armónicos.	149

Índice de tablas.

Tabla 1: Parámetros de interés de las lámparas utilizadas.	49
Tabla 2: Parámetros eléctricos de la lámpara 1.	64
Tabla 3: Parámetros eléctricos para lámpara 2.	65
Tabla 4: Parámetros eléctricos para lámpara 3.	66
Tabla 5: Parámetros eléctricos para lámpara 4.	67
Tabla 6: Parámetros eléctricos para lámpara 5.	68
Tabla 7: Parámetros eléctricos para lámpara 6.	69
Tabla 8: Parámetros eléctricos para lámpara 7.	70
Tabla 9: Parámetros eléctricos para lámpara 8.	71
Tabla 10: Parámetros eléctricos para lámpara 9.	72
Tabla 11: Parámetros eléctricos para lámpara 10.	73
Tabla 12: Parámetros eléctricos para lámpara 11.	74
Tabla 13: Parámetros eléctricos para lámpara 12.	75
Tabla 14: Parámetros eléctricos para lámpara 13.	76
Tabla 15: Parámetros eléctricos para lámpara 14.	77
Tabla 16: Parámetros eléctricos para lámpara 15.	78
Tabla 17: Parámetros eléctricos para lámpara 16.	79
Tabla 18: Parámetros eléctricos de lámparas LED.	83
Tabla 19: Parámetros eléctricos de lámparas microled.	84
Tabla 20: Parámetros eléctricos de lámparas CFL sin balasto electrónico.	85
Tabla 21: Parámetros eléctricos de lámparas CFL con balasto electrónico.	86
Tabla 22: Parámetros eléctricos de lámparas LED y microled.	87
Tabla 23: Parámetros eléctricos de lámparas LED y CFL sin balasto electrónico.	88
Tabla 24: Parámetros eléctricos de lámparas LED y CFL con balasto electrónico.	89
Tabla 25: Parámetros eléctricos de lámparas microled y CFL sin balasto electrónico.	90
Tabla 26: Parámetros eléctricos de lámparas microled y CFL con balasto electrónico.	91
Tabla 27: Parámetros eléctricos de lámparas CFL con y sin balasto electrónico.	92
Tabla 28: Parámetros eléctricos de lámparas LED, microled y CFL sin balasto electrónico. ...	93
Tabla 29: Parámetros eléctricos de lámparas LED, microled y CFL con balasto electrónico. ..	94

Tabla 30: Parámetros eléctricos de lámparas LED y CFL con y sin balasto electrónico.	95
Tabla 31: Parámetros eléctricos de lámparas microled y CFL con y sin balasto electrónico. ...	96
Tabla 32: Parámetros eléctricos de todas las tecnologías de lámparas.....	97
Tabla 33: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara LED.....	109
Tabla 34: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara microled.....	111
Tabla 35: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara CFL con balasto electrónico.	113
Tabla 36: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara CFL sin balasto electrónico.	115
Tabla 37: Parámetros eléctricos para lámpara 1 bajo la combinación 1.	137
Tabla 38: Parámetros eléctricos para lámpara 1 bajo la combinación 2.	138
Tabla 39: Parámetros eléctricos para lámpara 1 bajo la combinación 3.	139
Tabla 40: Parámetros eléctricos para lámpara 4 bajo la combinación 1.	140
Tabla 41: Parámetros eléctricos para lámpara 4 bajo la combinación 2.	141
Tabla 42: Parámetros eléctricos para lámpara 4 bajo la combinación 3.	142
Tabla 43: Parámetros eléctricos para lámpara 10 bajo la combinación 1.	143
Tabla 44: Parámetros eléctricos para lámpara 10 bajo la combinación 2.	144
Tabla 45: Parámetros eléctricos para lámpara 10 bajo la combinación 3.	145
Tabla 46: Parámetros eléctricos para lámpara 11 bajo la combinación 1.	146
Tabla 47: Parámetros eléctricos para lámpara 11 bajo la combinación 2.	147
Tabla 48: Parámetros eléctricos para lámpara 11 bajo la combinación 3.	148
Tabla 49: Tabla resumen de diferencias entre lámparas de diferentes tecnologías.	153
Tabla 50: Comprobación del Teorema de Boucherot para lámparas LED.	156
Tabla 51: Comprobación del teorema de Boucherot para lámparas microled.	156
Tabla 52: Comprobación del teorema de Boucherot para lámparas CFL sin balasto electrónico.	157
Tabla 53: Comprobación del teorema de Boucherot para lámparas CFL con balasto electrónico.	157
Tabla 54: Comprobación del teorema de Boucherot para todas las tecnologías de lámparas.	160
Tabla 55: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas LED.	168
Tabla 56: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas microled.	169

Tabla 57: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas CFL con balasto.	169
Tabla 58: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas CFL sin balasto.	170
Tabla 59: Tabla resumen del grado de distorsión de las distintas lámparas.....	174

Agradezco a mi familia y amigos el tiempo robado y la paciencia que han tenido acompañándome estos últimos cuatro años de mi vida. Agradezco también a Antonio Espín de la Universidad de Granada el haber prestado todas las lámparas que han sido utilizadas en este proyecto, pues sin su ayuda habría sido imposible su realización. Y como no, nombrar a Francisco Gil, quien ha sido mi tutor del proyecto y se ha implicado durante este último curso en los diferentes imprevistos surgidos para que todo esto haya sido posible.

Capítulo 1. Interés y objetivos.

En este capítulo se pretende dar a conocer por qué surge la idea de este proyecto, así como también sus objetivos y estructura.

1.1. Motivación y objetivos del proyecto.

En los últimos años han sido muchos y en diversos campos los avances de la ciencia y la tecnología hasta el punto de que la vida en España de hace 50 o 60 años no tenía nada que ver con la actual y raramente se disponía de una red pública de suministro de agua (mucho menos de electricidad) y solían existir aljibes, algo que hoy en día podemos decir que han desaparecido. No obstante, ha sido sobre todo en los últimos diez años cuando la tecnología ha llamado a las puertas de todos y es raro ver una casa donde no haya un ordenador y conexión a internet. Pues bien, si nos fijamos ahora en los dos últimos años podríamos ver lo que me atrevería a llamar *“la revolución de las LED”*, pues esos diodos, que desconocíamos la gran mayoría de la gente que lo eran, a pesar de que los cuales acompañaban a diversos dispositivos electrónicos para mostrar si estaban encendidos o apagados, o simplemente para ver si estaban o no conectados a la red, han pasado a formar parte de la iluminación de muchos hogares y edificios, por no hablar de los coches pues hoy en día cualquier coche de gama media-baja que se precie tienes luces diurnas que consisten en luces LED. Además, no sólo es esa la única tecnología de iluminación utilizada actualmente y de carácter no lineal, sino que también existen otros como las microled, más nuevas aún y las compactas fluorescentes tanto convencionales como con balasto electrónico (forma de onda y consumo mejorados), las cuales llevan unos años más en nuestras vidas.

Así pues, es claro que las instalaciones eléctricas de hace unos 20 años que soportaban iluminación con bombillas convencionales (puramente resistivas), y otras cargas como el motor de una lavadora (carga inductiva) han pasado a alimentar cargas eléctricas de las cuáles pocas o ninguna son lineales, lo cual hace que aparezcan armónicos de corriente y una componente de la potencia llamada potencia de distorsión (aparte de las convencionales activa y reactiva de las que se compone la potencia aparente de circuitos en régimen estacionario sinusoidal), armónicos que tienen efectos sobre las instalaciones

eléctricas, tales como sobrecalentamientos de los conductores, que se disparen magnetotérmicos, etc.

Como consecuencia de todo lo anterior, son ya muchos los frentes de investigación abiertos al respecto, los cuales estudian los efectos sobre las instalaciones eléctricas (sobrecalentamiento de conductores y disparo de magnetotérmicos entre otros), influencia en la medida de contadores (se ha llegado a registrar en estudios hasta de un 7% de diferencia entre la lectura del contador y su consumo real), etc [1].

Dicho todo lo anterior, en este proyecto se pretende:

- a) Estudiar el comportamiento desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica de los diferentes tipos de lámparas de bajo consumo, bajo condiciones de normales de suministro (onda sinusoidal de 230V de valor eficaz y 50Hz).
- b) Estudiar el comportamiento de diferentes combinaciones de las lámparas mencionadas en el apartado anterior y ver cuál resulta la más beneficiosa. Análisis de potencia y comprobación del Teorema de Boucherot.
- c) Comprobar los errores de medida cometidos por contadores digitales y en qué circunstancias.
- d) Estudiar el comportamiento de este tipo de lámparas en condiciones de funcionamiento anormales tales como sobretensiones, bajadas de tensión y microcortes.
- e) Estudiar todo lo mencionado anteriormente con una tensión de alimentación distorsionada (armónicos en la tensión de alimentación).

1.2. Estructura del documento.

En cuanto a la estructura del proyecto, y a fin de llevar a cabo lo descrito en el párrafo anterior, el texto de este proyecto, tal y como se puede apreciar en el índice general, constará del siguiente esquema:

- En este primer capítulo “Interés y objetivos”, tal y como ya habrá podido observar el lector, simplemente se habla de por qué surgió la idea de este proyecto y de cuáles son sus objetivos, ya tratados ambos temas en el apartado anterior, y por otra parte, se habla aquí de la estructura del documento.
- En el segundo capítulo “Revisión Bibliográfica”, se dará en primer lugar un breve repaso a la historia de la iluminación eléctrica, desde sus inicios. Después, se hablará de la normativa europea que obliga a que se estén imponiendo las diferentes lámparas de bajo consumo y que estén desapareciendo las convencionales. Más tarde, se repasarán todos los parámetros de interés eléctrico y de iluminación, tratando con especial interés la diferencia entre el $\cos(\varphi)$ y el factor de potencia. Y por último, se terminará con una clasificación de los grandes tipos de lámparas y explicación de su principio físico de funcionamiento.
- En el tercer capítulo “Material y métodos”, se describirá en primer lugar el equipo de trabajo disponible en el laboratorio, para después explicar con detalle los procedimientos matemáticos que utilizaremos (series de Fourier).
- En el cuarto capítulo “Ensayos y Resultados”, será dónde se explique con detalle en qué consistirá cada uno de los ensayos realizados, y se presentarán los datos obtenidos de la forma más conveniente para su posterior análisis en el capítulo 5.
- En el quinto capítulo “Discusión y Conclusiones”, se analizarán los datos obtenidos y se extraerán cuantas conclusiones sean posibles y de interés. Tendrá especial interés el último apartado de este capítulo, que se llamará Resumen General de Conclusiones y expondrá los resultados finales de forma general, clara y útil.
- Y en el sexto y último capítulo “Bibliografía”, sobra decir que se presentará toda la bibliografía utilizada.

Capítulo 2. Revisión bibliográfica.

En este capítulo, en primer lugar haremos un repaso de la historia de la iluminación eléctrica desde sus inicios. Después, hablaremos de la normativa europea que obliga a que se esté imponiendo una iluminación de bajo consumo frente a la convencional, para después describir todos los parámetros de interés eléctrico que sean de interés en circuitos con corriente alterna en régimen estacionario no sinusoidal. Por último, hablaremos de los diferentes tipos de lámparas existentes en la actualidad, así como también de su principio físico de funcionamiento.

2.1. Historia de la iluminación eléctrica.

Fue ya en el año 1786 cuando los diversos experimentos realizados por el médico y catedrático Luigi Galvani en Bolonia, abrieron un panorama esperanzador en las aplicaciones de la electricidad dinámica. Más tarde, en el año 1796, Alessandro Volta creó la pila generadora de electricidad, proporcionando así un nuevo avance de la ciencia [2]. Pero no fue hasta 1813 cuando el inglés Humphry Davy, químico de profesión, dio los primeros pasos hacia la iluminación incandescente cuando hizo pasar corriente eléctrica entre dos electrodos formados por varillas de carbón de leña y unidos a dos polos de una enorme pila electroquímica ante los atónitos miembros de la “Royal Institution of London”, aunque desgraciadamente este “arco voltaico” no se pudo utilizar para usos prácticos debido a que los carbones no producían una luz estable [3].

Y es que no fue hasta 1840, gracias a la invención de un nuevo tipo de pila por parte de Daniell y Bunsen, cuando el problema de la iluminación eléctrica pudo ser resuelto debido a que dicho nuevo tipo de pila suministraba una corriente más intensa y duradera, que junto con la aportación del francés Foucault, quien sustituyó el carbón de leña por el que se forma en las retortas durante la producción de gas de alumbrado, y llegó a preparar dos aparatos de iluminación que permitieron a una cuadrilla de obreros trabajar durante toda la noche en la construcción del Palacio de la Industria de París en 1855 [4].

Durante el siglo XIX se mantuvo la iluminación a gas, pero el mundo ya estaba preparado para el aprovechamiento de la energía eléctrica en este campo. Así pues, un grupo de financieros e industriales norteamericanos encargó a Edison -inventor del fonógrafo- que hiciera el milagro, volver incandescente un filamento de carbón en una ampolla de vidrio en la que se haría previamente el vacío perfecto. Este inició sus experimentos en el año 1870, donde trabajaron más de 40 personas durante 12 años. Tuvo más de 1000 intentos fallidos, y en 1879 las bombillas que lograba fabricar junto con su equipo no duraban más de 14 horas. Pero en el año 1881, consiguió una luz constante durante centenares de horas mediante filamentos carbonizados de fibras de bambú del Japón. Y de aquí en adelante, el problema fue solamente perfeccionar el sistema de instalaciones eléctricas existente en la época [5].

A partir de 1890, los filamentos carbonizados de fibras de bambú del Japón fueron sustituidos por hilos de metal, con una temperatura de fusión mucho más alta. Fueron sucesivamente experimentados el osmio, el tantalio y el tungsteno (1906), considerado este último el mejor de todos ya que además de ser resistente -alto punto de fusión- era un óptimo conductor de la electricidad [6].

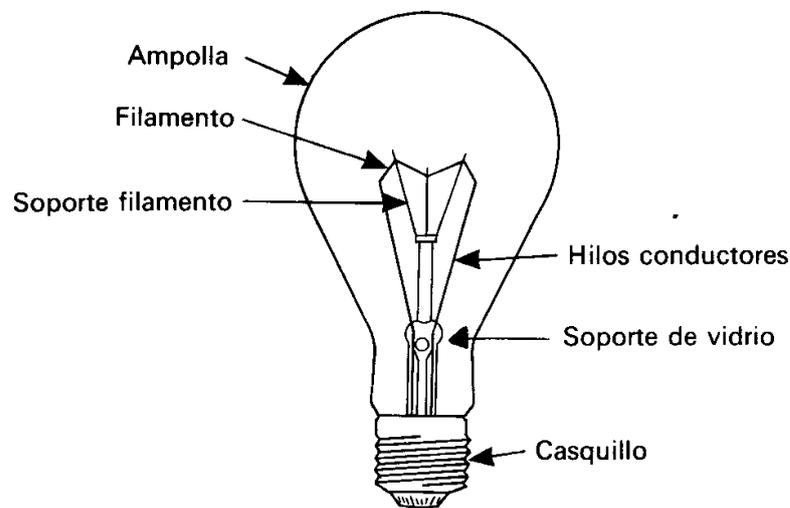


Figura 1: Esquema de bombilla incandescente. Fuente: <http://jorgeatk.blogspot.com.es>

Y podemos decir que el último gran paso adelante fue dado en 1913, cuando se tuvo la idea de rellenar las ampollas con algún gas inerte -Argón- en lugar de hacer el vacío. Se muestra en la figura 1 el esquema de una bombilla incandescente.

Los LED -Light Emitting Diode- o diodo emisor de luz, como su propio nombre indica, no son más que componentes optoelectrónicos pasivos -diodos- que emiten luz -radiación electromagnética visible- al ser atravesados por la corriente eléctrica.

El primer LED fue desarrollado por Oleg Vladimírovich Lósev en 1927. Aunque no fue hasta los años sesenta cuando se comenzaron a producir industrialmente, pudiendo ser rojos, verdes o amarillos, aunque su utilización se limitaba a mandos a distancia o electrodomésticos como indicadores de encendido y apagado. Ya en los años noventa, se inventaron los LEDs ultravioletas y azules, que dieron lugar a los LEDs blancos y posteriormente a los LEDs RGB, capaces de representar cualquier color debido a la combinación apropiada de los tres colores básicos R (rojo), G (verde) y B (azul). Destacamos aquí en especial el espectacular crecimiento en el uso de los LEDs blancos como sustitución de las bombillas tradicionales en los últimos años, lo cual es objetivo de estudio de este trabajo [7].

Otro tipo de lámparas que también son muy utilizados en la actualidad, son las compactas fluorescentes. Su funcionamiento es análogo al de los tubos fluorescentes sólo que éstas son mucho más pequeñas. Se muestra una en la figura 2, donde se puede apreciar que el tubo es largo y enrollado, pues bien, eso se debe al hecho de que la luminosidad emitida por un fluorescente depende de la superficie emisora, y por tanto se enrolla varias veces para que el tubo pueda tener bastante longitud con objeto de emitir la mayor luminosidad posible gracias a su mayor superficie emisora [8].



Figura 2: luminaria compacta fluorescente. Fuente: www.lamparasmimo.com

2.2. Normativa Europea.

Desde 1998, en la Unión Europea es obligatorio el etiquetado energético de las bombillas debido a la Directiva 98/11/CE , la cual obliga además a indicar su rendimiento energético según la escala europea de clases energéticas, que abarca desde la clase A hasta la G. En dicha escala, las bombillas fluorescentes compactas pertenecen a la clase A y las bombillas incandescentes mejoradas a las clases B o C [9].

Aunque no es hasta los últimos tiempos cuando la Unión Europea ha apostado fuertemente por un comportamiento ecológico de los productos de alumbrado, apuesta la cual es regulada por la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de Octubre de 2009 por la que se instauran diversos requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía. Dicha directiva regula tanto los requisitos de diseño ecológico aplicables a las lámparas de bajo consumo, así como también los aplicables a los productos de alumbrado utilizados en el sector terciario [10].

No obstante, anterior a dicha Directiva es el Reglamento (CE) nº 244/2009 de 18 de Marzo de 2009 por el que se aplica la directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico para lámparas de uso doméstico no direccionales, el cual prohíbe las bombillas incandescentes (progresivamente) [11]. Dicho reglamento es modificado por el Reglamento (CE) nº 859/2009 en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico sobre radiación ultravioleta de las lámparas de uso doméstico no direccionales [12]. Por último, decir queda que la Directiva 2005/32/CE también reguló los requisitos de diseño ecológico de lámparas fluorescentes sin balastos integrados, lámparas de descarga de alta intensidad, y balastos y luminarias que puedan funcionar con dichas lámparas, derogando así la directiva 2000/55/CE [13].

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, el 1 de Septiembre de 2009 comenzó la retirada progresiva del mercado de las bombillas incandescentes, y además, también se retiraron las bombillas no transparentes (mate) que no eran de clase A. Se muestra en la figura 3 un gráfico donde se puede apreciar cómo se han retirado gradualmente del mercado las bombillas ineficientes, siendo éstas sustituidas por otras más eficientes como las compactas fluorescentes, LED y bombillas incandescentes mejoradas.



Figura 3: evolución de la retirada gradual de bombillas poco eficientes. Fuente: ec.europa.eu

Mostramos a continuación un nuevo gráfico (figura 4) donde se muestra hasta qué punto ahorran energía los distintos tipos de bombillas. Y si bien es cierto que son más caras todo este tipo de bombillas, también su consumo es mucho menor (mayor rendimiento) y duran hasta diez veces más. Recordemos que por la directiva europea 98/11/CE los fabricantes están obligados a indicar la duración de la bombilla en horas, cuántas veces pueden éstas encenderse y apagarse, su temperatura de color, el tiempo de calentamiento (máxima eficiencia) y si es regulable o no. En dicho gráfico, la primera columna pertenece a las bombillas incandescentes convencionales, las columnas segunda y tercera a las incandescentes mejoradas clases C y B respectivamente, la cuarta columna a las fluorescentes compactas y la quinta y última columna a las bombillas tipo LED.

Con esta sustitución de bombillas poco eficientes por otras más eficientes, un hogar medio puede llegar a ahorrar hasta un 15% en el recibo de la luz, gracias a su menor consumo energético. Y es que se prevé que a partir de 2020 estas bombillas nos ahorrarán al año más de 40000 millones de kilovatios hora, lo cual equivale al consumo de electricidad de 11 millones de hogares europeos durante el mismo periodo. Y como consecuencia de lo anterior, dejaremos de emitir hasta 15 millones de toneladas de CO₂ al año [14].



Figura 4: Ahorro energético de bombillas de bajo consumo. Fuente: ec.europa.eu

2.3. Parámetros de interés eléctrico y lumínico.

En este apartado, expondremos todos los parámetros tanto eléctricos como lumínicos de interés para el objeto del proyecto.

2.3.1. Parámetros y elementos de interés eléctrico en corriente continua.

Un circuito o red eléctrica es un conjunto de elementos combinados entre sí de tal forma que existe la posibilidad de que se origine una corriente eléctrica a través de él. En ellos distinguimos dos tipos de elementos: los elementos activos, que son las fuentes o generadores que suministran la energía eléctrica, y por otra parte los elementos pasivos, que son los que disipan o almacenan este tipo de energía. Por supuesto, también existen los conectores encargados de unir los diferentes elementos que forman el circuito.

Así pues, y aplicado a este TFG, tenemos un único elemento activo que es la red eléctrica (fuente generadora de tensión) y uno o varios elementos pasivos que serán las diferentes lámparas que forman parte del circuito y que transformarán la energía eléctrica suministrada por la fuente en energía lumínica.

Pasemos ahora a mencionar y explicar los diferentes parámetros de interés eléctrico y de los cuáles se hablará en otros capítulos del proyecto.

- **Intensidad de corriente eléctrica:** es la *variación de carga por unidad de tiempo en una sección de material conductor (Ecuación 1)* y se representa por i o I según dependa o no del tiempo respectivamente. La unidad de corriente eléctrica en el sistema internacional (SI de aquí en adelante) es el Amperio. En baterías eléctricas y medios electrolíticos, que son la única fuente directa de corriente continua, la corriente eléctrica se considera por convenio que es el movimiento de cargas positivas (protones), aunque en realidad sabemos que se debe al movimiento de los electrones libres en los metales. Y teniendo en cuenta que en un instante de tiempo determinado la corriente eléctrica es la derivada de la carga con respecto del tiempo, y además que la carga se expresa en Culombios (C) y el tiempo en segundos (s), obtenemos la siguiente relación entre dichas unidades básicas.

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \rightarrow [A] \equiv \frac{[C]}{[s]}$$

Ecuación 1: Definición de intensidad de corriente eléctrica.

- **Tensión o potencial eléctrico:** en un punto de la red representa la energía potencial por unidad de carga de una carga colocada en ese punto. Dicho de otra forma, **es el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas (Ecuación 2)**, y se representa por **u** o **U** según dependa o no del tiempo respectivamente. El nivel cero de energía potencial eléctrico (al igual que pasa con el campo gravitatorio) es arbitrario ya que lo que realmente importa es la **“diferencia de potencial” (d.d.p.)** entre dos puntos, lo cual en el SI se mide en voltios (V). Por ejemplo, si saltamos desde nuestra cama hasta el suelo, no importa si lo hacemos en un primero o en un noveno, sino que solamente importa la altura de la cama, y por tanto, la diferencia de altura entre la cama y el suelo (puntos inicial y final de nuestro salto). Así pues, si la diferencia de potencial entre el punto final (B) y el inicial (A) es negativa, o dicho de otra forma $V_A > V_B$, la corriente eléctrica positiva recorrerá dicho camino desde A hacia B, y si fuera negativa al revés.

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq} \rightarrow [A] \equiv \frac{[J]}{[C]}$$

Ecuación 2: Definición de diferencia de potencial.

- **Potencia:** la potencia es el **trabajo realizado o energía consumida por unidad de tiempo**. La potencia eléctrica que consume un dipolo coincide matemáticamente con el producto de la tensión que hay entre sus extremos y la corriente que lo atraviesa (Ecuación 3). Su unidad en el SI es el Vatio (W).

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \rightarrow [W] \equiv V \cdot A$$

Ecuación 3: Definición de potencia en corriente continua.

- **Resistencia:** representa físicamente la **oposición del material del cual está constituido el dipolo al paso de la corriente eléctrica** y es la responsable del efecto Joule, ya que toda la energía consumida por ella es disipada en forma de calor. Su unidad en el SI es el ohmio (Ω).

- **Ley de Ohm:** establece que la intensidad de corriente que circula entre dos puntos de un circuito eléctrico es proporcional a la diferencia de potencial entre ellos. Matemáticamente, tal y como se muestra en la ecuación 4, relaciona la tensión, la intensidad de corriente y la resistencia eléctrica.

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \rightarrow [A] \equiv \frac{[V]}{[\Omega]}$$

Ecuación 4: Ley de Ohm.

- **Resistencia ideal:** ya sabemos según se desprende de la Ley de Ohm que el cociente entre la tensión aplicada en los bornes de un dipolo y la corriente que atraviesa un dipolo para una resistencia ideal resultan siempre ser una constante cuyo valor coincide con el de una resistencia y es la pendiente de la recta de la siguiente figura que representa la relación entre la tensión y la corriente en un dipolo que representa a una resistencia ideal [15][16].

2.3.2. Parámetros y elementos de interés eléctrico en circuitos en régimen estacionario sinusoidal.

En este subapartado se tratarán los parámetros eléctricos de interés para circuitos de corriente alterna, que son aquellos en los que la tensión y la corriente no son constantes. Todo lo dicho anteriormente para los circuitos de corriente continua (c.c.), es perfectamente válido para los circuitos en régimen periódico (corriente alterna), con la excepción de que en corriente alterna no se utilizan los valores instantáneos para los cálculos (que son constantes) sino que lo que se utilizan son los valores eficaces los cuáles se definirán a continuación.

Los circuitos de corriente alterna en régimen permanente son aquellos en los que tanto la tensión como la corriente no permanecen constantes a lo largo del tiempo, pero que si se repiten periódicamente a lo largo del tiempo. La forma de onda de dichos circuitos en régimen permanente puede formar cualquier figura al representarla frente al tiempo. Hay un caso especial que son los circuitos en régimen permanente de corriente alterna sinusoidal que son aquellos en los que tanto la tensión como la corriente tienen formas de senos o cosenos (recordemos que uno y otro son la misma forma de onda sólo que desfasados en 90 grados). Y si bien es cierto que esto no siempre es así, sí que podemos descomponer cualquier forma de onda como suma de infinitos términos seno y coseno tal y como se verá más tarde aplicando la Transformada de Fourier. Así pues, definiremos la tensión, corriente, potencia activa y potencia reactiva como si de un circuito en régimen permanente sinusoidal se tratara, para luego después pasar a tratar los demás conceptos de manera más general de forma que las definiciones de todos los parámetros sean válidas para cualquier forma de onda.

- **Frecuencia:** la frecuencia f se mide en Hercios (Hz) y representa el **número de ciclos que se suceden por unidad de tiempo (segundos)**. Se hace aquí esta definición porque sea cual sea la forma de onda de tensión y corriente, por tratarse de un circuito en régimen permanente, ésta se sucederá indefinidamente en el tiempo una y otra vez.
- **Periodo:** el periodo T representa el **tiempo que tarda en sucederse un ciclo**. Matemáticamente es el inverso del periodo $T=1/f$ y se mide en segundos (s). Ver figura 5.

- **Frecuencia angular:** la frecuencia angular w se mide en rad/s y se obtiene matemáticamente como $w = 2 \cdot \pi \cdot f$. Es un parámetro muy usado para representar la tensión y corriente frente al tiempo y es por eso que aquí lo definimos.
- **Intensidad de corriente eléctrica:** significa lo mismo que en el subapartado anterior, sólo que ahora ésta varía con el tiempo. En circuitos alimentados con tensión alterna sinusoidal y cargas lineales, la corriente eléctrica también toma forma de seno y su valor instantáneo se puede expresar con la ecuación 5, donde φ_i representa el desfase respecto al origen de tiempos de la onda de corriente eléctrica.

$$i(t) = I_{max} \cdot \text{sen}(wt + \varphi_i)$$

Ecuación 5: Intensidad de corriente instantánea en circuitos de corriente alterna sinusoidal.

En circuitos de corriente alterna, usaremos para los cálculos su valor eficaz o rms tal y como antes hemos mencionado, el cual **representa el valor de una corriente continua que produce la misma cantidad de calor que la corriente periódica al circular por una resistencia en el periodo T**. Se calcula matemáticamente tal y como se aprecia con la ecuación 6. Y para el caso especial de una onda sinusoidal como la que se muestra en la ecuación 6, su valor eficaz coincide con su valor máximo dividido entre $\sqrt{2}$.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{max}^2 \cdot \text{sen}^2(wt) dt} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Ecuación 6: Valor eficaz de la corriente en circuitos de corriente alterna sinusoidal.

- **Tensión o potencial eléctrico:** la tensión eléctrica de la que disponemos en la red actual toma forma de seno (o coseno -es lo mismo desfasado en 90º-) y no es por casualidad, sino porque es la forma de onda que generan los alternadores de las centrales nucleares, térmicas, hidráulicas, etc. Así pues, la ecuación que representa matemáticamente la tensión en función del tiempo, análogamente a como hicimos con la intensidad de corriente eléctrica en la ecuación 5, lo haremos ahora con la ecuación 7 para la tensión siendo φ_u el desfase respecto al origen de tiempos de la onda de tensión.

$$u(t) = U_{max} \cdot \text{sen}(wt + \varphi_u)$$

Ecuación 7: Tensión instantánea en circuitos de corriente alterna sinusoidal.

Y además, análogamente a como ocurriría con la ecuación 6 para la corriente eléctrica, ocurrirá con el valor eficaz de la tensión pues ambas tienen forma sinusoidal, siendo lo único que importa por tanto la forma de onda y el valor pico.

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{max}^2 \cdot \text{sen}^2(\omega t) dt} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Ecuación 8: Valor eficaz de la tensión en circuitos de corriente alterna sinusoidal.

Se muestra en la figura 5 una representación gráfica de la tensión en función del tiempo para una onda de tensión sinusoidal. Igual sería la de intensidad de corriente eléctrica sólo que cambiando U_m por I_m [16][17].

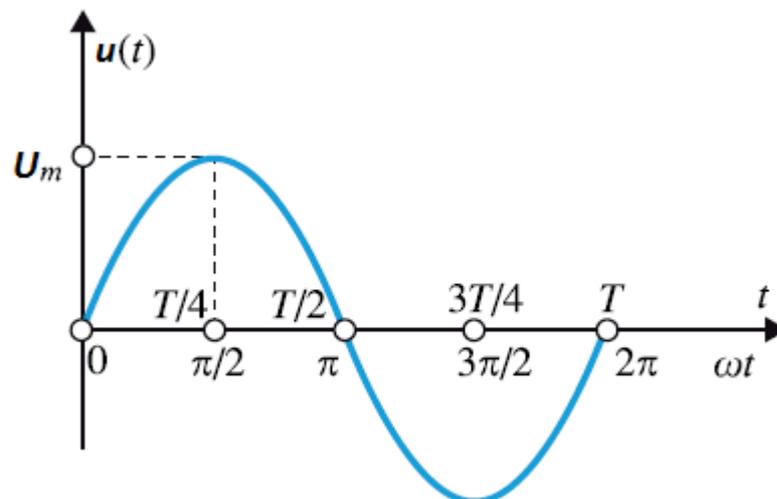


Figura 5: Representación gráfica de una onda de tensión sinusoidal. Fuente: Circuitos eléctricos (Jesús Fraile Mora)

- **Inductancia o bobina:** la bobina ideal es un elemento pasivo que puede almacenar energía en forma de campo magnético cuando aumenta la intensidad de corriente, devolviéndola cuando ésta disminuye. Está constituida por un conductor enrollado en forma de espiral, bien en el aire o sobre un elemento ferromagnético, y su efecto magnético es el de un imán variable cuyo campo magnético (imanación) depende del número de vueltas (espiras) que dé el conductor para formar la bobina, del tipo de material sobre el que esté enrollada la bobina y del tipo de corriente que circule (si es continua o alterna así como también de su frecuencia).

Se representa por la letra **L**, que se llama coeficiente de autoinducción y se mide en Henrios (H). La expresión matemática que explica el funcionamiento de la bobina en función de la tensión e intensidad es la número 9.

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

Ecuación 9: Ecuación matemática que describe el funcionamiento de una bobina ideal.

Y tal como podemos apreciar en dicha ecuación, la tensión depende del coeficiente de autoinducción L y de la derivada de la intensidad de corriente respecto al tiempo. Así pues, podemos hacer las siguientes observaciones:

- Si hacemos circular por la bobina corriente continua, la derivada será nula y por tanto la tensión entre sus bornes será nula (cortocircuito).
- No debemos variar la intensidad bruscamente pues si se produjese un cambio en escalón la intensidad produciría una tensión infinita (en realidad sabemos que sería finita pero muy grande). No obstante, nunca se produce una corriente tipo escalón ya que si por ejemplo desenchufamos un elemento que contiene a una bobina y por ella está circulando cierta intensidad de corriente, se produce un arco eléctrico (chispa) que hace que la corriente pase a cero rápidamente.

La diferencia con la bobina real es que el conductor que forma la espira de la bobina tiene obviamente cierta resistencia que habrá que tener en cuenta.

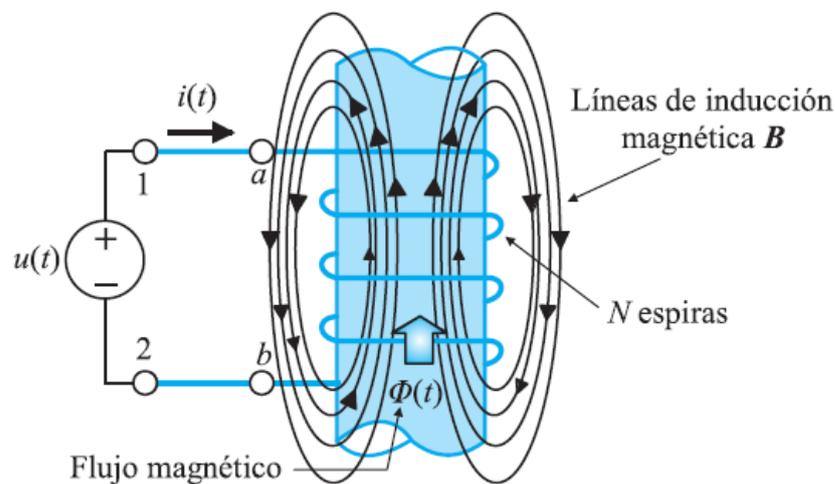


Figura 6: Bobina. Fuente: Circuitos eléctricos (Jesús Fraile Mora)

- **Condensador:** el condensador ideal es un elemento pasivo del circuito que puede almacenar energía en forma de campo eléctrico. Está constituida por dos placas metálicas separadas por un material dieléctrico o por el vacío. La capacidad del condensador se denota por C y se mide en Faradios (F), y físicamente representa la

relación existente entre la carga de sus armaduras y la tensión o diferencia de potencial a la que se ven sometidas tal y como se muestra en la ecuación 10.

$$C = \frac{Q}{U} \rightarrow F \equiv \frac{C}{V}$$

Ecuación 10: Definición de la capacidad de un condensador o capacitancia.

Por tanto, la carga almacenada en una de sus placas es proporcional a la diferencia de potencial entre esta placa y la otra, siendo la constante de proporcionalidad la llamada capacidad o capacitancia C . Así pues, cuando aumenta la diferencia de potencial entre sus terminales, el condensador almacena carga eléctrica debido a la presencia de un campo eléctrico en su interior, y cuando esta disminuye, el condensador devuelve dicha carga al circuito.

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

Ecuación 11: Ecuación matemática que describe el funcionamiento de un condensador.

La ecuación matemática que explica su funcionamiento es la ecuación 11 con la que podemos hacer las siguientes observaciones:

- Sólo circulará intensidad por un condensador si la tensión entre sus terminales varía. Por tanto, si conectamos al condensador una fuente de tensión continua, éste se comportará como un circuito abierto.
- Si aplicamos un escalón de tensión al condensador, se necesitaría un aporte infinito de corriente.

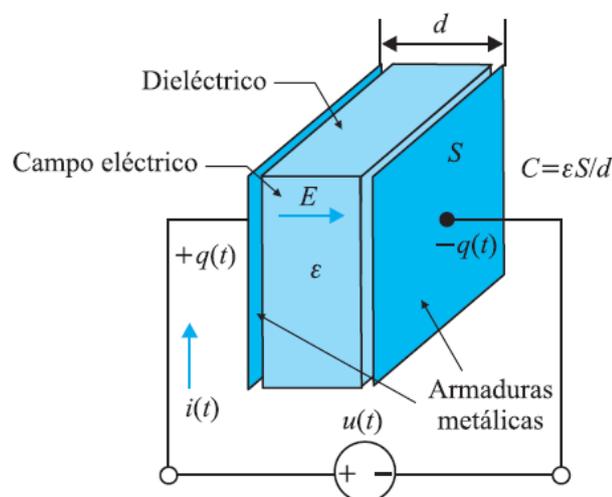


Figura 7: condensador de placas paralelas. Fuente: Circuitos eléctricos (Jesús Fraile Mora)

- **Ley de Ohm de los circuitos de corriente alterna:** no hay una Ley de Ohm para los circuitos de corriente alterna y otra para los de corriente continua, pero sí que hay un par de matices y la utilización de fasores en esta última, algo que sin duda hay que explicar con detalle. Recordemos para empezar la ecuación 4.

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \rightarrow [A] \equiv \frac{[V]}{[\Omega]}$$

Ecuación 4: Ley de Ohm.

Pues bien, la primera diferencia de los circuitos de corriente alterna sinusoidal con los de corriente continua es que ni la tensión ni la intensidad son constantes, y por tanto su valor varía a lo largo del tiempo. Entonces, para el caso de que se alimente una resistencia con una tensión alterna sinusoidal su intensidad de corriente eléctrica será la que se muestra en la ecuación 12.

$$i(t) = \frac{U_{max}}{R} \cdot \text{sen}(wt + \varphi_u) = I_{max} \cdot \text{sen}(wt + \varphi_i)$$

Ecuación 12: Intensidad instantánea en una resistencia de un circuito de corriente alterna sinusoidal.

Por lo que tenemos $I_{max} = \frac{U_{max}}{R} \rightarrow I_{rms} = \frac{U_{rms}}{R}$ y además $\varphi_u = \varphi_i$ por lo que obtenemos que no hay desfase alguno entre ambas ondas, y por tanto que las dos estarán en fase tal como se muestra en la figura 8.

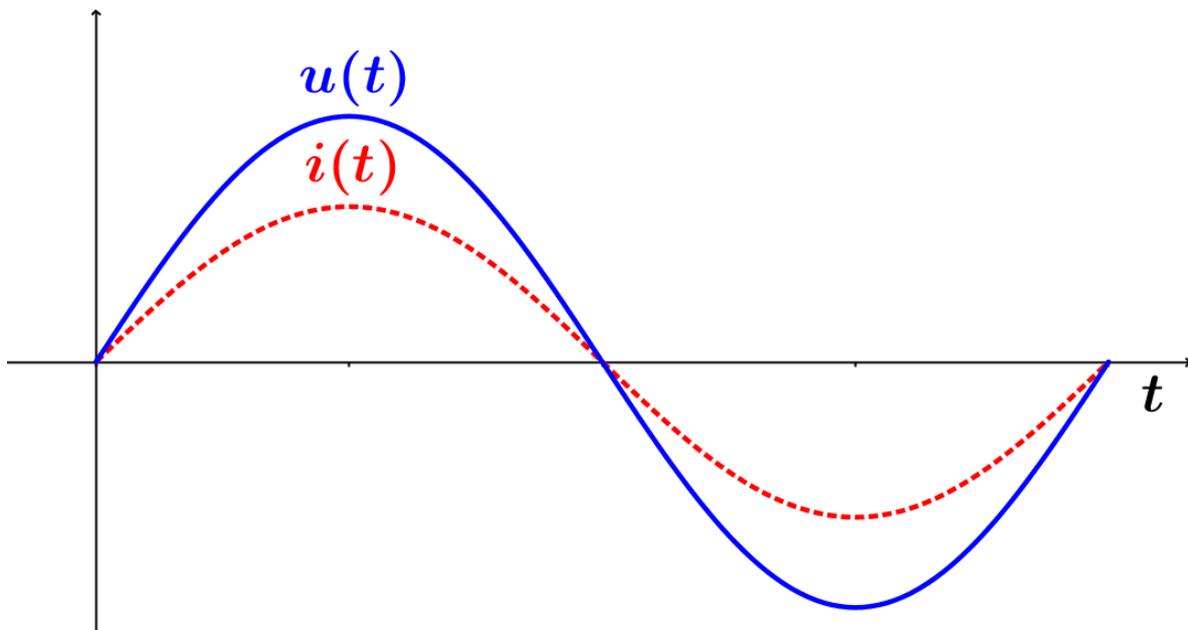


Figura 8: Ondas de tensión e intensidad en fase debido a una carga puramente resistiva.

Analicemos ahora el caso en que alimentemos con tensión alterna sinusoidal una bobina. Esta lo que hará será retrasar la onda de corriente en 90° ($\pi/2$ rad) tal y como se muestra en la figura 9. Fíjese el lector como la onda de corriente siempre está atrasada en 90° respecto a la de tensión, lo cual hace posible el uso de los números complejos para el cálculo y resolución de circuitos de corriente alterna.

$$i(t) = \frac{u(t)}{Z \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{U_{rms} \cdot \sqrt{2}}{Z} \cdot \text{sen}\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \varphi_u - \frac{\pi}{2}\right)$$

Ecuación 13: Intensidad instantánea en una bobina de un circuito de corriente alterna sinusoidal.

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} = \frac{U}{Z} \varphi_u - \pi/2$$

Ecuación 14: Cálculo fasorial de la intensidad de corriente en una bobina.

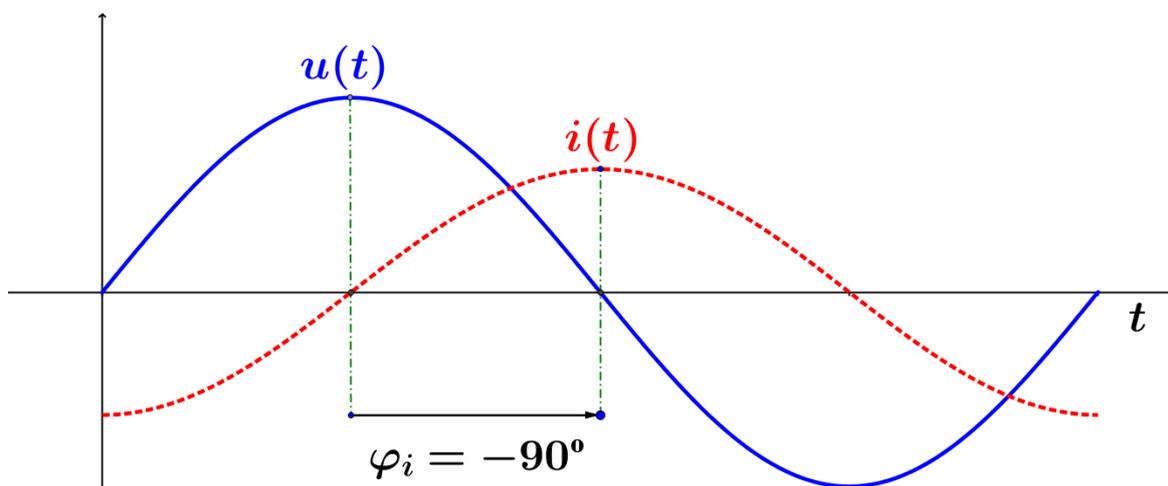


Figura 9: Ondas de tensión e intensidad de una carga puramente inductiva.

Con los condensadores lo que ocurre es todo lo contrario, es decir, la onda de corriente se adelanta $\pi/2$ radianes tal y como se muestra en la figura 10. Y análogamente a las ecuaciones 13 y 14 para una carga inductiva pura, obtenemos las ecuaciones 15 y 16 para una carga capacitiva pura.

$$i(t) = \frac{u(t)}{Z \cdot \text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{U_{rms}}{Z} \cdot \text{sen}\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \varphi_u + \frac{\pi}{2}\right)$$

Ecuación 15: Intensidad instantánea en un condensador de un circuito de corriente alterna sinusoidal.

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} = \frac{U}{Z_{\varphi_u + \pi/2}}$$

Ecuación 16: Cálculo fasorial de la intensidad de corriente en un condensador.

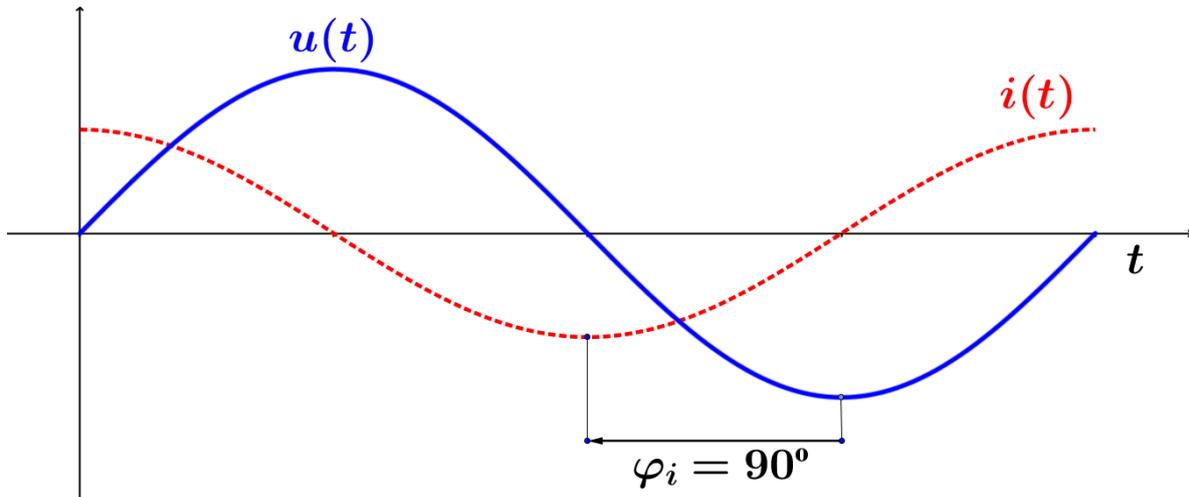


Figura 10: Ondas de tensión e intensidad de una carga puramente capacitiva.

- **Potencia aparente (S):** no es la potencia realmente consumida, y de ahí su nombre aparente, sino que **señala la capacidad que tiene la red de alimentación de un circuito de satisfacer la energía consumida por las resistencias, bobinas y condensadores del circuito.** Su módulo se obtiene con el producto de los valores eficaces de tensión y corriente, se representa por **S** y se mide en Voltiamperios (VA). No obstante, para poder ser descompuesta en las potencias activa y reactiva - definidas más adelante- se calcula usando números complejos con la ecuación 17.

$$\vec{S} = \vec{U} \vec{I}^* = UI_{\varphi_u + (-\varphi_i)}$$

Ecuación 17: Cálculo complejo de la potencia aparente.

Nótese que lo que se hace en la ecuación 17 es multiplicar el fasor tensión por el conjugado del fasor corriente. Así pues, **no podemos caer en el error de confundir φ con φ_i** , pues éstos sólo coincidirán en módulo cuando se tome el origen de la onda de tensión en el origen de tiempos -figuras 9 y 10- y además, en este caso serán de signo opuesto.

- **Potencia activa (P):** se representa por **P**, se mide en vatios (W) y **es la realmente consumida en los elementos resistivos y por tanto la capacidad de una instalación para transformar energía eléctrica en trabajo útil.** Se calcula matemáticamente con la ecuación 18 donde U e I son los valores eficaces de la tensión e intensidad respectivamente, y φ es el ángulo de desfase definido justo arriba, recordemos no confundirlo con φ_i .

$$P = UI\cos(\varphi)$$

Ecuación 18: Cálculo de la potencia activa.

- **Potencia reactiva (Q):** no es una potencia realmente consumida en las instalaciones ya que no produce trabajo útil debido a que su valor medio es nulo. Aparece en los circuitos e instalaciones eléctricas en las que existen bobinas y condensadores debido a que es necesaria para crear campos magnéticos y eléctricos. Se representa simbólicamente por Q, se mide en voltiamperios reactivos (VAr) y se calcula con la ecuación 19.

$$Q = UI\sen(\varphi)$$

Ecuación 19: Cálculo de la potencia reactiva.

- **cos(φ) y triángulo de potencias:** dado el tratamiento complejo que se ha hecho con la descomposición de la potencia aparente en las potencias activa y reactiva, es claro que el vector potencia aparente S se puede expresar en base a sus componentes real (potencia activa) e imaginaria (potencia reactiva) y representarlo gráficamente tal y como se muestra en la figura 11.

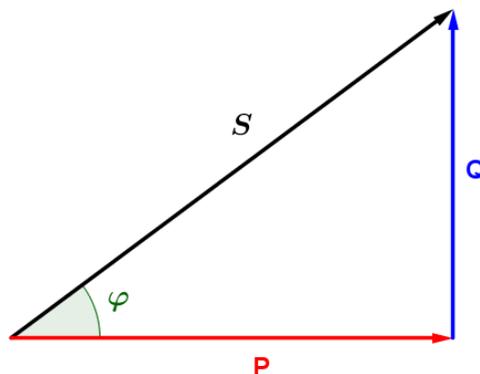


Figura 11: Triángulo de potencias.

Donde como ya sabemos $\varphi = \varphi_u + (-\varphi_i)$ y por tanto tenemos un ángulo $\varphi > 0$ para cargas inductivas y $\varphi < 0$ para cargas capacitivas siendo el sentido positivo del ángulo el antihorario y el ángulo medido el que abarca desde P hasta S. Ahora si entenderá el lector claramente por qué se definen así las ecuaciones 17, 18 y 19 recordando las relaciones trigonométricas entre los dos catetos y la hipotenusa de un triángulo rectángulo. Además, por el teorema de Pitágoras se cumplirá la ecuación 20 definida a continuación.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Ecuación 20: Módulo de la potencia aparente.

Y dado que la potencia útil es la potencia activa, es claro que el $\cos(\varphi)$ no proporciona otra cosa sino el tanto por uno de energía aprovechada teniendo en cuenta que para proporcionarnos esa potencia activa P, se necesita una potencia aparente S.

- **Factor de potencia (fdp):** mirando de nuevo la figura 15, podemos recordar qué significa el $\cos(\varphi)$. Ahora definiremos el **factor de potencia** como la **relación que existe entre la potencia activa y la potencia aparente** tal como se muestra en la ecuación 21. Y es que aunque para circuitos de corriente alterna sinusoidal pueda parecer lo mismo en base a la figura 11 -ya que coincide con el $\cos(\varphi)$ -, se comprenderá claramente su diferencia para el caso de circuitos no lineales tal y como se describe en el subapartado 2.2.3.

$$fdp = \frac{P}{S}$$

Ecuación 21: Factor de potencia.

- **Teorema de Boucherot:** *“La potencia activa absorbida por un conjunto de receptores es igual a la suma algebraica de las potencias activas absorbidas por cada uno de ellos; la potencia reactiva absorbida por el referido conjunto es igual a la suma algebraica de las potencias reactivas absorbidas por cada uno de ellos; la potencia aparente absorbida por el referido conjunto es igual a la suma vectorial de las potencias aparentes absorbidas por cada uno de ellos”.*

Y su traducción matemática sería la que sigue:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i$$
$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i$$
$$\vec{S}_T = \sum_{i=1}^n \vec{S}_i$$
$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

Ecuación 22: Traducción matemática del Teorema de Boucherot.

- **Mejora del factor de potencia:** en base al Teorema de Boucherot, sabemos que la potencia reactiva absorbida por un conjunto de cargas es igual a la suma de las potencias absorbidas por cada una de las cargas. Así por ejemplo, si tenemos una instalación con consumo de potencia reactiva de tipo inductivo (lo más usual) y por tanto $\cos(\varphi) < 1$, podemos compensarla conectando carga de tipo capacitivo en paralelo a la entrada de la instalación hasta obtener $\cos(\varphi) \approx 1 \rightarrow P \approx S$ mejorando pues el rendimiento de la instalación [16][17][18].

2.3.3. Parámetros y elementos de interés eléctrico en circuitos en régimen estacionario no sinusoidal.

En este subapartado adaptaremos lo tratado en el subapartado anterior a los circuitos en régimen estacionario no sinusoidal. Observe por ejemplo la figura 12 donde se muestra una onda de tensión perfectamente sinusoidal $u(t)$, una onda de corriente $i_1(t)$ tipo capacitivo y una onda de corriente $i_2(t)$ que es el resultado de sumar varios armónicos a la onda de corriente número 1, lo cual podría ser perfectamente el resultado de un circuito electrónico ya que típicamente constan de cargas no lineales y condensadores.

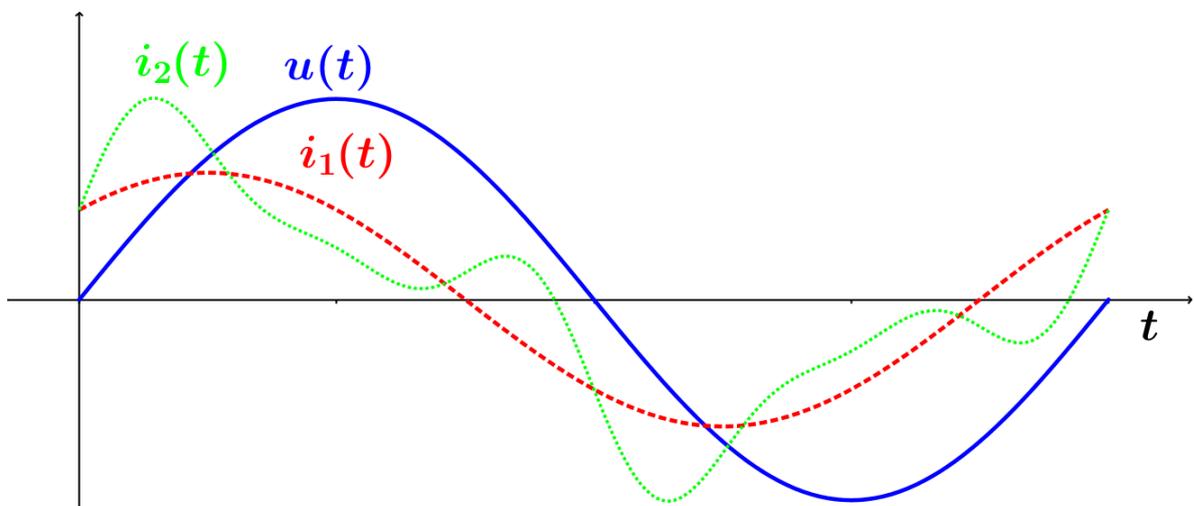


Figura 12: Comparación de régimen estacionario sinusoidal con no sinusoidal.

Pues bien, dado que la onda de corriente ya no se compone de una sola onda sinusoidal, sino que está constituida por la suma de varias ondas de este tipo -el que coincidan los extremos inicial y final de ambas ondas es fruto de la casualidad puesto que el único armónico de tipo capacitivo de la segunda onda de corriente es el fundamental- y es por eso que el análisis de potencia clásico para circuitos en régimen estacionario sinusoidal no será válido aunque lo extrapolaremos tal como presentaremos a continuación presentando la descomposición de potencia típica en este tipo de circuitos no lineales.

No presentaremos aquí la Transformada discreta de Fourier pues ésta se tratará específicamente en el capítulo 3 apartado 3. Aunque sí diremos que consiste en descomponer cualquier onda periódica como suma de ondas seno y coseno de frecuencia n veces la fundamental, siendo n un número entero.

Partiendo de los resultados que nos proporciona el análisis de Fourier -expuesto más adelante- tal como son los valores eficaces tanto de tensión como de intensidad de corriente de los respectivos armónicos, así como también sus respectivos desfases, podemos utilizar las siguientes ecuaciones para el análisis de este tipo de circuitos.

- **Tensión:** dado el armónico fundamental de orden cero U_0 (componente continua), y el valor eficaz y desfase de cada uno de los siguientes armónicos, la tensión instantánea es el resultado de sustituir dichos datos en la ecuación número 23 donde $n\omega$ representa la frecuencia angular de cada armónico y α_n el desfase en tensión de dicho armónico. Además, haciendo la raíz de la media cuadrática de la tensión instantánea para calcular la tensión eficaz del circuito (sustituyendo la ecuación 23 en la 8), su valor será la raíz de la suma cuadrática de todos y cada uno de los armónicos tal como se expresa en la ecuación 24.

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t + \alpha_n)$$

Ecuación 23: Tensión instantánea en presencia de armónicos.

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}$$

Ecuación 24: Tensión eficaz en presencia de armónicos.

- **Corriente:** y haciendo lo mismo con la intensidad de corriente, obtenemos análogamente las ecuaciones 25 y 26 donde si representamos la impedancia para el armónico correspondiente en forma polar, φ_n representa el ángulo de dicho vector. Por otra parte, conociendo tanto el valor eficaz de cada armónico como la impedancia para dicha frecuencia, podemos obtener el valor eficaz de la intensidad de corriente para cada armónico (ecuación 27), los cuáles habría que sustituir en las ecuaciones 25 y 26. En la ecuación 27, n representa el armónico -siendo éste 0 para la componente continua- y $Z(n\omega)$ la impedancia del armónico correspondiente de frecuencia n veces la fundamental.

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega t + \alpha_n - \varphi_n)$$

Ecuación 25: Intensidad de corriente instantánea en presencia de armónicos.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i(t))^2 dt} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

Ecuación 26: Intensidad de corriente eficaz en presencia de armónicos.

$$I_n = \frac{U_n}{Z(n\omega)}$$

Ecuación 27: Valor eficaz de la intensidad de corriente de cada armónico.

Está muy claro en la actualidad la descomposición de potencias, en circuitos en régimen estacionario sinusoidal con cargas lineales, en sus partes activa y reactiva, así como también su significado físico. Sin embargo, la descomposición de potencias en circuitos de corriente alterna en régimen estacionario no sinusoidal es un tema de gran controversia en la actualidad entre ingenieros y científicos.

Existen distintas descomposiciones de potencia según autores, aunque en este texto sólo se expondrán las dos que siguen que son las más usadas, y de ellas dos, usaremos sólo la primera pues es la única que permite compensar el $\cos(\varphi)$ en circuitos de corriente alterna en régimen estacionario no sinusoidal.

- **Descomposición de potencias en P, Q, D y S.**

Esta descomposición de potencias propuesta por Constantin Budeau, se hace por analogía con el caso sinusoidal puro, y considera que no hay contribuciones de potencia activa ni reactiva de los armónicos de tensión y corriente de diferentes frecuencias. Se comprueba experimentalmente que no se cumplen la ecuación 20 (ni la 22d) y por tanto que la potencia reactiva no es igual a la potencia activa. Por tanto, surge un nuevo tipo de potencia, llamada potencia de distorsión **D** y su nueva descomposición vectorial es la de la ecuación 28.

$$\vec{S} = P\vec{i} + Q\vec{j} + D\vec{k}$$

Ecuación 28: Descomposición vectorial de potencias en P, Q y D.

- **Potencia activa (P):** unificando las ecuaciones 18 y 22a, obtendremos la potencia activa total tal y como se muestra en la ecuación 29, y se mide en vatios.

$$P = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos(\varphi_n)$$

Ecuación 29: Cálculo de la potencia activa en presencia de armónicos.

- **Potencia reactiva (Q):** y por analogía con la potencia reactiva, obtenemos la potencia reactiva total con la ecuación 30, y se mide en voltamperios reactivos.

$$Q = \sum_{n=1}^n U_n I_n \sen(\varphi_n)$$

Ecuación 30: Cálculo de la potencia reactiva en presencia de armónicos.

- **Potencia aparente (S):** la potencia aparente se calcula como siempre con el producto de los valores eficaces de corriente y tensión, que expresado en función de los armónicos la expresión queda tal como sigue y se mide en voltamperios.

$$S = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n\right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} I_n\right)}$$

Ecuación 31: Cálculo de la potencia aparente en presencia de armónicos.

- **Potencia de distorsión (D):** dado que se demuestra experimentalmente que la potencia aparente no se descompone simplemente como suma de las potencias activa y reactiva según las ecuaciones 29 y 30 respectivamente, se ha de definir un nuevo tipo de potencia llamada potencia de distorsión, la cual se mide en voltamperios de distorsión [16].

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

Ecuación 32: Cálculo de la potencia de distorsión.

- **Descomposición de potencias en P, N y S.**

Esta otra propuesta de descomposición de potencias en circuitos en régimen estacionario no sinusoidal fue propuesta por un grupo de investigación de armónicos del IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) el cual divide la potencia aparente en dos partes, potencia activa y potencia no activa.

- **Potencia activa (P):** se calcula y representa lo mismo que en la ecuación 29.
- **Potencia aparente (S):** también se calcula y representa según la ecuación 31.
- **Potencia no activa (N):** se calcula como la raíz de la diferencia de cuadrados de la tensión aparente y la activa con la ecuación 33, y si comparamos esta descomposición de potencias con la anterior, representaría la raíz cuadrada de la suma de la potencia reactiva al cuadrado más la potencia de distorsión al cuadrado [16][19].

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Ecuación 33: Potencia no activa.

2.3.4. Parámetros de interés lumínico.

La luminotecnia es la ciencia que estudia las formas de producción de la luz, así como su control y aplicación. Definiremos a continuación diferentes magnitudes básicas de interés desde el punto de vista de la luminotecnia.

- **Flujo luminoso (ϕ):** a veces también llamado potencia luminosa, es la cantidad total de luz radiada o emitida por una fuente luminosa en todas las direcciones durante un segundo. Se representa por la letra griega ϕ y su unidad de medida es el **lumen (Lm)**.
- **Rendimiento luminoso (η):** se denomina rendimiento o eficacia luminosa al cociente del flujo luminoso que emite una lámpara por unidad de potencia luminosa. Así pues, se calcula con la ecuación 34 y tiene unidad de medida que son los **lúmenes/vatio (Lm/W)**.

Nótese como el rendimiento normalmente en todas las áreas de ingeniería está expresado en tanto por uno y además carece de unidades, justo al contrario que en este caso pero lo que sí está claro es que contra más grande sea el rendimiento luminoso más se aprovecha la energía que consume la lámpara. Y es que hipotéticamente el máximo rendimiento se produciría en una lámpara que no tuviese ningún tipo de pérdida y que emitiese con una longitud de onda de 555 nm ya que dicha longitud de onda corresponde a la máxima eficiencia luminosa de día (lo veremos en el apartado 2.4.).

$$\eta = \frac{\phi}{P}$$

Ecuación 34: Rendimiento luminoso.

- **Intensidad luminosa (I):** es la cantidad de luz emitida o radiada por una fuente luminosa durante un segunda, en una dirección dada y para un ángulo sólido de valor un estereorradián. Se representa por la letra I y su unidad de medida es la **candela (Cd)**.

$$I = \frac{\phi}{w} \rightarrow 1Cd \equiv \frac{1 Lm}{1 Sr}$$

Ecuación 35: Intensidad luminosa.

Pero nos falta ver qué es un estereorradián, pues bien, un estereorradián no es más que la unidad de medida en el sistema internacional de un ángulo sólido. Y un ángulo sólido, se define por el volumen formado por la superficie lateral de un cono cuyo vértice coincide con el centro de una esfera de radio r , y cuya base se encuentra situada sobre la superficie de la esfera. Pues bien, si el radio vale 1 metro, y la superficie S del cono es de 1 metro cuadrado, el ángulo sólido vale un estereorradián (Sr) tal y como se muestra en la figura 13.

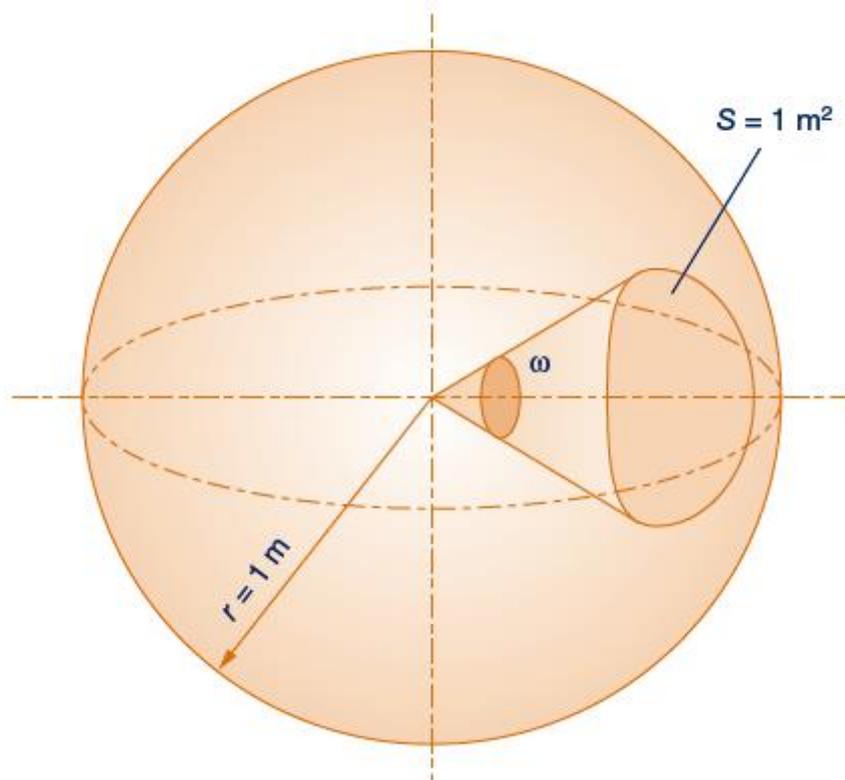


Figura 13: Ángulo sólido de valor un estereorradián. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González)

- **Nivel de iluminación o iluminancia (E):** es la cantidad de luz (flujo luminoso) que incide por unidad de superficie y su unidad de medida en el sistema internacional es el lux.

$$E = \frac{\phi}{S} \rightarrow \text{lux} \equiv \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$$

Ecuación 36: Nivel de iluminación o iluminancia.

- **Luminancia (L):** es la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente de una fuente de luz primaria o secundaria, la que emite o refleja la luz respectivamente. Se mide en candelas por metro cuadrado (Cd/m²) y se calcula con la ecuación 37 [20].

$$L = \frac{I}{S \cos(\beta)}$$

Ecuación 37: Luminancia.

2.4. Tipos de lámparas.

La luminotecnica se define como la ciencia que estudia las distintas formas de producción de luz, así también como su control y aplicación con fines domésticos, industriales o artísticos.

Por otra parte, la RAE (Real Academia Española) define la luz como la radiación electromagnética en el espectro visible, es decir, el conjunto de las radiaciones detectables por el sentido de la vista. Son muchas y de valores muy diferentes las longitudes de onda presentes y utilizadas en nuestro día a día (figura 14) tales como los 10 nanómetros de longitud de onda que utilizan los rayos X de una radiografía, hasta los 10 kilómetros de las ondas largas utilizadas por Radio Faros (estación emisora de radio que envía de forma automática y continua señales como ayuda a la navegación aérea y marítima). Pero tal y como se aprecia en la figura 14, de todas las longitudes de ondas electromagnéticas posibles, las detectables por el sentido de la vista abarcan solamente desde los 380 hasta los 730 nanómetros.

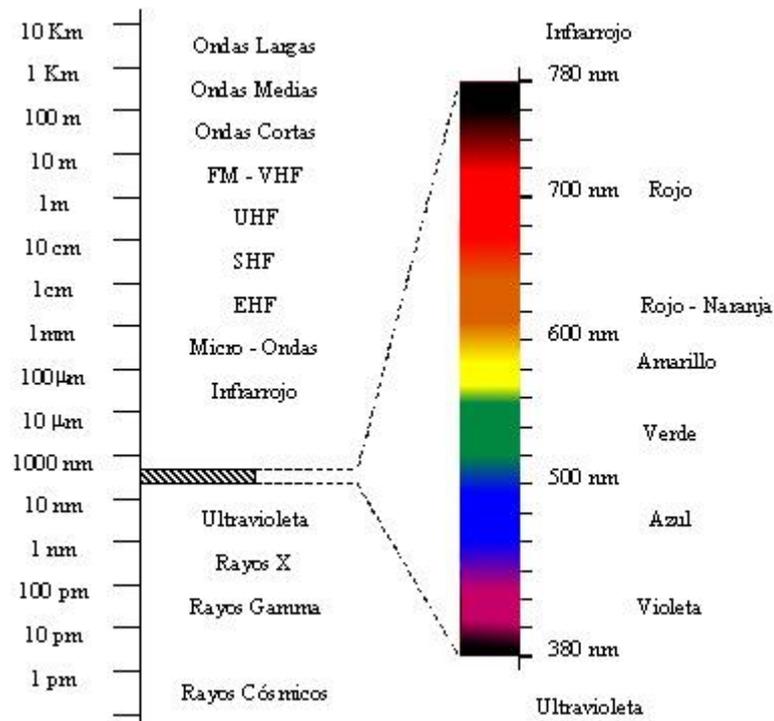


Figura 14: Longitudes de ondas electromagnéticas. Fuente: <http://iesmjuancalero.juntaextremadura.net/>

No obstante, el ojo humano no responde de la misma forma ante todos los colores. Y es que Gibson y Tyndall determinaron en 1923 que la sensibilidad máxima del ojo se encuentra en el medio del intervalo del espectro visible, en algún lugar entre el amarillo y el verde. En concreto, el ojo tiene su mayor sensibilidad en la longitud de onda de 555 nm, que corresponde al color amarillo verdoso, y la mínima a los colores rojo y violeta.

En 1924, la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) estandarizó internacionalmente la función de eficiencia luminosa espectral para la visión fotópica (situación que se presenta a la luz del día o con buena iluminación). El resultado de esta curva, no es una valoración de las radiaciones en términos de su potencia, sino en función de su capacidad para estimular el ojo humano. Se muestra en la figura 15 el diagrama de la curva espectral de eficiencia luminosa para la visión fotópica $V(\lambda)$.



Figura 15: Curva espectral de eficiencia luminosa para la visión fotópica. Fuente: <http://www.gusgsm.com/>

Y es que el concepto de eficiencia luminosa tiene una gran importancia en la luminotecnia ya que marca el esfuerzo energético que habrá que hacer para generar luz de un color u otro. No obstante, la eficiencia luminosa es distinta de día (visión fotópica) que de noche (visión escotópica), ya que de noche los niveles más eficientes de radiación tienen una longitud de onda más corta, concretamente el color azul con una longitud de onda de 507 nm. Esto supone un desplazamiento de la curva espectral de eficiencia luminosa para la visión fotópica hacia la izquierda, denominado Efecto Purkinje. Se muestra en la figura 16 la comparativa de la eficiencia luminosa para la visión fotópica con la correspondiente a la visión escotópica.

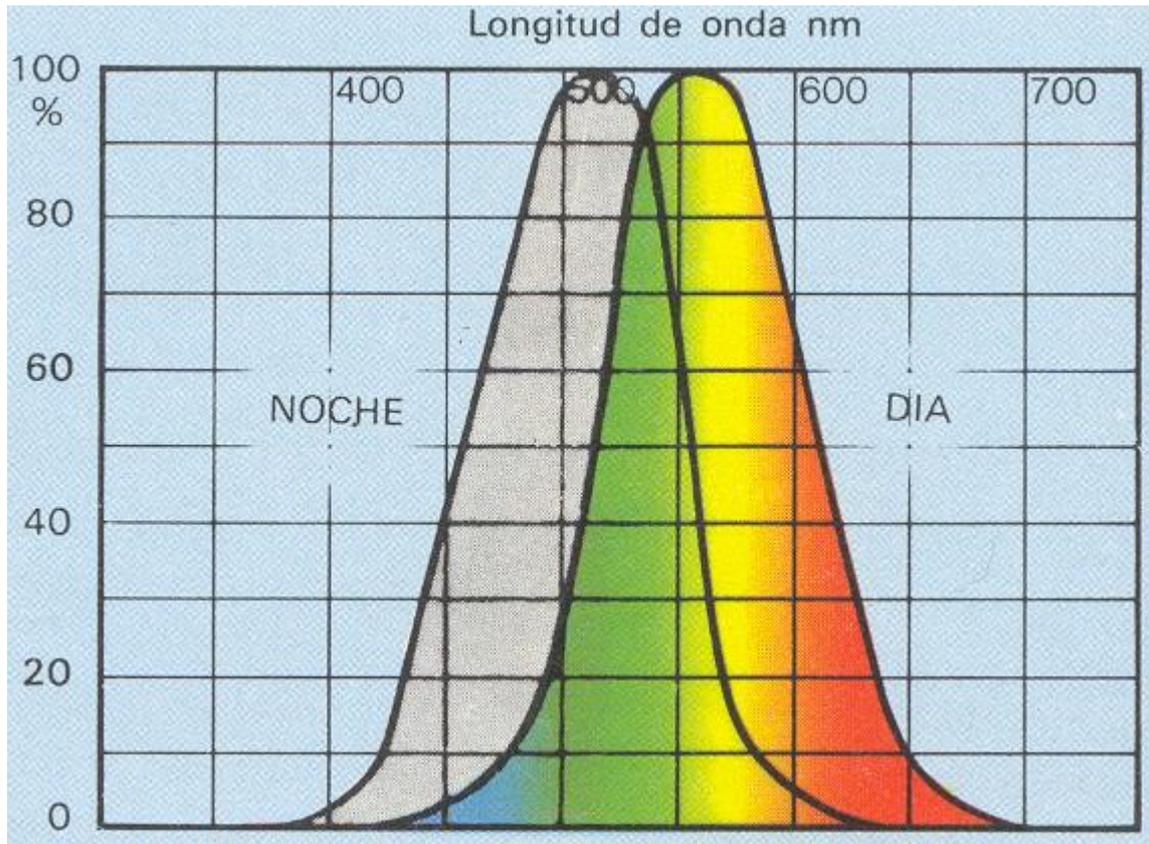


Figura 16: Comparativa de la eficiencia luminosa de noche y de día. Fuente: <http://www.veoveoqueves.com/>

Visto todo lo anterior, es claro que para la generación de luz será necesario un determinado mecanismo que emita energía en forma de ondas electromagnéticas dentro del espectro visible. Para conseguir esto, son tres los fenómenos utilizados en luminotecnia, los cuáles trataremos a continuación [21].

2.4.1. Bombillas incandescentes.

Se fundamenta en el hecho de que el paso de la corriente eléctrica a través de un conductor va siempre acompañado de un desprendimiento de energía en forma de calor debido al efecto Joule. Y es que si el material llega a una determinada temperatura sin fundirse, además de dicho calor se emite también energía radiante en forma de ondas electromagnéticas dentro del espectro visible (luz).

El color del conductor pasa de rojizo (a bajas temperaturas) a blanco o blanco azulado (a altas temperaturas), y es por ello que si se requiere una buena iluminación (color blanco), es necesario que el material conductor pueda alcanzar altas temperaturas sin fundirse. Pero además, es necesario que éste no disponga de una resistividad excesiva ya que sino esto conllevaría a un gasto energético excesivo, y entre todos ellos, el Osmio es el más utilizado. Se muestra en la figura 1 el esquema de una bombilla convencional que ilumina por incandescencia. Y en cuanto al espacio que separa la pared interior del bulbo de sus elementos internos, inicialmente estaba vacío para evitar la presencia de oxígeno y por tanto la combustión del filamento, aunque desde poco después y hasta la época tal y como se comentó en la introducción, ésta está relleno de algún gas inerte que suele ser Argón.

A modo anecdótico comentaremos las lámparas halógenas, que si bien su principio de funcionamiento físico se basa también en incandescencia esto muchas veces se desconoce. Las lámparas halógenas son una variante de las lámparas incandescentes, pero con un filamento de Tungsteno dentro de un gas inerte y una pequeña cantidad de halógeno (elementos químicos del grupo 17 de la tabla periódica) como por ejemplo el Cromo o el Yodo. Esto hace que el filamento y los gases se encuentren en equilibrio químico mejorando así el rendimiento del filamento y aumentando su vida útil gracias a que el material volatilizado (Tungsteno) se combina con el halógeno y se vuelve a disociar una vez precipitado el wolframio en el propio filamento [8].

2.4.2. Lámparas fluorescentes compactas (CFL).

Al contrario que la incandescencia, donde la radiación lumínica se desprendía a altas temperaturas, la luminiscencia es una forma de luz fría en la que la emisión de radiación lumínica es provocada a temperatura normal o baja.

Esquemáticamente podemos describir a un átomo como un núcleo alrededor del cual gravitan un conjunto de electrones con trayectorias orbitales precisas. Pues bien, cuando cierta forma de energía alcanza un átomo, ciertos electrones son excitados alcanzando de manera transitoria un nivel mayor de energía del que tenían, saltando así de un orbital a otro superior. Pero después, éstos deben recuperar su estado inicial para lo que han de desprenderse del excedente de energía emitiendo un fotón (recordemos que la energía está cuantizada -Teoría Cuántica de Plank-) que generalmente tiene una longitud de onda dentro del espectro visible. Se muestra en la figura 17 una vista esquemática de lo que ocurre físicamente en la luminiscencia.

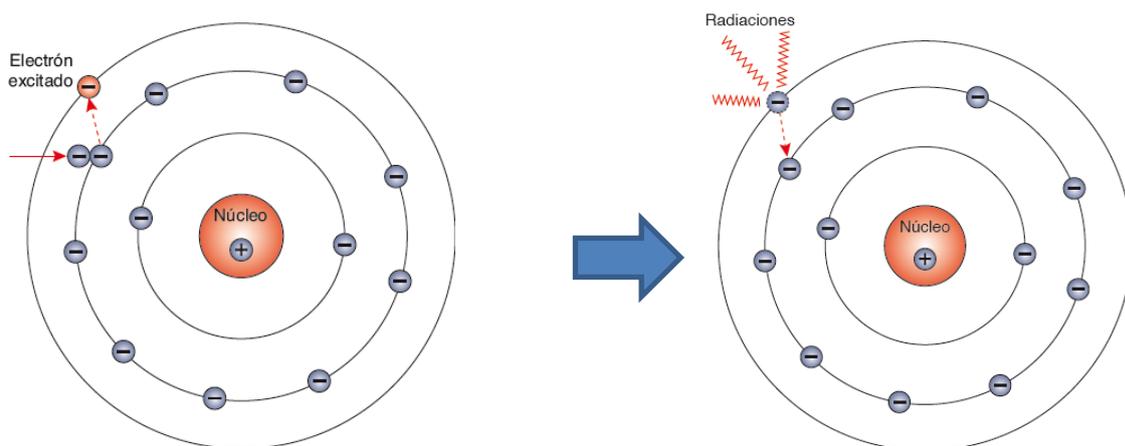


Figura 17: Efecto de luminiscencia. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González)

Lo anterior se consigue acelerando electrones por medio de un campo eléctrico. Así pues, si tenemos un tubo transparente como el de la figura 18, y en cuyo interior hay un gas adecuado, podemos conectar sus extremos positivo (ánodo) y negativo (cátodo) a una fuente de tensión continua y entonces aceleraremos electrones de un electrodo a otro. Y éstos en su recorrido, chocarán con los átomos del gas produciendo el efecto de luminiscencia. Este tipo de lámparas se denominan “lámparas de descarga eléctrica”, y en corriente alterna, cada uno de los electrodos funcionará alternativamente como ánodo o como cátodo.

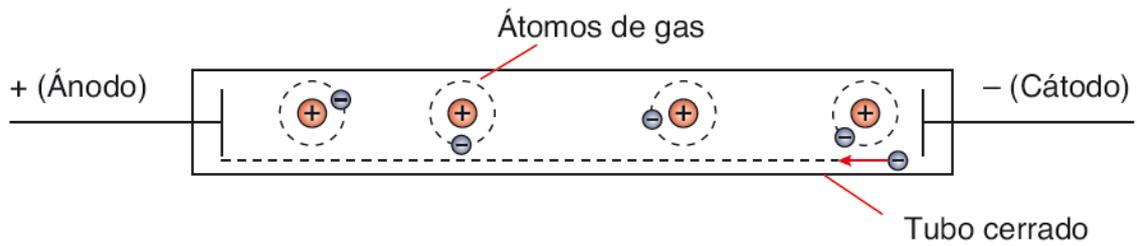


Figura 18: Luminiscencia en lámpara de descarga. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González)

Este tipo de lámparas que funcionan por luminiscencia son más eficientes a la hora de convertir energía eléctrica en luz que las que funcionan por incandescencia y generan poco calor, aunque necesitan un alto voltaje para funcionar. Tampoco tienen filamentos, pero usan un gas luminiscente para producir luz, gas del cual depende el color de la luz que ofrecen.

Las lámparas fluorescentes son también lámparas de descarga eléctrica, sólo que lo hacen en una atmósfera de vapor de mercurio a baja presión y un gas inerte cuyo efecto luminoso se basa en el fenómeno de la fluorescencia (propiedad que poseen determinadas sustancias en virtud de la cual transforman las radiaciones no visibles que inciden sobre ellas, generalmente ultravioletas en radiaciones visibles). Se muestra en la figura 19 el esquema de funcionamiento de las fluorescentes [20].

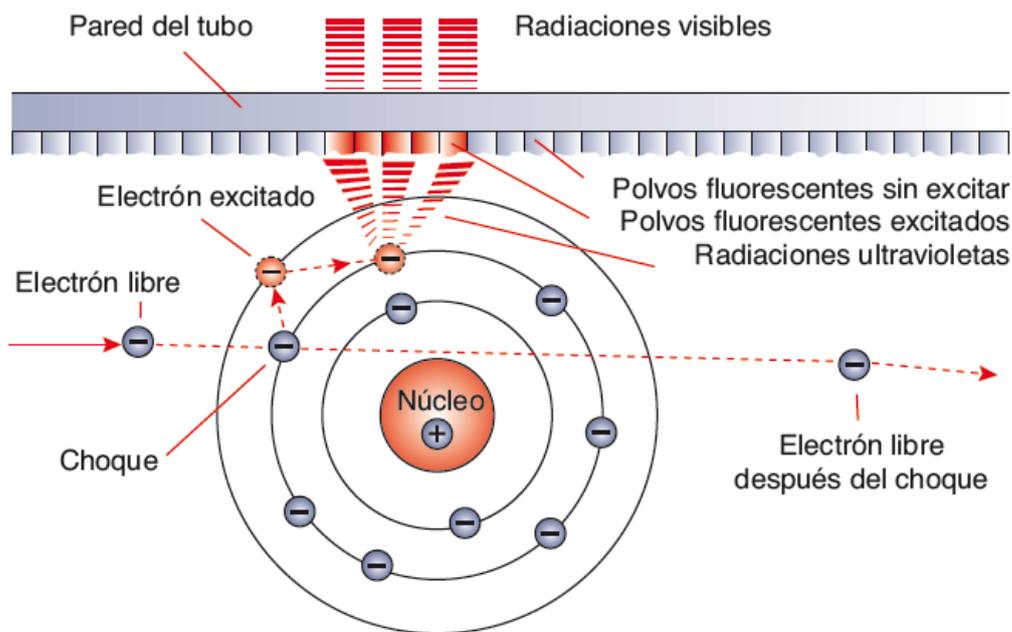


Figura 19: Luminiscencia en lámpara fluorescente. Fuente: Instalaciones eléctricas interiores (Enrique Marrufo González)

2.4.3. Lámparas LED.

Los famosos LED (acrónimo del inglés Light-Emitting Diode ó diodo emisor de luz) funcionan por electroluminiscencia, lo que consiste en que cuando un diodo se polariza de forma directa, se impulsan los electrones y huecos hacia la región activa entre el material tipo n y el tipo p de tal forma que circula corriente eléctrica a través de él, lo que conlleva a una liberación de energía radiante. La energía liberada de dicho proceso, tiene una longitud de onda asociada en función del material del diodo, de tal forma que si su longitud de onda está en el espectro visible puede ser aprovechada para iluminar. Además, en el caso de que el diodo emita luz debido a que su longitud de onda está en el espectro visible, el color de ésta dependerá también del material del diodo [20].

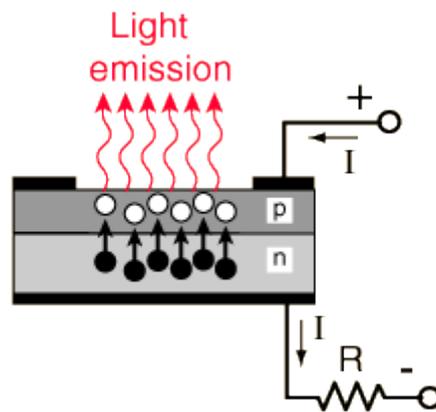


Figura 20: Diodo emisor de luz (LED). Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

Capítulo 3. Material y métodos.

Presentaremos en este capítulo todo el material utilizado en este trabajo, así como también el método de cálculo. Para la configuración de la onda de tensión que se ha suministrado en los diferentes experimentos se ha utilizado una fuente Agilent 6812B, que a su vez ha sido la encargada de hacer todas las medidas. También describiremos aquí todas las lámparas utilizadas. Por último, explicaremos en qué consiste la Transformada discreta (rápida) de Fourier y por qué la usamos aquí.

3.1. Fuente AGILENT 6812B.

La fuente Agilent 6812B (figura 21) se encuentra disponible en el laboratorio de Electrotecnia de la Universidad de Almería. Se trata de una fuente de alimentación monofásica de corriente alterna capaz de suministrar una potencia aparente de hasta 750 voltamperios y una tensión eficaz máxima de 300 voltios.



Figura 21: Fuente Agilent 6812B.

Dicha fuente se puede programar tanto desde su panel frontal, así como también a través de un equipo externo. Para ello, dispone de un puerto serie de comunicaciones RS232 y de un puerto GPIB. Toda nuestra programación de la fuente, se ha hecho en Matlab y por tanto desde un equipo externo para lo que se ha utilizado un conector GPIB-USB de la marca “prologix.biz” simulando un puerto serie y por tanto la programación ha sido dispuesta como si de tal se tratara.

La fuente no sólo es capaz de configurar la tensión de salida de cualquier forma que se pueda imaginar -ondas cuadradas, triangulares, sinusoidales con tantos armónicos como se quiera, frecuencia, etc-, sino que también toma medidas (valores rms de tensión y corriente, armónicos de tensión y corriente hasta el quincuagésimo, frecuencia, picos máximos de tensión y corriente, impedancia equivalente, etc) lo cual ha sido por supuesto programado. Y además de todo lo anterior, también nos proporciona las potencias activa, reactiva y aparente, sólo que tiene un fallo y es que la potencia reactiva la calcula despejándola de la ecuación 20, lo que sabemos no funciona en presencia de armónicos [22].

Para todos sus cálculos la fuente tiene un esquema de trabajo que es el que sigue. Cuando se le da la orden de una nueva medida “MEASure”, la fuente toma un array de 4096 puntos digitalizados de tensión con una frecuencia máxima de muestreo de 40 kHz (una medida cada 25 microsegundos) y otros 4096 de corriente. Y ya a partir de ahí hace los cálculos necesarios para ofrecernos los parámetros necesarios. Y es por eso que nosotros aplicamos para los cálculos la Transformada discreta de Fourier pues nos permite, a partir de esos datos, calcular cualquier parámetro eléctrico imaginable. Aunque sí bien es cierto que no lo necesitamos para algunos cálculos como por ejemplo para el pico de corriente máximo pues eso es simplemente encontrar el máximo valor del vector [23].

La fuente tiene innumerables comandos tanto de programación de la tensión de salida como para la toma de datos, los cuales no nombraremos aquí pues no aportarían nada al proyecto, pero lo que si hemos de resaltar es que cada uno de todos esos comandos va precedido y separado por un espacio de la palabra “MEASure” o “FETCh”. Y es que si utilizamos “MEASure” la fuente nos proporciona la medida en base a unos cálculos que realiza sobre el circuito en ese mismo instante de tiempo, y por tanto un parámetro actual. Pero también podemos utilizar “FETCh” en lugar de “MEASure” y entonces los parámetros proporcionados por la fuente serán calculados en lugar a la última medida realizada, es

decir, la diferencia radica en que según la palabra que pongamos delante del comando los parámetros proporcionados serán en base al estado del circuito actual, o en base al estado del circuito cuando se hizo la última medida. Así pues, si anteriormente hicimos una medida y se nos olvidó pedirle un parámetro a la fuente, y aún no hemos hecho otra nueva, estaremos a tiempo de pedírsela. Y es que la fuente solamente tiene memoria para almacenar un único array de tensión y otro de corriente [24].

Además de todo lo dicho anteriormente, la fuente puede trabajar de diversos modos expuestos a continuación, los cuáles serán mostrados gráficamente en la figura 22:

- **FIXed mode:** aquí la onda de tensión es estacionaria y se corresponde con la última orden recibida. Además, ignora cualquier “trigger” recibido, es decir, no permite la programación de transitorios. De esta forma, podemos examinar el comportamiento de diferentes luminarias en régimen estacionario sinusoidal, a sea con tensión de alimentación de 230 V, o en condiciones de sobretensión o subtensión.
- **STEP mode:** este modo permite la programación de un solo transitorio. Sabemos que la fuente al darle la orden de medir toma 4096 valores de tensión y corriente, pues bien, con este modo podemos decirle a la fuente toma por ejemplo 900 valores instantáneos de tensión y corriente, y al tomar el 900 cambian la tensión al valor deseado y sigue tomando datos (sin parar). De esta forma, podemos examinar el comportamiento de luminarias en presencia de transitorios, es decir, qué pasa en el momento en que se incrementa o baja la tensión de alimentación.
- **PULSE mode:** aquí podemos hacer lo mismo que con el STEP mode, sólo que con la diferencia de que al activar el transitorio lo hacemos durante x tiempo. Así por ejemplo podemos hacerlo durante 0,02 segundos (1 periodo) o durante tantos como queramos para luego -después de ese tiempo- volver a las condiciones que había antes de activar el transitorio. Así podemos comprobar el comportamiento de las luminarias ante microcortes de la tensión de alimentación o picos de tensión. Esto lo podemos programar para que se haga una sola vez, o que se repita en el tiempo 2, 3 o más veces equiespaciadas.

- **LIST mode:** podemos hacer lo mismo que con el PULSE mode, con la diferencia de que en vez de sólo tener un solo transitorio, podemos hacer una lista de hasta tres transitorios distintos encadenados. No utilizaremos este modo de trabajo en este proyecto a que no es necesario.

Se puede apreciar en la figura 22 todo lo comentado anteriormente, a que con un solo vistazo se puede apreciar todo lo dicho anteriormente [23].

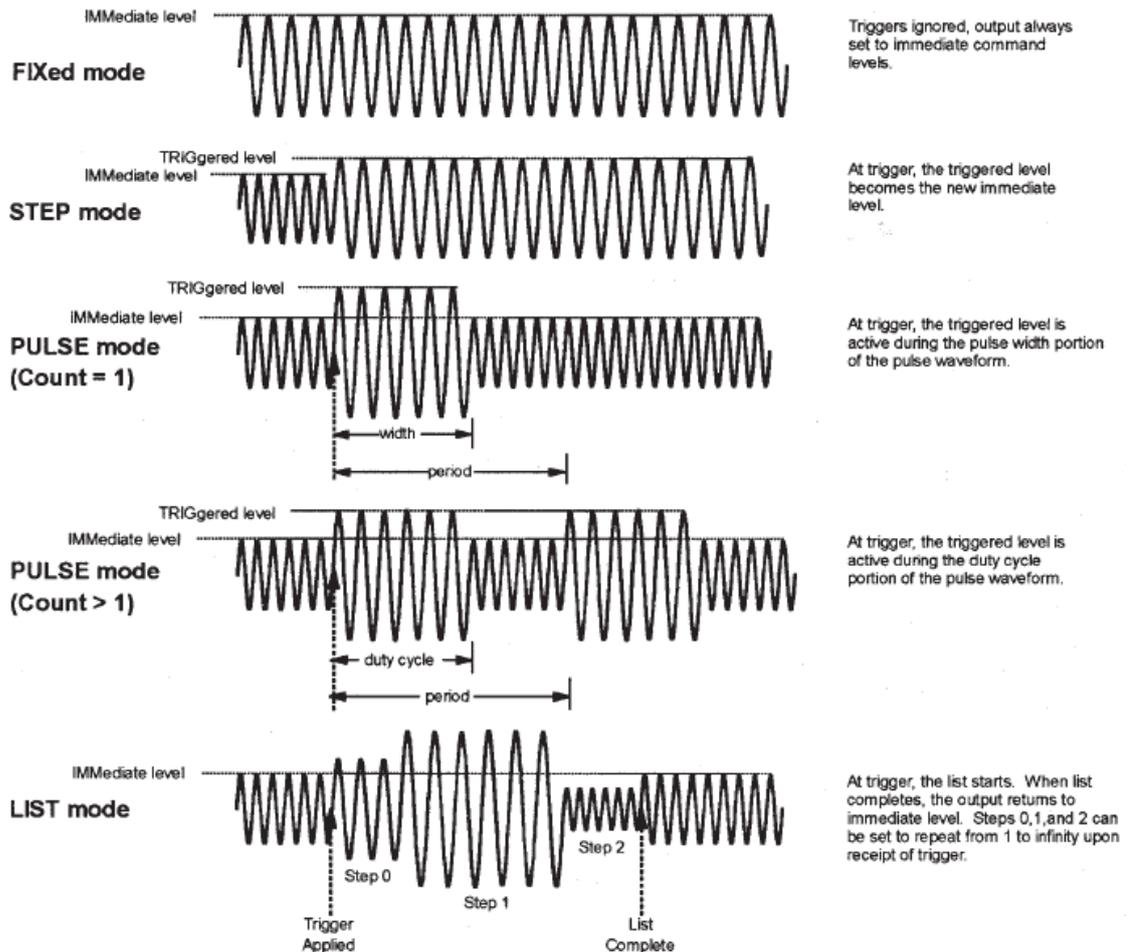


Figura 22: Modos de programación del equipo. Fuente: Guía de programación Agilent para las series 6800.

3.2. Lámparas utilizadas para el ensayo.

Para la realización de este estudio, se han utilizado hasta un total de 16 lámparas, además de un contador digital. Las lámparas utilizadas son de cuatro tipos diferentes ya que las hay LED, microled y compactas fluorescentes con y sin balasto electrónico. No obstante, las podemos agrupar en tan sólo dos grupos según su funcionamiento ya que las compactas fluorescentes son lámparas que funcionan por luminiscencia, y tanto las LED como las microled funcionan por electroluminiscencia. No se ha utilizado ninguna lámpara incandescente pues a efectos prácticos se pueden considerar este tipo de lámparas como una resistencia pura (la bobina es muy pequeña y por tanto el campo magnético creado casi nulo) y es perfectamente conocido su funcionamiento. Se muestra en la figura 23 una foto del panel de pruebas con todas las lámparas colocadas.

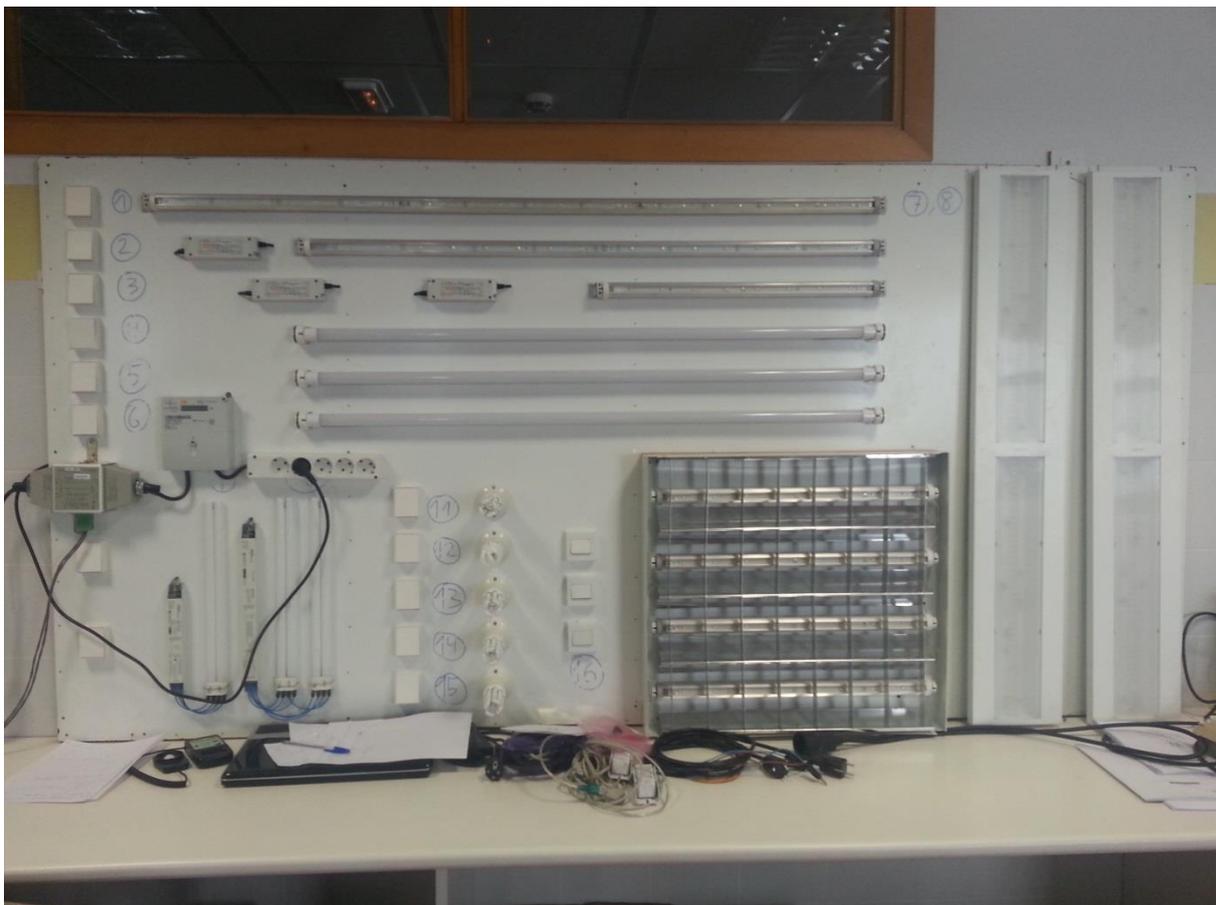


Figura 23: Lámparas utilizadas para el proyecto.

Se observa en la figura 22 una fotografía del panel de trabajo del proyecto donde se puede comprobar que las dieciséis lámparas están colocadas sobre él. Además, a la izquierda del panel, a media altura podemos ver un cajetín con conector verde por debajo. Dicho cajetín corresponde a un shunt externo que dispone la fuente con el cual es capaz de realizar medidas de tensión y corriente que no partan del panel. Así por ejemplo, esto permite la posibilidad de alimentar a las lámparas con la instalación eléctrica del laboratorio directamente y poder hacer exactamente las mismas medidas que con la fuente aunque no se ha utilizado. Justo a la derecha hay un contador digital que será utilizado en una parte del proyecto para medir consumos y compararlos con los medidos por la fuente, la cual sabemos realiza las medidas con mucha más exactitud y en base a ello hacer las deducciones correspondientes. Por último, a la derecha del contador hay una regleta de la cual se alimentan todas las cargas. En el momento en que se hizo la fotografía simplemente había una conexión activa, cuyo conector pertenece a todas las luminarias que hay en el cuadro, es decir, que las alimenta a todas. Esto nos ofrece un panel de pruebas mucho más polivalente para futuros ensayos como por ejemplo compensar el $\cos(\varphi)$ con las bobinas o condensadores disponibles en el laboratorio.



Figura 24: Contador digital utilizado en el proyecto.

El contador utilizado ha sido el contador digital ACE1000 tipo 283A de la marca Actaris (figura 24), el cual está diseñado para la medida del consumo de energía eléctrica para viviendas familiares de una sola fase. La tecnología usada para la medida está basada en un shunt, que no es más que una pequeñísima resistencia que funciona como sensor de corriente, dato que junto con la diferencia de potencial existente entre la fase y el neutro, es enviado a un microcontrolador con un software específico para medir el consumo instantáneo de potencia con gran precisión [25].

Se presenta a modo resumen, en la tabla 1, las características técnicas de todas las lámparas utilizadas.

Lámpara	Tecnología	Potencia (W)	Vida operativa (h) (+90%)	Rendimiento luminoso (Lm/W)	Temperatura color (K)
1	LED	14,3	50000	1340/14,3(94)	4000
2	LED	12,7	50000	1200/12,7(94)	4000
3	LED	7,9	50000	740/7,9(94)	4000
4	Microled	18	50000	1440/18(80)	5500
5	Microled	18	50000	1440/18(80)	5500
6	Microled	18	50000	1440/18(80)	5500
7	LED	36	15000	3400/36(94)	4000
8	LED	36	15000	3400/36(94)	4000
9	CFL	36	10000	2900/36(80)	4000
10	CFL	72	10000	2900/36(80)	4000
11	CFL	20	10000	1200/20(60)	4000
12	CFL	20	10000	1200/20(60)	4200
13	CFL	20	10000	1200/20(60)	4000
14	CFL	20	10000	1200/20(60)	4000
15	CFL	20	10000	1200/20(60)	4000
16	LED		50000		4000

Tabla 1: Parámetros de interés de las lámparas utilizadas.

3.3. Series y transformada de Fourier.

3.3.1. Introducción.

Los circuitos eléctricos en régimen permanente sinusoidal son aquellos cuyas formas de onda se generan en los alternadores de las centrales eléctricas y a los cuales se conectan cargas lineales R-L-C. El cálculo y resolución de este tipo de circuitos se puede realizar mediante el cálculo con números complejos (fasores de tensión y corriente) y su estudio se desprende de un curso básico de teoría de circuitos. Pero es que si bien dicho método de resolución por números complejos para el cálculo de instalaciones eléctricas ha sido más que suficiente hasta hace poco tiempo, debido a que hasta hace unos diez años atrás prácticamente las únicas cargas existentes en una casa solían ser una lavadora, un frigorífico, unas cuantas bombillas incandescentes y un televisor -cuya electrónica era nula o poca-, hoy día está dejando de ser suficiente en las instalaciones eléctricas de cierto tipo locales tales como grandes oficinas con muchos ordenadores e impresoras cuyos diferenciales saltan sin ningún motivo racional aparente a excepción su electrónica interna. Así pues, se producen en instalaciones con muchas cargas no lineales, como puede ser el caso de grandes oficinas, el disparo de magnetotérmicos sin causa aparente alguna. Y la verdad es que se producen por el carácter no lineal de este tipo de cargas que crean ondas de corriente con armónicos, que provocan el disparo de dichos magnetotérmicos debido a que están diseñados para la situación ideal de circuitos en régimen permanente sinusoidal, y por tanto, con cargas lineales.

Así pues, es claro que con el vertiginoso desarrollo de la electrónica en los últimos tiempos y su presencia en todos los hogares y ambientes de trabajo como por ejemplo la regulación de máquinas eléctricas mediante rectificadores y convertidores (cargas no lineales), es claro es ahora más importante que nunca estudiar desde el punto de vista de la calidad eléctrica (y no electrónica interna del dispositivo que ya lo estudian sus diseñadores para su correcto funcionamiento) los efectos que todo este tipo de cargas no lineales tienen en la calidad de la red eléctrica -tanto dentro como fuera de su propia instalación eléctrica-, sin contar con la sustitución de las bombillas tradicionales incandescentes por otras lámparas de bajo consumo que hoy día dominan el mercado, no sólo porque consumen mucho menos aportándonos el mismo flujo luminoso -mucho mayor rendimiento luminoso (Lm/W)-, sino también por su prohibición por parte de la Unión Europea [26].

3.3.2. Series de Fourier.

Todas las ondas producidas por cargas no lineales, si bien no son de carácter sinusoidal, sí que siguen siendo de naturaleza periódica, y una forma de trabajar con ellas es desarrollarlas en series infinitas de funciones sinusoidales tal como establece el teorema de Fourier. Recuerde el lector que una función periódica que depende del tiempo $f(t)$, es aquella que se repite cada T segundos y por tanto que cumple la ecuación número 38.

$$f(t) = f(t + T)$$

Ecuación 38: Función periódica en el tiempo.

Y es que Jean Baptiste Fourier (1768-1830) demostró en su libro *Théorie analytique de la chaleur* (Teoría analítica del calor) en el año 1822 que si se dispone de una función $f(t)$ periódica, ésta se puede desarrollar en una serie infinita de funciones sinusoidales tal como se muestra en la ecuación 39.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

Ecuación 39: Desarrollo de una función periódica no sinusoidal en una serie infinita.

Además, demostró que los coeficientes de la ecuación anterior se determinan por las siguientes integrales, donde es claro que éstas también se pueden realizar en cualquier intervalo de tiempo siempre que tenga una anchura de tiempo igual al periodo T .

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$

Ecuación 40: Coeficientes de Fourier.

Aunque las ecuaciones anteriores se pueden simplificar en el caso de que presenten simetrías, y en base a estas simetrías se pueden clasificar en funciones pares si se cumple $f(t) = f(-t)$, funciones impares si se cumple $f(-t) = -f(t)$, y funciones con simetría de

media onda cuando ésta satisface la ecuación $f(t) = -f(t + T/2)$.

No obstante, en este proyecto lo que haremos es estudiar los efectos de diferentes tipos de lámparas de bajo consumo en la red eléctrica, y si tienen una característica en común, esa es el hecho de que las ondas que generan si bien son estacionarias, no son sinusoidales debido al carácter no lineal de este tipo de cargas por lo que no explicaremos más acerca de las simplificaciones matemáticas que se producen aplicando las Series de Fourier en presencia de simetrías pues en este caso no las habrá.

Si observamos la ecuación número 39, es claro que podemos transformar los términos trigonométricos de la misma frecuencia en términos coseno (o seno) y en base a ello, adaptando dicha ecuación al análisis de una onda de tensión de un circuito disponerla tal como sigue en la ecuación 41, donde U_0 representa la componente de corriente continua (cc) de la onda de tensión, U_n la tensión eficaz del armónico de orden n y α_n el desfase de la onda respecto al origen de tiempos.

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t + \alpha_n)$$

Ecuación 41: Valor de la tensión en régimen permanente no sinusoidal en base a sus armónicos.

Y ahora, para una impedancia cuyo argumento vale φ_n , podemos hacer análoga descomposición para la intensidad de corriente tal como se muestra en la ecuación 22.

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega t + \alpha_n - \varphi_n)$$

Ecuación 42: Valor de la intensidad de corriente en régimen permanente no sinusoidal en base a sus armónicos.

En la que en base a la Ley de Ohm tal y como la aplicamos para circuitos en régimen estacionario no sinusoidal, la relación entre la tensión y la intensidad vendrá dada por las siguientes ecuaciones donde Z representa el valor del módulo de la impedancia y φ su argumento. Las ecuaciones 24 y 26 se siguen usando para calcular el valor eficaz de la onda [26][27].

$$I_0 = \frac{U_0}{Z(0)} ; I_n = \frac{U_n}{Z(n\omega)} ; \varphi = \arctg\left(\frac{\text{Im}[Z(n\omega)]}{\text{Re}[Z(n\omega)]}\right) ;$$

Ecuación 43: Relación entre tensión y corriente de cada armónico.

3.3.3. Forma compleja de la serie de Fourier.

Sabemos ahora que la amplitud de cada componente de frecuencia depende tanto de a_n como de b_n , es decir, tanto del término seno como del término coseno de la ecuación 39. Por tanto, la expresión exacta de la amplitud de cada componente de frecuencia es $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, lo que también se puede obtener directamente al utilizar una forma de la serie de Fourier en la que cada término es una función seno (o coseno) con un ángulo de fase.

No obstante, se pueden expresar los senos y cosenos de la ecuación 39 como funciones exponenciales tal como se expresa en la ecuación 44, y sustituyendo en la ecuación la ecuación 39 obtenemos la ecuación 45.

$$\text{sen}(n\omega t) = \frac{e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}}{2j} ; \text{cos}(n\omega t) = \frac{e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}}{2} ;$$

Ecuación 44: Representación en forma compleja de las funciones trigonométricas seno y coseno.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(e^{jn\omega t} \frac{a_n - jb_n}{2} + e^{-jn\omega t} \frac{a_n + jb_n}{2} \right)$$

Ecuación 45: Desarrollo de una función periódica no sinusoidal en una serie infinita en forma compleja.

A partir de lo cual haciendo $c_0 = a_0$ y $c_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n)$, podemos llegar a la ecuación 46 que representa la forma exponencial de la serie de Fourier, la que nos permite analizar funciones periódicas en el tiempo a través de la descomposición de dicha función en una suma infinita de funciones sinusoidales mucho más simples, y así por ejemplo, calcular los armónicos correspondientes a cada una de las frecuencias múltiplos enteros de la fundamental.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \text{ siendo } c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} dt$$

Ecuación 46: Forma exponencial de la serie de Fourier.

Si construimos una gráfica donde representemos los coeficientes c_n en el eje de ordenadas, frente a su frecuencia angular ω correspondiente en el eje de abscisas, tal y como se aprecia en la figura 25, a ese resultado se le llama **espectro de amplitud** de $f(t)$ [26].

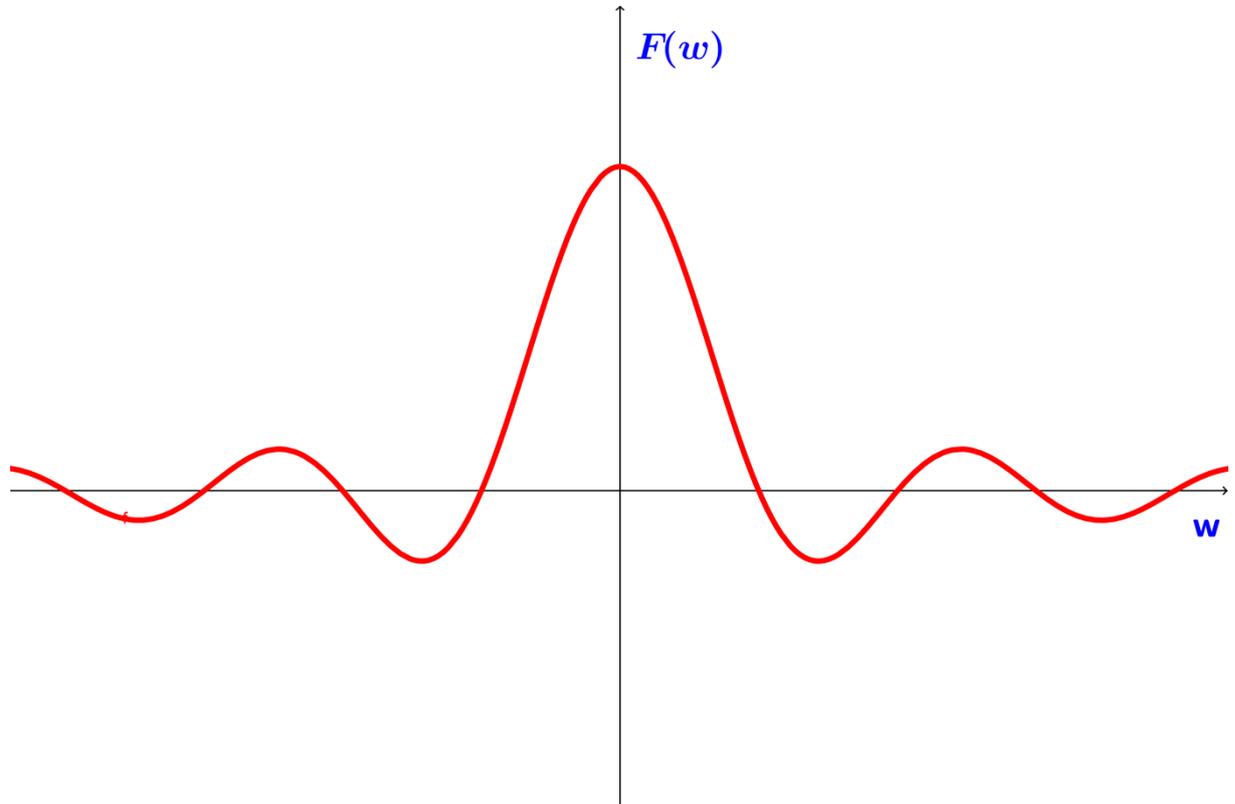


Figura 25: Espectro de amplitud.

3.3.4. Transformada de Fourier.

La transformada de Fourier (DFT) transforma una función en el dominio del tiempo en una representación en el dominio de la frecuencia, y por tanto hace corresponder a una función con valores complejos. Y es que mientras que con las series de Fourier lo que se hace es descomponer una función periódica en el tiempo como suma de otras más sencillas suma de términos seno y coseno, con la transformada de Fourier obtenemos una representación en el dominio de la frecuencia a partir de una función en el dominio del tiempo. Además, a diferencia con las series de Fourier cuyo único requerimiento de entrada era una función periódica en el dominio del tiempo, la transformada de Fourier requiere como entrada una función que sea una secuencia discreta de duración finita. Así pues, sea $f(t)$ una función localmente integrable, que depende del tiempo y cuyo valor absoluto de la integral esté acotado en \mathfrak{R} , se define su transformada de Fourier como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Ecuación 47: Transformada de Fourier.

Siendo su anti-transformada o transformada inversa:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

Ecuación 48: Transformada inversa de Fourier.

Estas expresiones nos permiten calcular la expresión $F(\omega)$ en el dominio de la frecuencia a partir de $f(t)$ en el dominio del tiempo (Transformada de Fourier) o viceversa (Transformada inversa de Fourier). Y aunque no todas las funciones matemáticas poseen transformada de Fourier, esto si ocurre en ingeniería eléctrica debido que es condición necesaria pero a la vez suficiente para que una función posea transformada de Fourier que $f(t)$ sea de cuadrado sumable.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$$

Ecuación 49: Condición necesaria y suficiente para que exista la transformada de Fourier.

Con la transformada de Fourier, obtendremos también el mismo espectro de amplitud de la figura 25 [26].

3.3.5. Transformada discreta de Fourier.

Cuando la función $f(t)$ está dada por una lista de N valores $f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_N)$, se dice que está **discretizada o muestreada**, y entonces la integral que define la transformada de Fourier (ecuación 47), se convierte en la sumatoria de la ecuación número 50, donde k es la frecuencia discreta.

$$F(n) = \sum_{k=1}^N f(t_k) e^{-j \frac{2\pi n}{N} (k-1)}$$

Ecuación 50: Transformada discreta de Fourier.

La transformada discreta de Fourier (DFT) requiere el cálculo de N funciones exponenciales para obtener $F(n)$, lo cual conlleva a un esfuerzo de cálculo enorme para un número de muestras grande (N grande).

Como consecuencia de lo anterior, se han desarrollado métodos que permiten ahorrar cálculos y así evaluar de manera rápida la transformada discreta de Fourier, métodos los cuales se denominan **transformada rápida de Fourier** los cuales trataremos a continuación [26].

3.3.6. Transformada rápida de Fourier.

La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo que reduce el tiempo de cálculo de la transformada de Fourier de n^2 pasos a $n \log_2(n)$ siendo el único requisito para ello el que el número de puntos de la serie sea una potencia de 2, es decir, que contenga 2^n puntos.

Las fórmulas con las que MATLAB calcula la transformada rápida de Fourier son las que siguen para la transformada de Fourier.

$$X(k) = \sum_{i=1}^N x(i) w_N^{(i-1)(k-1)} \quad \text{siendo} \quad w_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

Ecuación 51: Transformada rápida de Fourier.

Y análogamente que ocurría con al transformada de Fourier, también existe otra expresión para el cálculo de la transformada rápida inversa de Fourier que se presenta en la ecuación 52, aunque no será de interés en este estudio.

$$x(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) w_N^{-(i-1)(k-1)}$$

Ecuación 52: Transformada rápida inversa de Fourier.

Supongamos que tenemos una señal descrita por un conjunto de N (potencia de base dos) pares de datos (t_i, x_i) igualmente espaciados en el tiempo por un intervalo Δt desde $t=0$ hasta $t_{\text{final}}=(n-1) \Delta t$. Pues bien, a la inversa de ese intervalo de tiempo con que se toman los datos Δt se denomina frecuencia de muestreo f_s .

Ahora, la función `fft` de MATLAB convierte el vector de valores de la señal x en función del tiempo t , en un vector g en función de la frecuencia w , es decir, $g(w)=\text{fft}(x)$, donde g es un vector cuyos elementos son números complejos porque éste guarda información tanto a cerca de la amplitud como de la fase.

Pues bien, entonces ahora habrá que asociar cada elemento del vector g con una frecuencia, del mismo modo que hemos asociado cada elemento del vector x con un tiempo. Para ello, la manera más fácil de entender lo que hemos de hacer es gráficamente por lo que así lo haremos.

El intervalo de frecuencias es $\Delta\omega=2\pi/(n\Delta t)=2\pi f_s/n$ de modo que la primera frecuencia es 0 y la máxima es $\omega_{\max}=2\pi f_s(n-1)/n$. Y si ahora representamos el espectro de amplitud en función de la frecuencia obtendremos algo similar a lo mostrado en la figura 26.

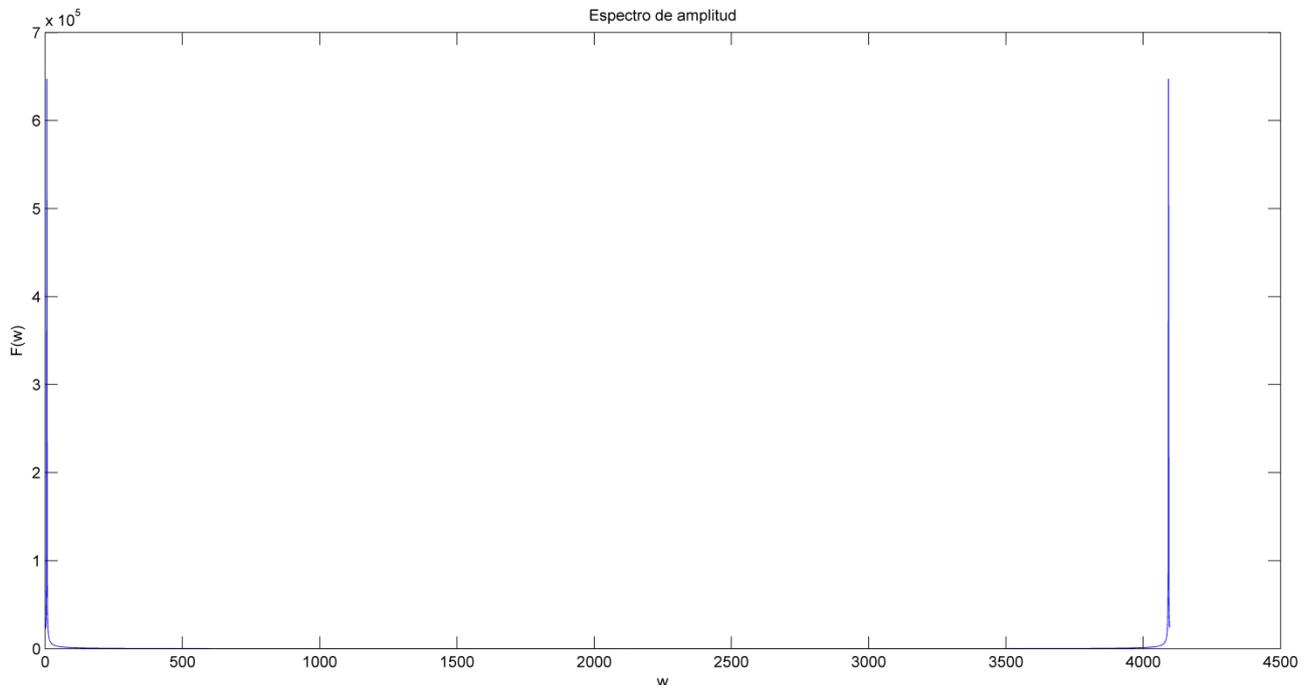


Figura 26: Resultado de la transformada rápida de Matlab.

Pero resulta que la transformada de Fourier de cualquier señal tiene un número igual de frecuencias positivas que negativas tal que $F(\omega)=F(-\omega)$ aunque en la figura 26 solo vemos las frecuencias positivas, y no la parte negativa del espectro. Pues bien, lo que hemos de hacer con los datos de dicha gráfica es partirlos en dos y cambiarlos de lado, es decir, colocar a la izquierda la parte de la gráfica que se queda a la derecha (sin invertir el sentido de colocación) y colocar a la derecha la parte de la gráfica que se queda a la izquierda. Y justo entonces, en la mitad de la gráfica estará la frecuencia cero, a la derecha las frecuencias positivas con sus respectivas amplitudes, y a la izquierda las frecuencias negativas con sus respectivas amplitudes tal como se muestra en la figura 27.

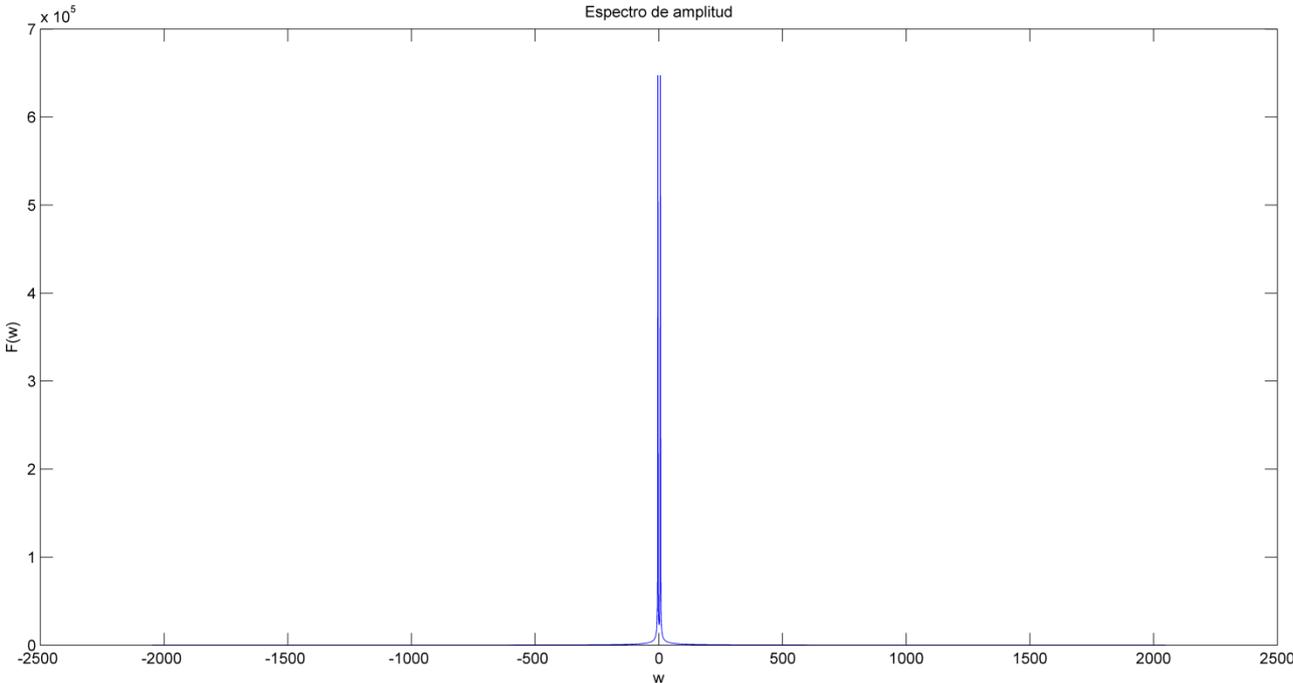


Figura 27: Espectro de amplitud de la transformada rápida de Matlab.

Se muestra en la figura 28 una vista en detalle de la sección central donde se puede apreciar su simetría.

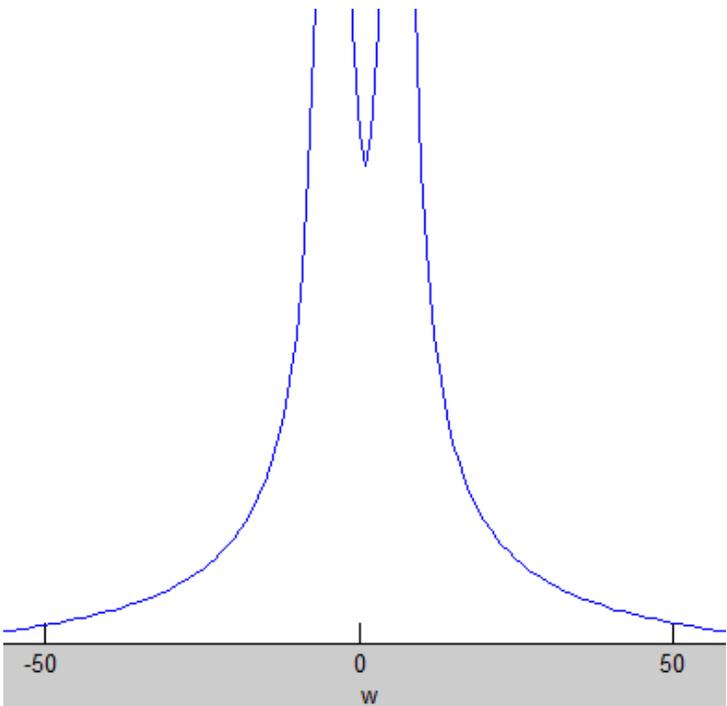


Figura 28: Detalle de la zona central de la figura 27.

Ahora bien, lo que nos interesa en ingeniería eléctrica no es el espectro de amplitud exactamente, sino los diferentes armónicos. Por ejemplo, en una red eléctrica de frecuencia fundamental de 50Hz (no es el caso de las figuras 26-28), habrá que hallar la amplitud de la onda a 50, 100, 150, ... y hasta $50n$ siendo n el orden del último armónico que nos interesa conocer, y pudiendo ser por supuesto $n=0$ para la componente de corriente continua [26].

3.3.7. Función de Gauss.

Hemos podido apreciar en las figuras 26 y 27 que el espectro de amplitud de la transformada de Fourier está centrado, es decir, si partimos la gráfica por la mitad hay simetría. Pues bien, la transformada de Fourier no se ve afectada por la posición del centro del pulso t_0 . Por tanto, siempre hay simetría y se cumple que $F(w)=F(-w)$.

Por otra parte, es algo lógico pues sabemos que obtenemos los armónicos a partir del espectro de amplitud de la función. Y es que no cabría lugar a dudas de que si tomamos dos fotografías distintas de una misma forma de onda tal como se muestra en la figura 28, sólo que con distinto origen de tiempos, es claro que el valor de los armónicos sólo depende de las propiedades periódicas de la función y que ambos resultados serán los mismos [26].

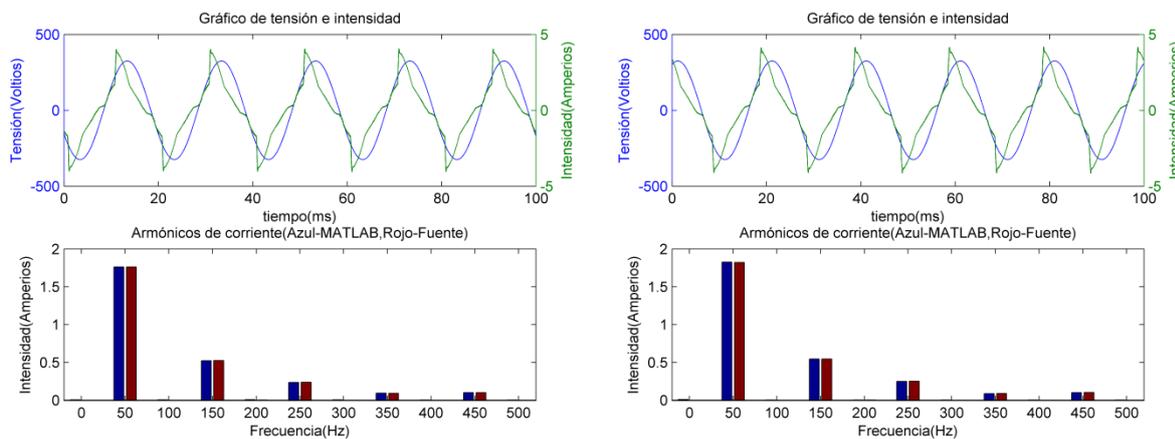


Figura 29: Simetría de la transformada de Fourier.

Capítulo 4. Ensayos y resultados.

Se pretende en este capítulo presentar todos los ensayos realizados en este proyecto de investigación de cara a cumplir los objetivos mencionados en el capítulo 1 del presente texto. Además, según se muestra a continuación, se han agrupado los ensayos en cinco grupos, y aunque en algún caso alguno de esos grupos puede contener un único ensayo, no será así por lo general, conteniendo estos grupos un gran número de ensayos.

4.1. Condiciones normales de alimentación.

Tal y como se comentó en el capítulo 3, se dispone de un total de 16 lámparas de diferente tipología (LED, microled y CFL) para realizar los ensayos. Pues bien, en este apartado lo que se hace es poner a funcionar por separado cada una de esas 16 lámparas bajo “condiciones normales de alimentación” (alimentación con tensión alterna sinusoidal de frecuencia 50Hz) y a partir de ahí obtener diferentes parámetros de interés eléctrico (valor eficaz de la tensión, valor eficaz de la corriente, potencia activa, reactiva, aparente, y de distorsión, intensidad total de armónicos, $\cos(\varphi)$, factor de potencia, tasa de distorsión armónica en intensidad, pico de corriente máximo y frecuencia de la señal), además de calcular todos los armónicos con la transformada rápida de Fourier y graficar los resultados.

Así pues, tal y como se muestra a continuación, se presentará para cada una de esas dieciséis lámparas en primer lugar una gráfica que representa las ondas de tensión e intensidad de corriente en función del tiempo, después (justo debajo) un gráfico de barras donde se muestra el valor de cada armónico tanto el que nos proporciona la fuente (rojo) como el que calculamos con MATLAB (azul), y por último, cada uno de los parámetros eléctricos mencionados anteriormente en una tabla justo debajo de las gráficas.

4.1.1. Lámpara 1.

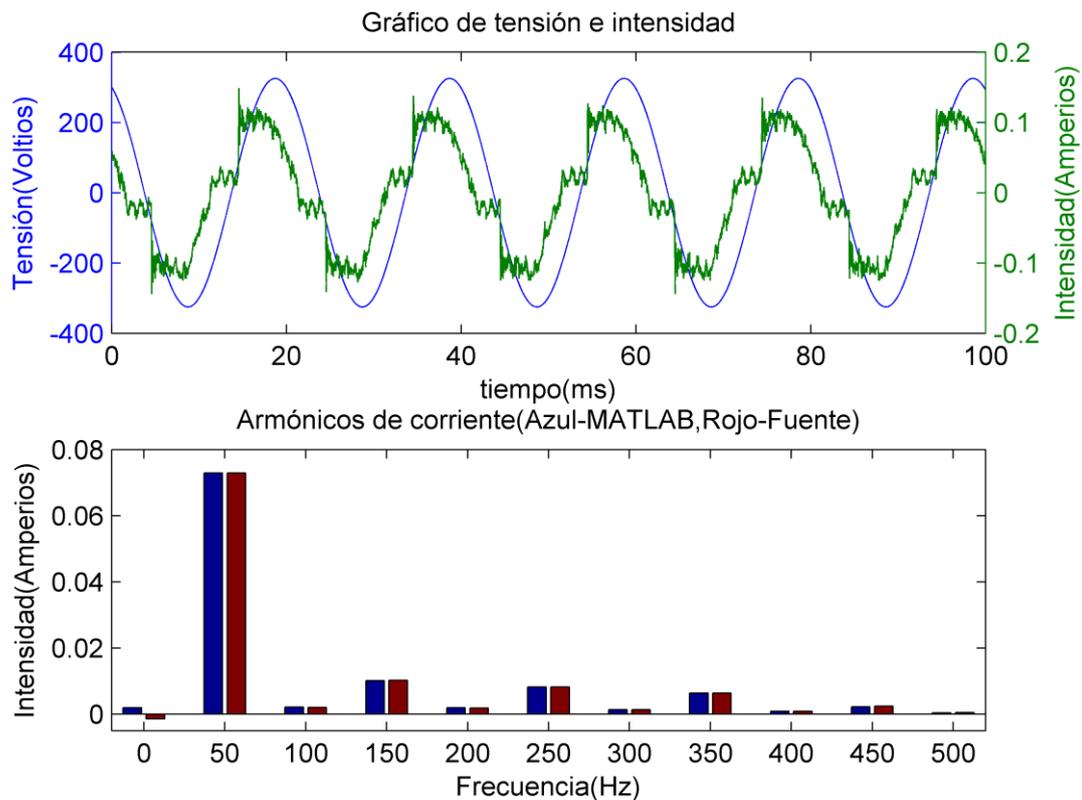


Figura 30: Gráfico de la lámpara 1.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,11	0,07
$I_{rms}(A)$	0,0753	0,0753	0,00
$P(W)$	14,33	14,33	0,00
$Q(VAr)$	9,72	-8,70	11,72
$D(VAd)$	-	3,84	-
$S(VA)$	17,32	17,20	0,70
$I_{max}(A)$	0,1488	0,1488	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,85	-
f_{dp}	0,83	0,83	0,00
THDi	0,25	0,23	8,70
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 2: Parámetros eléctricos de la lámpara 1.

4.1.2. Lámpara 2.

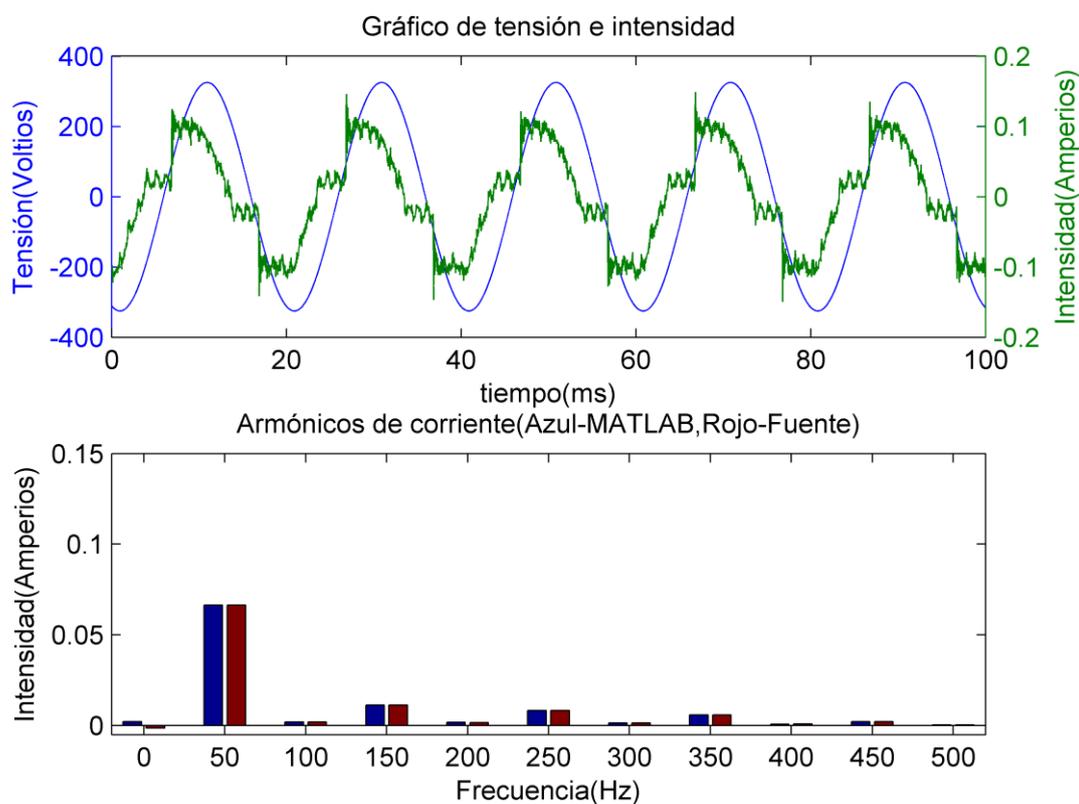


Figura 31: Gráfico de la lámpara 2.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,15	0,08
$I_{rms}(A)$	0,0691	0,0692	0,14
$P(W)$	12,72	12,72	0,00
$Q(VAr)$	9,52	-8,42	13,06
$D(VAd)$	-	3,94	-
$S(VA)$	15,86	15,76	0,63
$I_{max}(A)$	0,1491	0,1488	0,20
$\cos(\varphi)$	-	0,83	-
f_{dp}	0,80	0,81	1,23
$THDi$	0,28	0,26	7,69
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 3: Parámetros eléctricos para lámpara 2.

4.1.3. Lámpara 3.

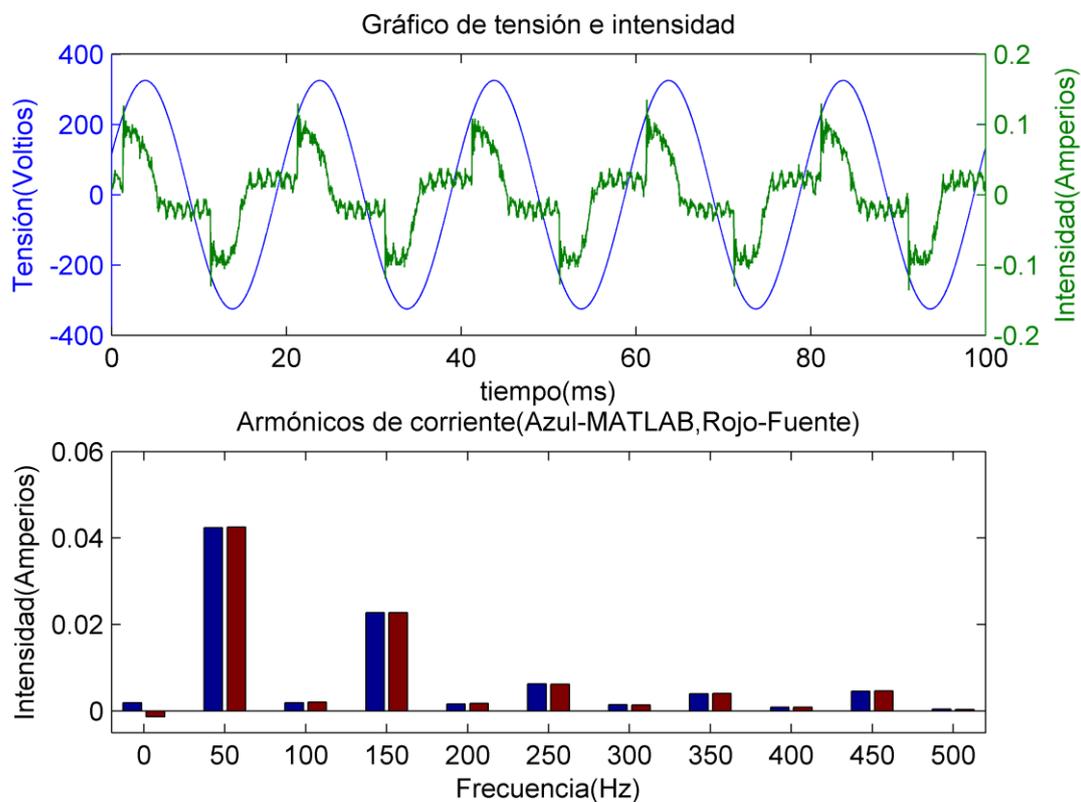


Figura 32: Gráfico de la lámpara 3.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,80	0,07
$I_{rms}(A)$	0,0502	0,0502	0,00
$P(W)$	7,85	7,85	0,00
$Q(VAr)$	8,47	-5,84	45,03
$D(VAd)$	-	5,83	-
$S(VA)$	11,55	11,39	1,40
$I_{max}(A)$	0,1356	0,1353	0,22
$\cos(\varphi)$	-	0,80	-
f_{dp}	0,68	0,69	1,45
$THDi$	0,53	0,60	11,67
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 4: Parámetros eléctricos para lámpara 3.

4.1.4. Lámpara 4.

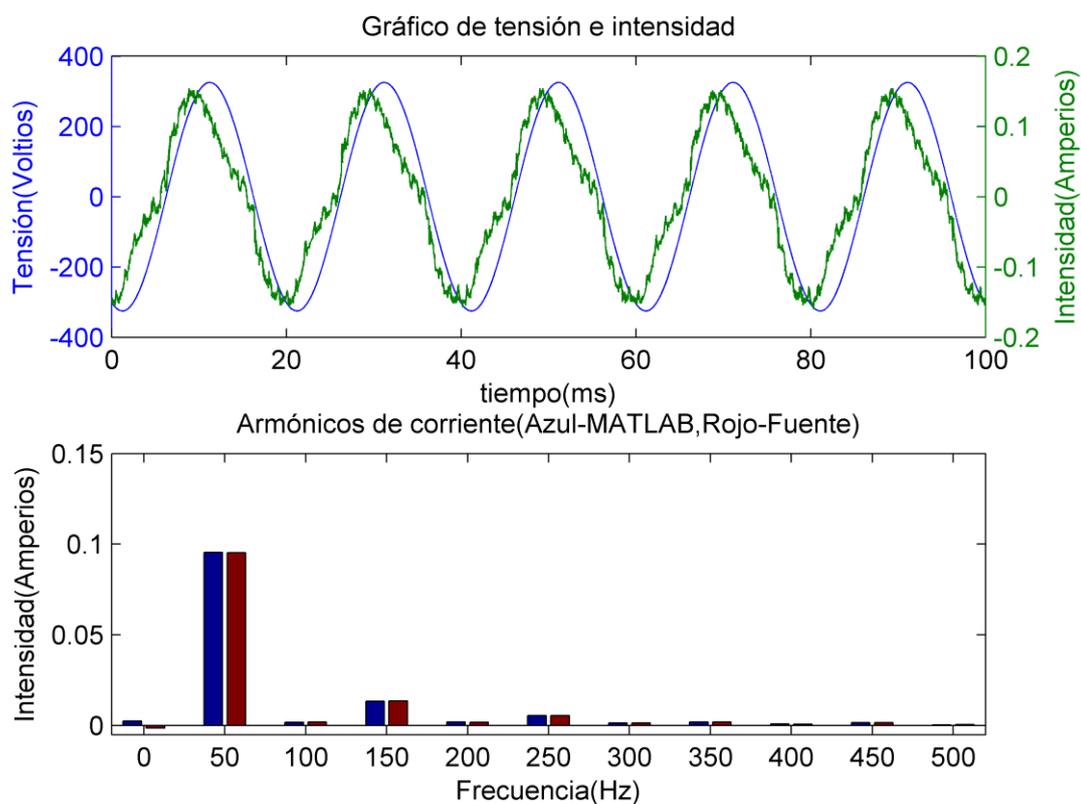


Figura 33: Gráfico de la lámpara 4.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,13	0,07
$I_{rms}(A)$	0,0968	0,0970	0,21
$P(W)$	20,07	20,07	0,00
$Q(VAr)$	9,64	-8,82	9,30
$D(VAd)$	-	3,54	-
$S(VA)$	22,26	22,21	0,23
$I_{max}(A)$	0,1599	0,1542	3,70
$\cos(\varphi)$	-	0,92	-
f_{dp}	0,90	0,90	0,00
$THDi$	0,17	0,16	6,25
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 5: Parámetros eléctricos para lámpara 4.

4.1.5. Lámpara 5.

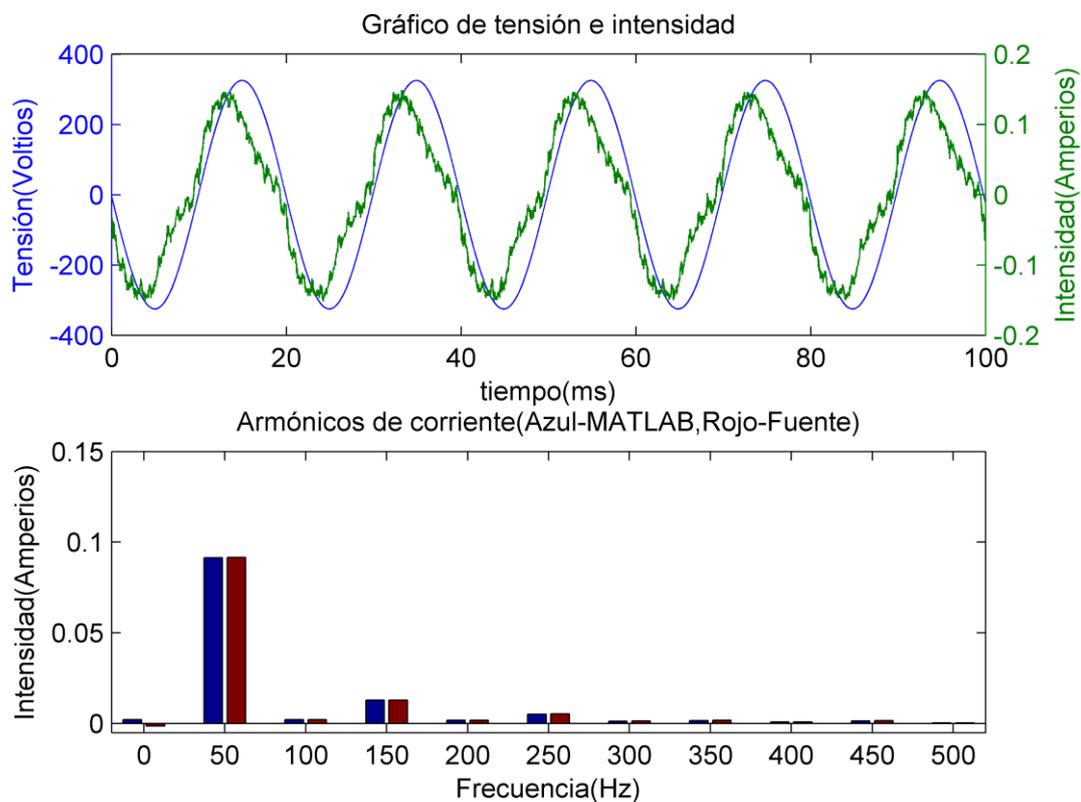


Figura 34: Gráfico de la lámpara 5.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,73	0,10
$I_{rms}(A)$	0,0930	0,0930	0,00
$P(W)$	19,25	19,26	0,05
$Q(VAr)$	9,33	-8,55	9,12
$D(VAd)$	-	3,39	-
$S(VA)$	21,39	21,34	0,23
$I_{max}(A)$	0,1518	0,1488	2,02
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
f_{dp}	0,90	0,90	0,00
THDi	0,17	0,16	6,25
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 6: Parámetros eléctricos para lámpara 5.

4.1.6. Lámpara 6.

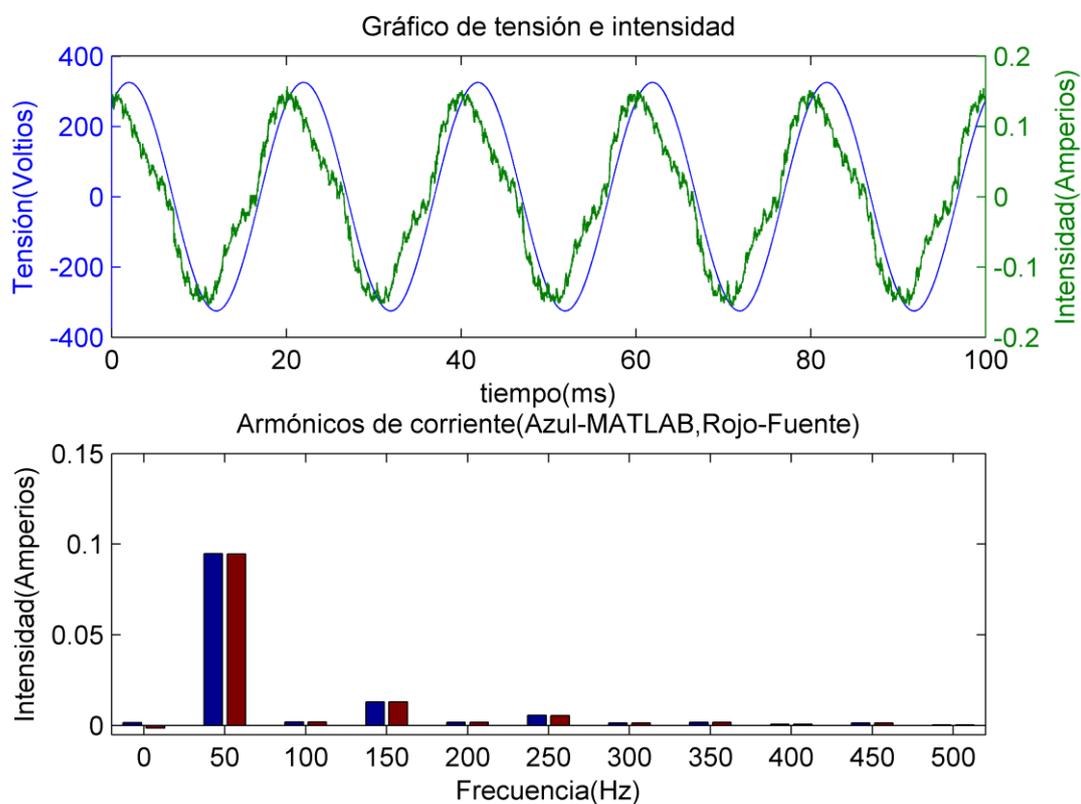


Figura 35: Gráfico de la lámpara 6.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,04	0,03
$I_{rms}(A)$	0,0960	0,0961	0,10
$P(W)$	19,97	19,97	0,00
$Q(VAr)$	9,43	-8,63	9,27
$D(VAd)$	-	3,44	-
$S(VA)$	22,09	22,03	0,27
$I_{max}(A)$	0,1569	0,1569	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,92	-
f_{dp}	0,90	0,91	1,10
$THDi$	0,17	0,16	6,25
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 7: Parámetros eléctricos para lámpara 6.

4.1.7. Lámpara 7.

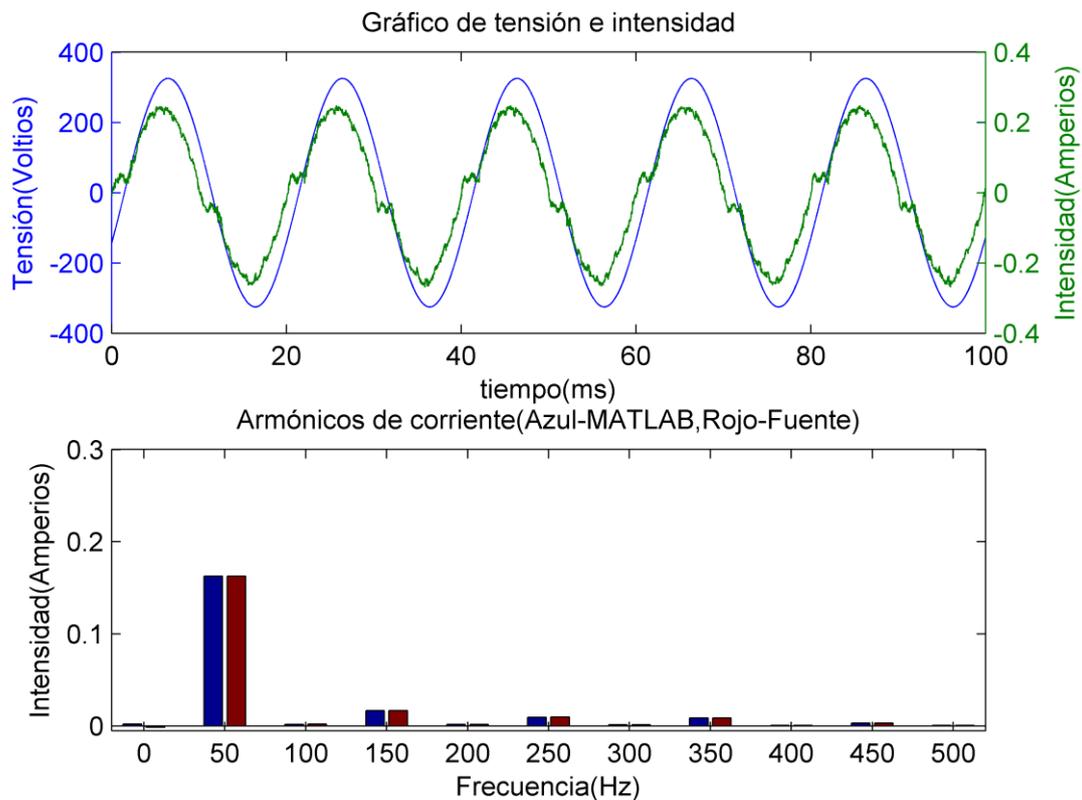


Figura 36: Gráfico de la lámpara 7.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,81	0,07
$I_{rms}(A)$	0,1642	0,1641	0,06
$P(W)$	36,24	36,24	0,00
$Q(VAr)$	10,63	-9,24	15,04
$D(VAd)$	-	4,99	-
$S(VA)$	37,77	37,73	0,11
$I_{max}(A)$	0,2683	0,2490	7,75
$\cos(\varphi)$	-	0,97	-
f_{dp}	0,96	0,96	0,00
$THDi$	0,14	0,13	7,69
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 8: Parámetros eléctricos para lámpara 7.

4.1.8. Lámpara 8.

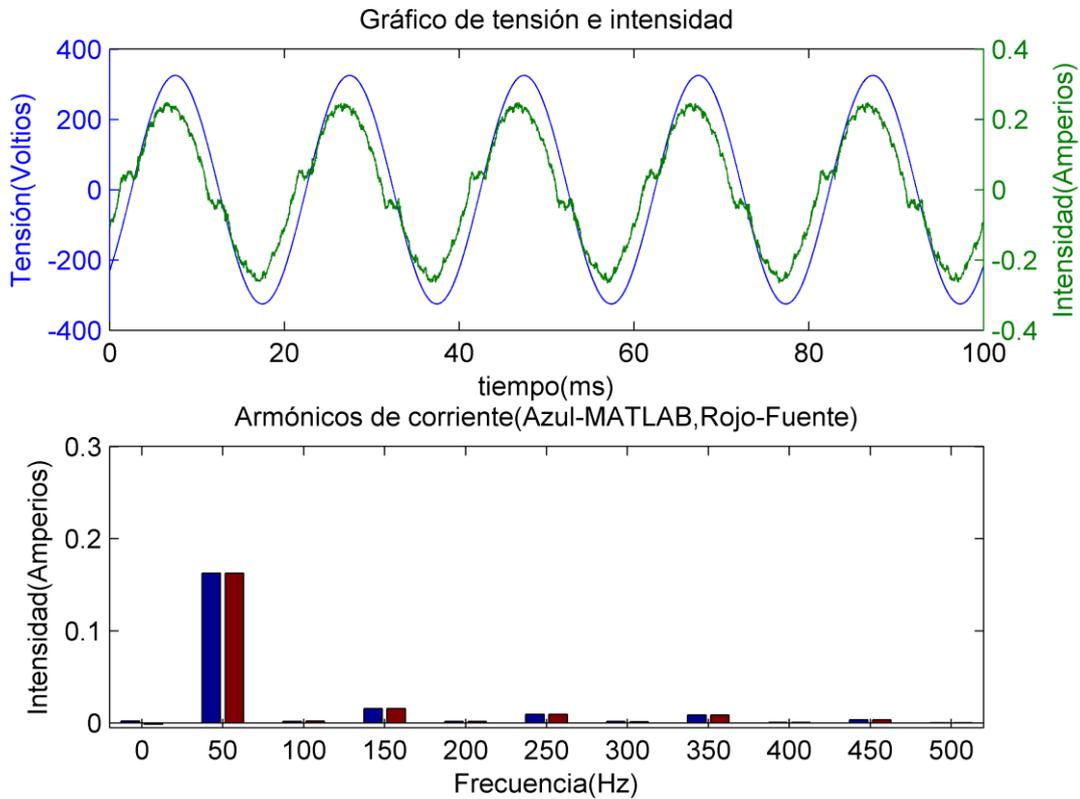


Figura 37: Gráfico de la lámpara 8.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,95	0,00
$I_{rms}(A)$	0,1643	0,1642	0,06
$P(W)$	36,27	36,27	0,00
$Q(VAr)$	10,56	-9,23	14,41
$D(VAd)$	-	4,86	-
$S(VA)$	37,78	37,74	0,11
$I_{max}(A)$	0,2656	0,2490	6,67
$\cos(\varphi)$	-	0,97	-
f_{dp}	0,96	0,96	0,00
THDi	0,14	0,13	7,69
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 9: Parámetros eléctricos para lámpara 8.

4.1.9. Lámpara 9.

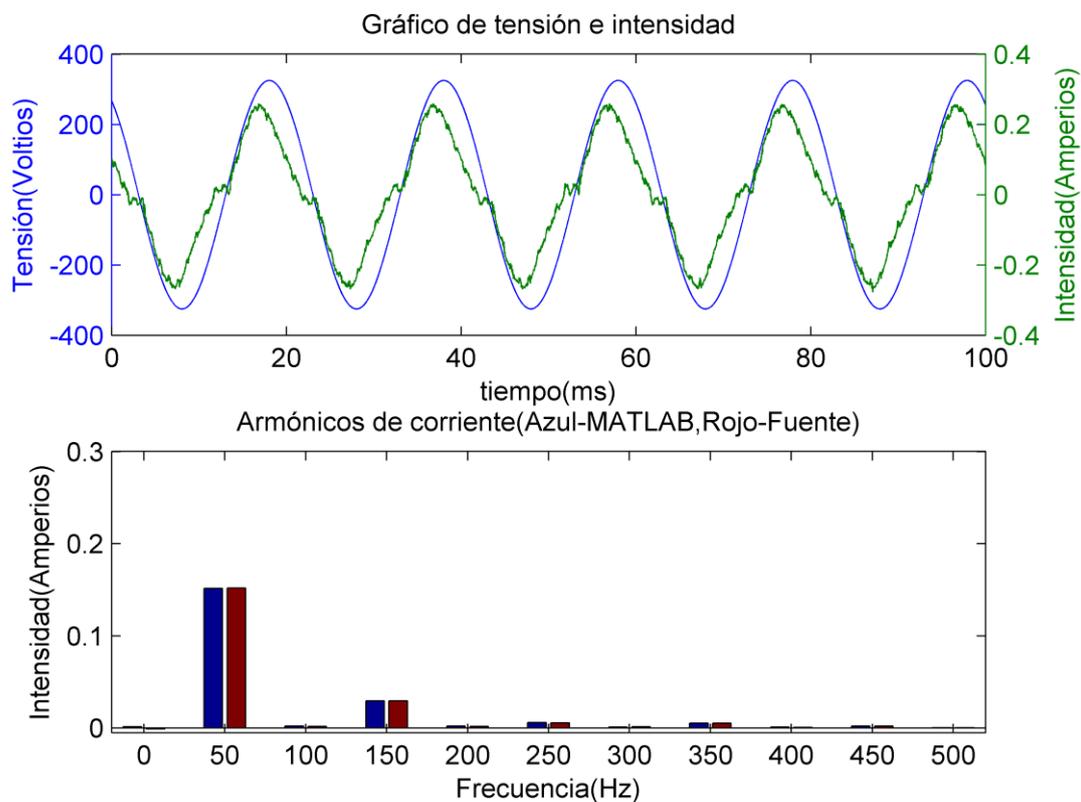


Figura 38: Gráfico de la lámpara 9.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,03	0,03
$I_{rms}(A)$	0,1549	0,1549	0,00
$P(W)$	33,47	33,47	0,00
$Q(VAr)$	12,21	-9,81	24,46
$D(VAd)$	-	7,09	-
$S(VA)$	35,63	35,60	0,08
$I_{max}(A)$	0,2764	0,2599	6,35
$\cos(\varphi)$	-	0,96	-
f_{dp}	0,94	0,94	0,00
THDi	0,20	0,20	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 10: Parámetros eléctricos para lámpara 9.

4.1.10. Lámpara 10.

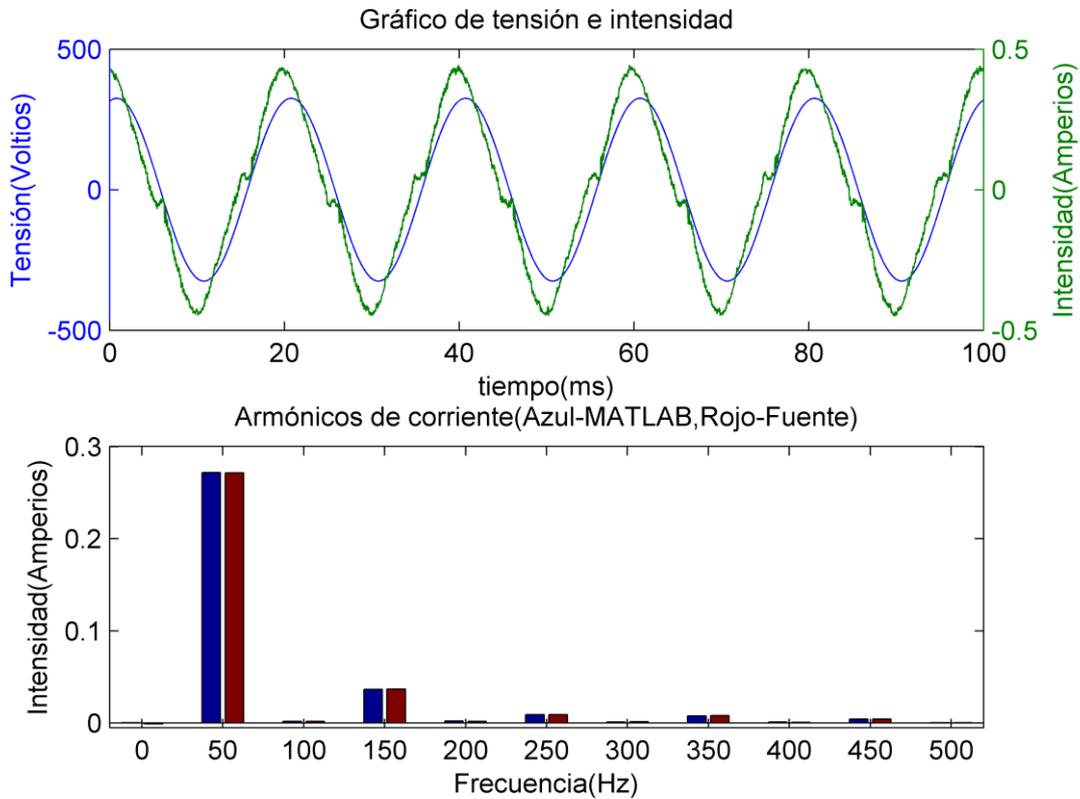


Figura 39: Gráfico de la lámpara 10.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,16	0,09
$I_{rms}(A)$	0,2744	0,2748	0,15
$P(W)$	60,38	60,37	0,02
$Q(VAr)$	18,35	-15,84	15,85
$D(VAd)$	-	9,05	-
$S(VA)$	63,11	63,06	0,08
$I_{max}(A)$	0,4497	0,44	2,20
$\cos(\varphi)$	-	0,97	-
f_{dp}	0,96	0,96	0,00
$THDi$	0,15	0,14	7,14
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 11: Parámetros eléctricos para lámpara 10.

4.1.11. Lámpara 11.

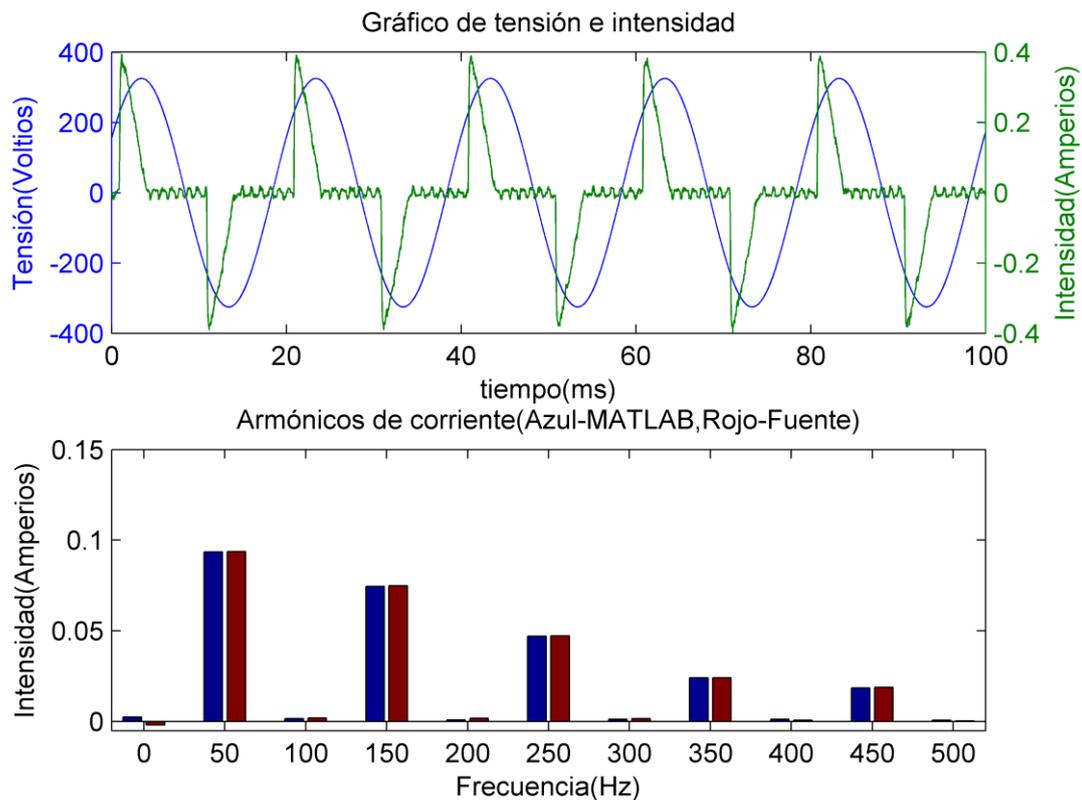


Figura 40: Gráfico de la lámpara 11.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,84	0,05
$I_{rms}(A)$	0,1372	0,1371	0,07
$P(W)$	19,56	19,55	0,05
$Q(VAr)$	24,75	-9,03	174,09
$D(VAd)$	-	22,91	-
$S(VA)$	31,55	31,44	0,35
$I_{max}(A)$	0,3983	0,3953	0,76
$\cos(\varphi)$	-	0,9079	-
f_{dp}	0,62	0,62	0,00
$THDi$	0,73	1,06	31,13
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 12: Parámetros eléctricos para lámpara 11.

4.1.12. Lámpara 12.

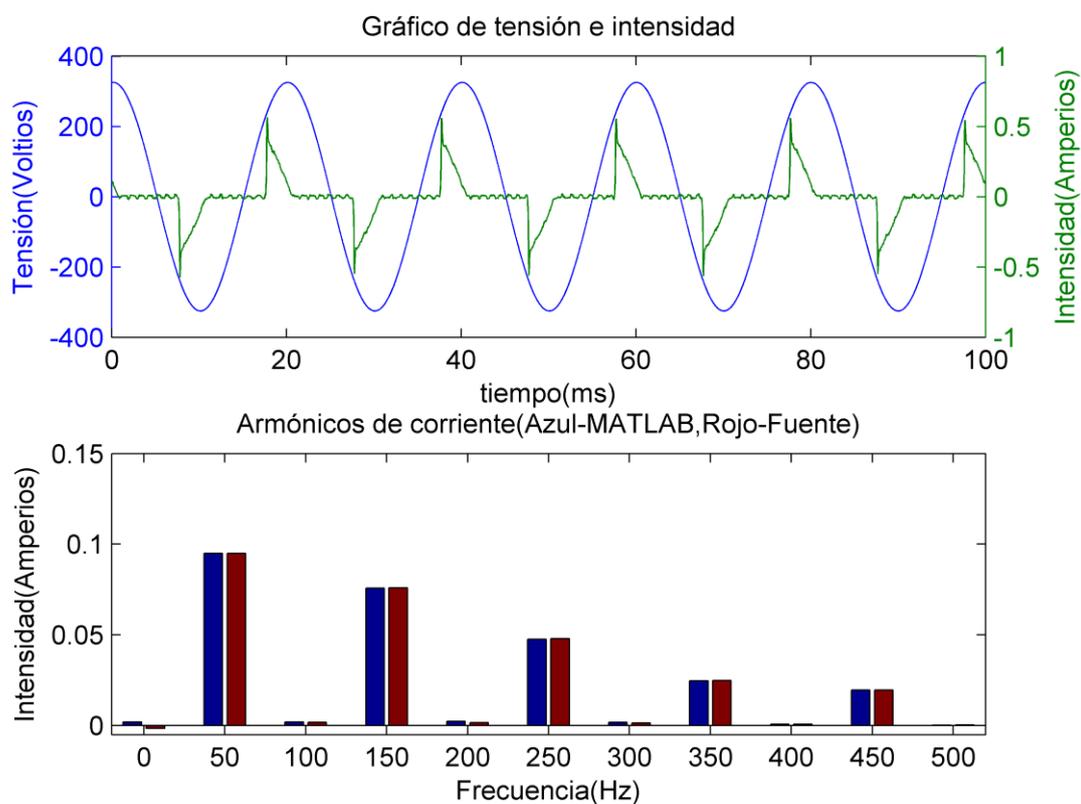


Figura 41: Gráfico de la lámpara 12.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,19	0,10
$I_{rms}(A)$	0,1424	0,1423	0,07
$P(W)$	19,82	19,81	0,05
$Q(VAr)$	26,08	-9,16	184,72
$D(VAd)$	-	24,04	-
$S(VA)$	32,76	32,47	0,89
$I_{max}(A)$	0,5716	0,5659	1,01
$\cos(\varphi)$	-	0,9078	-
f_{dp}	0,60	0,61	1,64
$THDi$	0,75	1,10	31,82
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 13: Parámetros eléctricos para lámpara 12.

4.1.13. Lámpara 13.

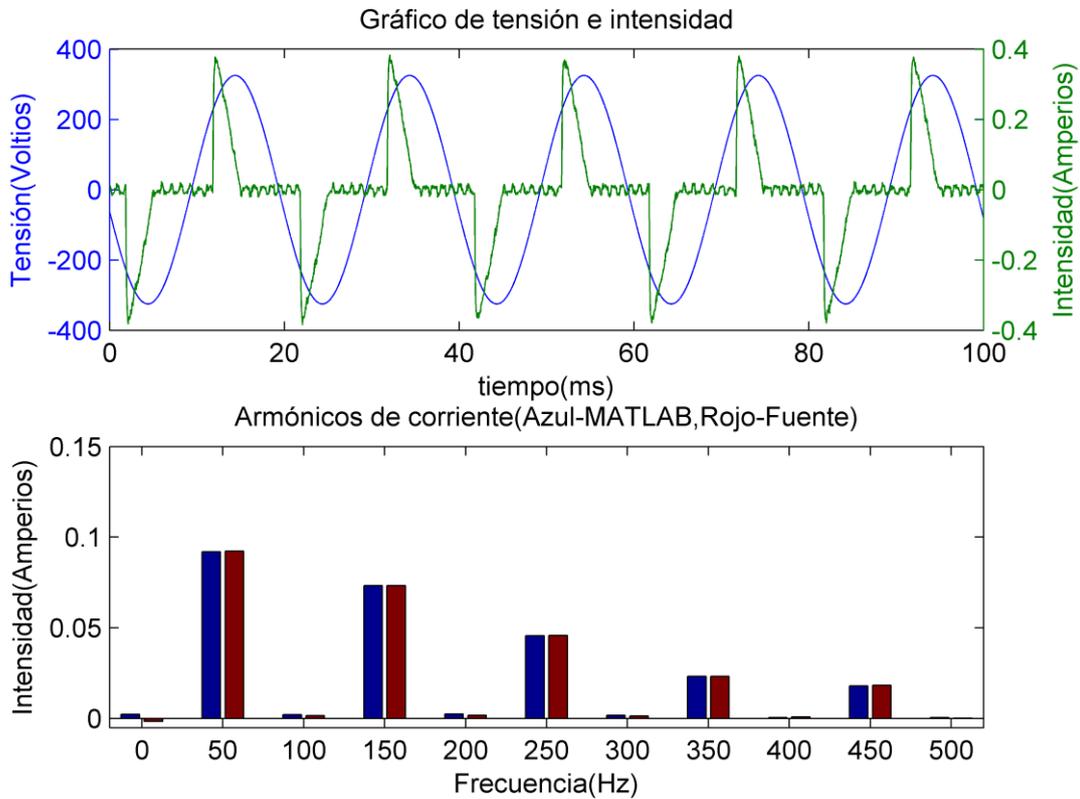


Figura 42: Gráfico de la lámpara 13.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,75	0,09
$I_{rms}(A)$	0,1346	0,1345	0,07
$P(W)$	19,44	19,25	0,99
$Q(VAr)$	24,25	-8,95	170,95
$D(VAd)$	-	22,39	-
$S(VA)$	30,95	30,85	0,32
$I_{max}(A)$	0,3847	0,3844	0,08
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
fdp	0,62	0,62	0,00
$THDi$	0,73	1,06	31,13
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 14: Parámetros eléctricos para lámpara 13.

4.1.14. Lámpara 14.

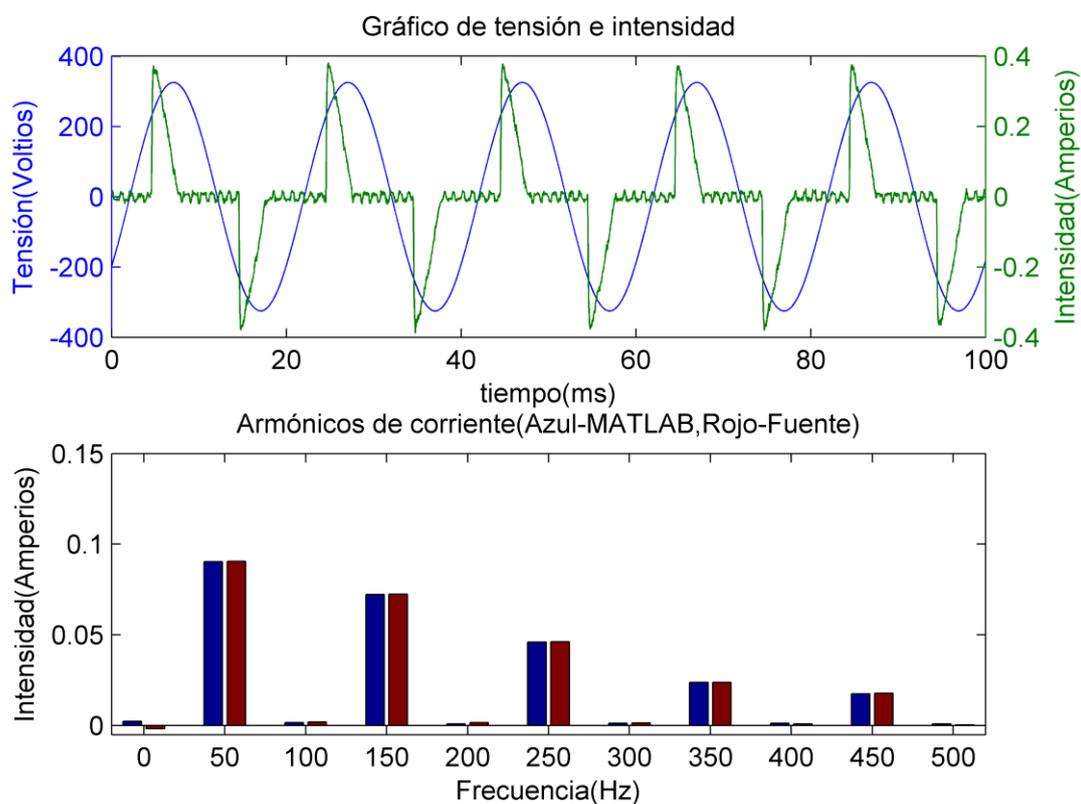


Figura 43: Gráfico de la lámpara 14.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,89	0,03
$I_{rms}(A)$	0,1331	0,1330	0,08
$P(W)$	18,96	18,96	0,00
$Q(VAr)$	24,03	-8,64	178,13
$D(VAd)$	-	22,29	-
$S(VA)$	30,61	30,51	0,33
$I_{max}(A)$	0,3874	0,3817	1,49
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
f_{dp}	0,62	0,62	0,00
$THDi$	0,73	1,07	31,78
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 15: Parámetros eléctricos para lámpara 14.

4.1.15. Lámpara 15.

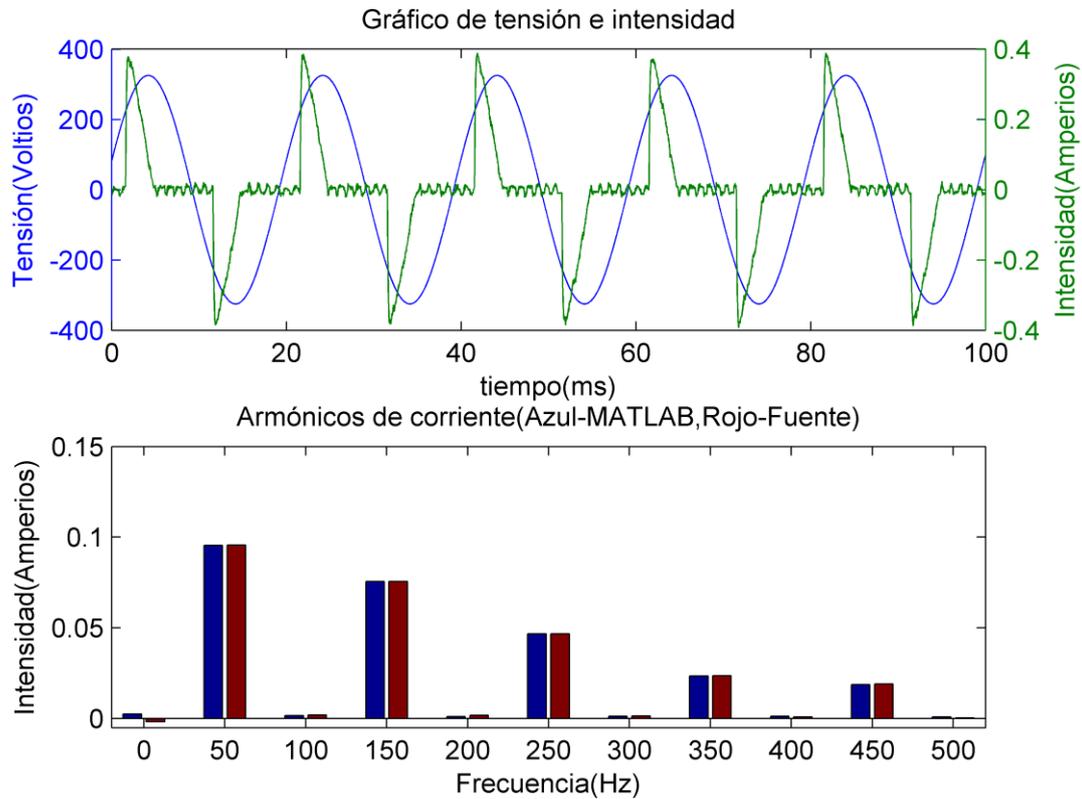


Figura 44: Gráfico de la lámpara 15.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,76	0,09
$I_{rms}(A)$	0,1387	0,1386	0,07
$P(W)$	19,93	19,92	0,05
$Q(VAr)$	24,89	-9,35	166,20
$D(VAd)$	-	22,94	-
$S(VA)$	31,89	31,79	0,31
$I_{max}(A)$	0,3929	0,3898	0,80
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
f_{dp}	0,62	0,63	1,59
$THDi$	0,72	1,04	30,77
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 16: Parámetros eléctricos para lámpara 15.

4.1.16. Lámpara 16.

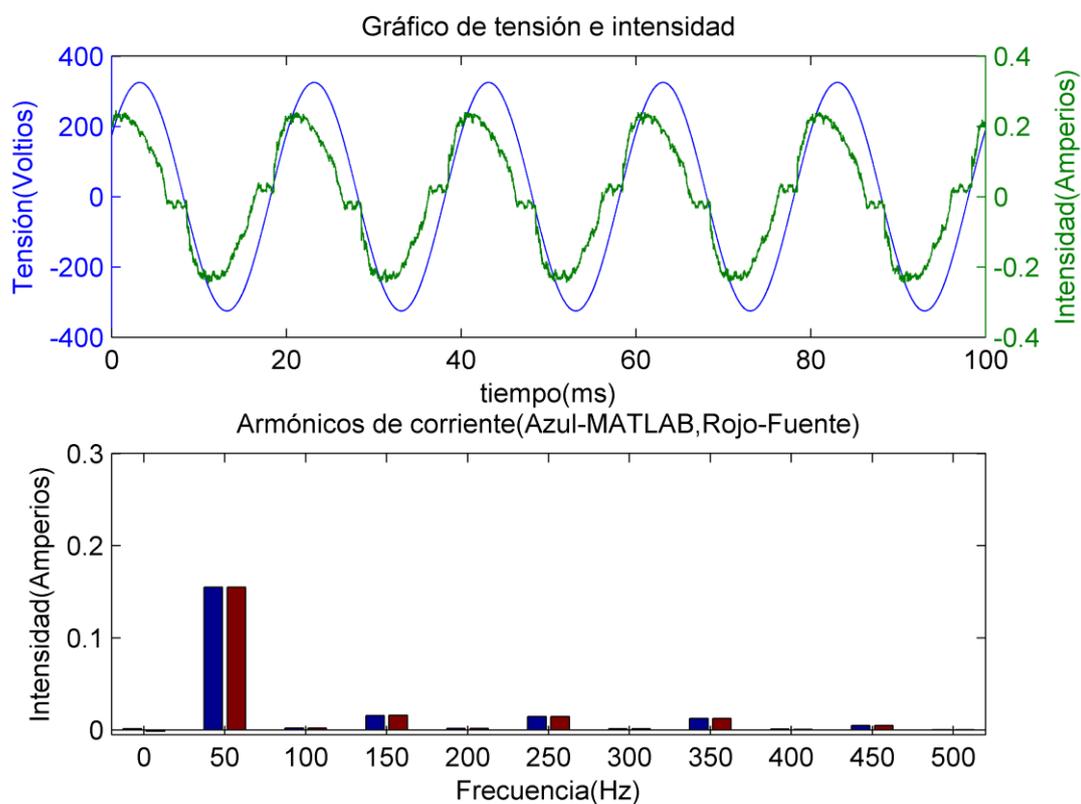


Figura 45: Gráfico de la lámpara 16

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,87	0,04
$I_{rms}(A)$	0,1574	0,1575	0,06
$P(W)$	32,42	32,41	0,03
$Q(VAr)$	16,09	-14,80	8,72
$D(VAd)$	-	6,04	-
$S(VA)$	36,19	36,14	0,14
$I_{max}(A)$	0,2466	0,2463	0,12
$\cos(\varphi)$	-	0,9097	-
f_{dp}	0,90	0,90	0,00
$THDi$	0,17	0,17	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 17: Parámetros eléctricos para lámpara 16

4.2. Combinaciones de diferentes grupos de lámparas.

Se presentarán en este apartado los resultados obtenidos de diferentes tipos de luminarias bajo condiciones normales de alimentación (las mismas del apartado anterior, 230V y 50Hz). Y es que en el apartado anterior presentamos dichos resultados pero para cada lámpara funcionando en solitario, pero ahora lo haremos por grupos de lámparas con que funcionan con la misma tipología.

Así pues, por una parte tendremos un grupo de lámparas tipo LED (todas funcionando a la vez), por otra las microled, por otra las compactas fluorescentes sin balasto electrónico, y por último las compactas fluorescentes con balasto electrónico. Pero además de esos cuatro grupos, hemos probado -y por tanto presentaremos a continuación sus resultados- todas las combinaciones posibles entre esas lámparas de cuatro tecnologías diferentes conformando entre todas ellas un total de 15 combinaciones. Y es que si recordamos de estadística, el concepto de **combinaciones sin repetición**, si disponemos de n elementos los cuales los agrupamos en grupos de p elementos siendo $n \geq p$, podemos formar n sobre p grupos tal como se muestra a continuación [28].

$$C_{n,p} = \binom{n}{p} = \frac{n!}{p!(n-p)!}$$

Ecuación 53: Nº de grupos que podemos formar con combinaciones sin repetición.

Y así pues, aplicando dicha expresión a nuestro caso en el que disponemos de cuatro elementos que los podemos agrupar en grupos desde uno en uno hasta de 4 en cuatro, el número total de grupos que podemos formar será:

$$n^{\circ} \text{ grupos} = \binom{4}{1} + \binom{4}{2} + \binom{4}{3} + \binom{4}{4} = 15$$

Ecuación 54: Nº de grupos a formar con lámparas de diferente tecnología.

Enunciamos a continuación cada uno de los quince grupos formados con lámparas de diferente tecnología, de los cuáles expondremos a continuación los resultados obtenidos análogamente a lo hecho con cada una de las lámparas por separado.

- a) Lámparas LED (Lámparas 1, 2, 3, 7, 8 y 16).
- b) Lámparas microled (Lámparas 4, 5 y 6).
- c) Lámparas CFL (Compact Fluorescent Light) SB (sin balasto electrónico) (Lámparas 11, 12, 13, 14 y 15).
- d) Lámparas CFL-CB (con balasto electrónico) (Lámparas 9 y 10).
- e) Lámparas LED y microled.
- f) Lámparas LED y CFL-SB.
- g) Lámparas LED y CFL-CB.
- h) Lámparas microled y CFL-SB.
- i) Lámparas microled y CFL-CB.
- j) Lámparas CFL-SB y CFL-CB.
- k) Lámparas LED, microled y CFL-SB.
- l) Lámparas LED, microled y CFL-CB.
- m) Lámparas LED, CFL-SB y CFL-CB.
- n) Lámparas microled, CFL-SB y CFL-CB.
- o) Todas las tecnologías de lámparas.

4.2.1. Lámparas LED.

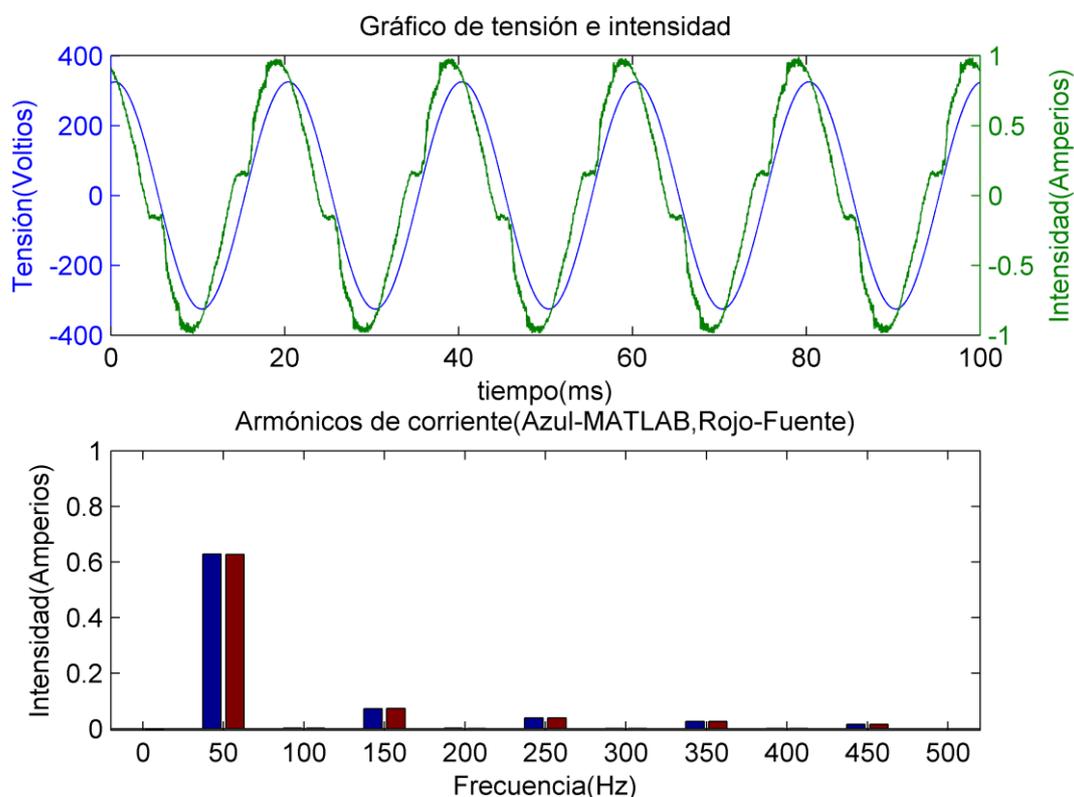


Figura 46: Gráfico de lámparas LED.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,18	0,10
$I_{rms}(A)$	0,6344	0,6349	0,08
$P(W)$	134,15	134,12	0,02
$Q(VAr)$	57,34	-53,28	7,62
$D(VAd)$	-	20,77	-
$S(VA)$	145,89	145,80	0,06
$I_{max}(A)$	0,9911	0,9911	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,93	-
fdp	0,92	0,92	0,00
$THDi$	0,15	0,14	7,14
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 18: Parámetros eléctricos de lámparas LED.

4.2.2. Lámparas microled.

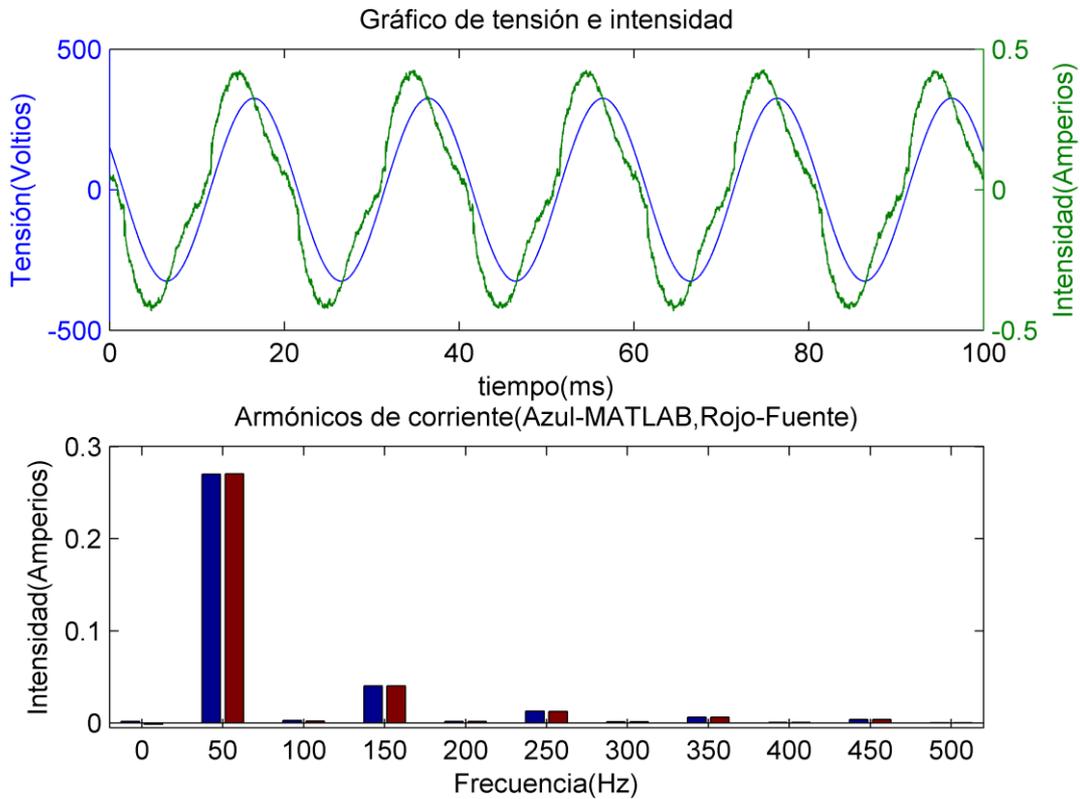


Figura 47: Gráfico de lámparas microled.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,82	0,06
$I_{rms}(A)$	0,2739	0,2736	0,11
$P(W)$	56,72	56,74	0,04
$Q(VAr)$	27,37	-25,43	7,63
$D(VAd)$	-	9,93	-
$S(VA)$	62,98	62,96	0,03
$I_{max}(A)$	0,4308	0,4278	0,70
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
f_{dp}	0,90	0,90	0,00
$THDi$	0,16	0,16	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 19: Parámetros eléctricos de lámparas microled.

4.2.3. Lámparas CFL sin balasto electrónico.

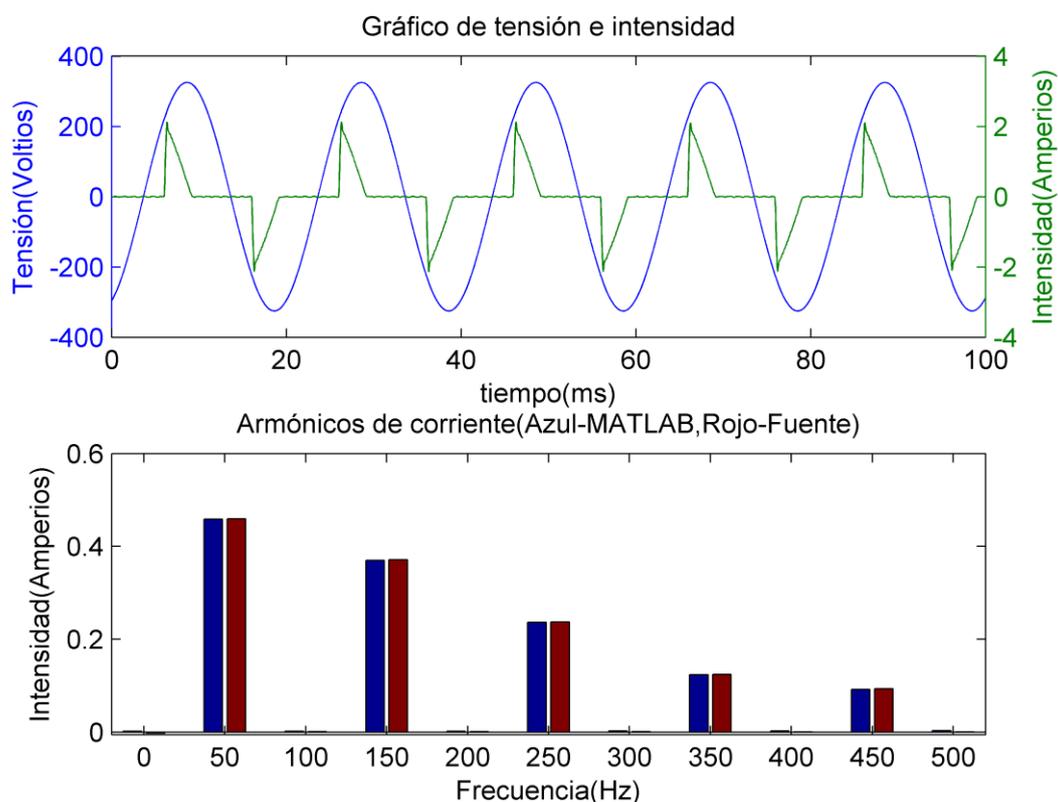


Figura 48: Gráfico de lámparas CFL sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	230,10	0,06
$I_{rms}(A)$	0,6789	0,6782	0,10
$P(W)$	96,03	95,04	1,04
$Q(VAr)$	123,87	-46,27	167,71
$D(VAd)$	-	114,83	-
$S(VA)$	156,12	156,08	0,03
$I_{max}(A)$	2,1424	2,1340	0,39
$\cos(\varphi)$	-	0,90	-
f_{dp}	0,61	0,61	0,00
$THDi$	0,74	1,09	32,11
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 20: Parámetros eléctricos de lámparas CFL sin balasto electrónico.

4.2.4. Lámparas CFL con balasto electrónico.

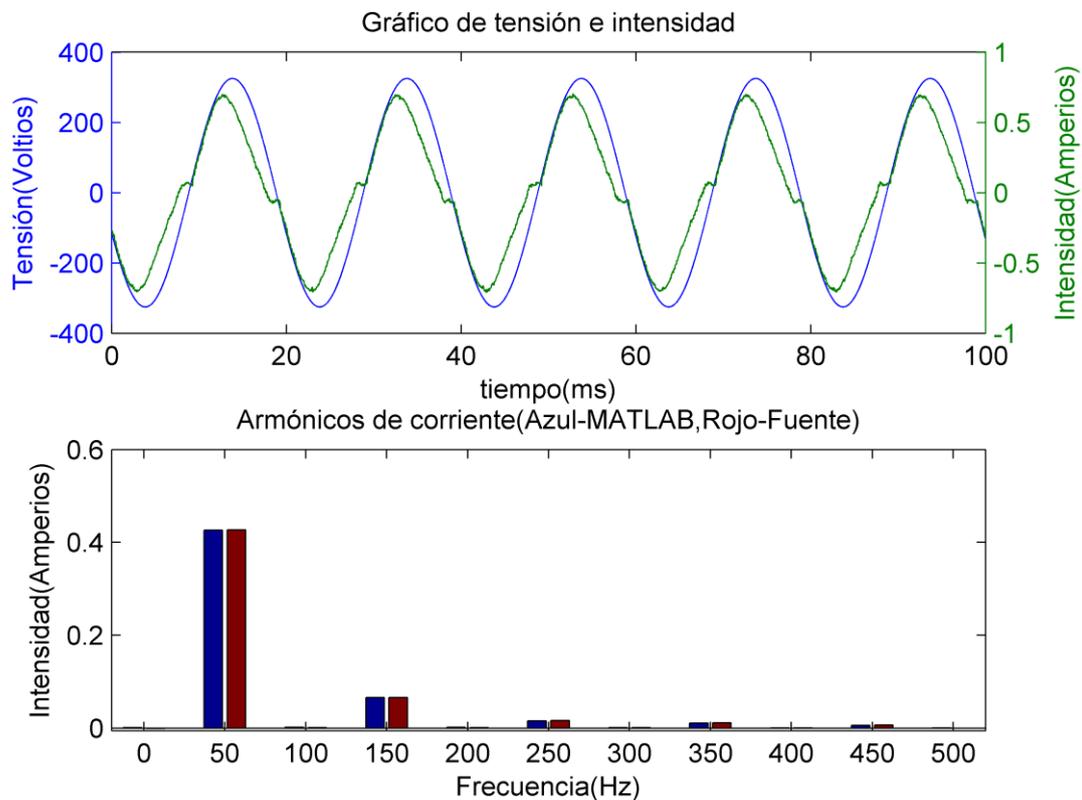


Figura 49: Gráfico de lámparas CFL con balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,96	229,80	0,07
$I_{rms}(A)$	0,4327	0,4325	0,05
$P(W)$	94,80	94,81	0,01
$Q(VAr)$	30,28	-25,56	18,47
$D(VAd)$	-	16,12	-
$S(VA)$	99,51	99,51	0,00
$I_{max}(A)$	0,7097	0,7067	0,42
$\cos(\varphi)$	-	0,97	-
f_{dp}	0,95	0,95	0,00
THDi	0,16	0,16	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 21: Parámetros eléctricos de lámparas CFL con balasto electrónico.

4.2.5. Lámparas LED y microled.

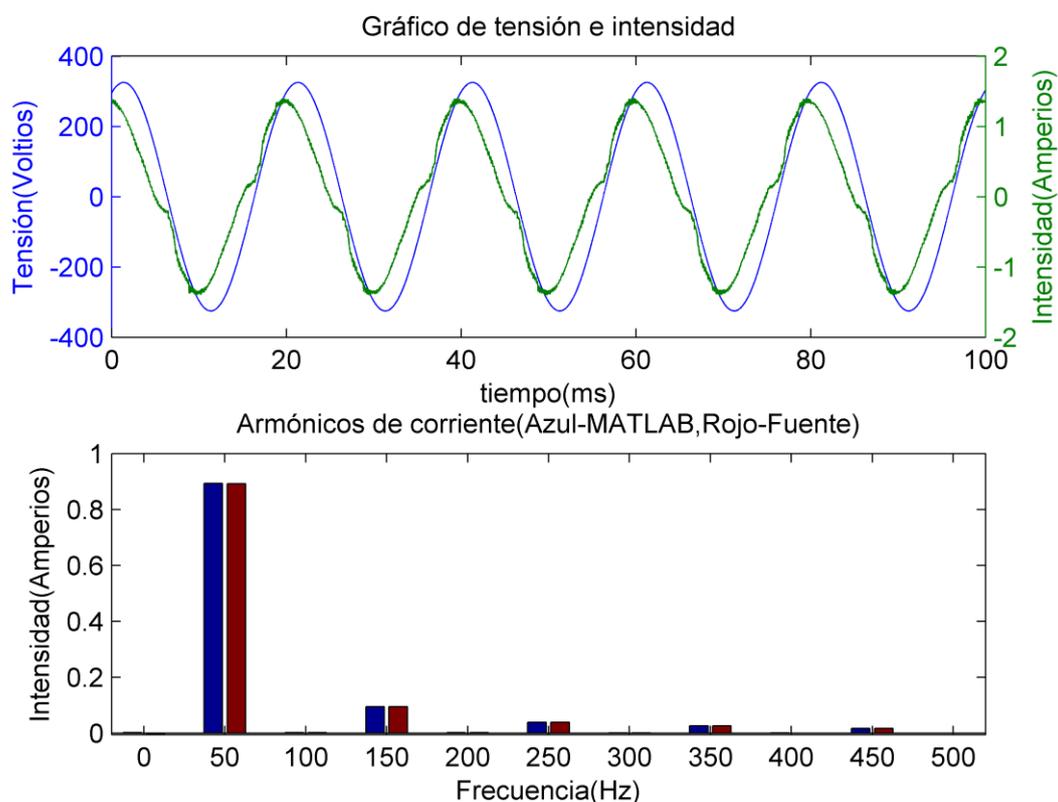


Figura 50: Gráfico de lámparas LED y microled.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,12	0,07
$I_{rms}(A)$	0,8988	0,8999	0,12
$P(W)$	189,62	189,58	0,02
$Q(VAr)$	82,26	-78,16	5,25
$D(VAd)$	-	25,05	-
$S(VA)$	206,70	206,59	0,05
$I_{max}(A)$	1,4082	1,4082	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,92	-
f_{dp}	0,92	0,92	0,00
$THDi$	0,12	0,12	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 22: Parámetros eléctricos de lámparas LED y microled.

4.2.6. Lámparas LED y CFL sin balasto electrónico.

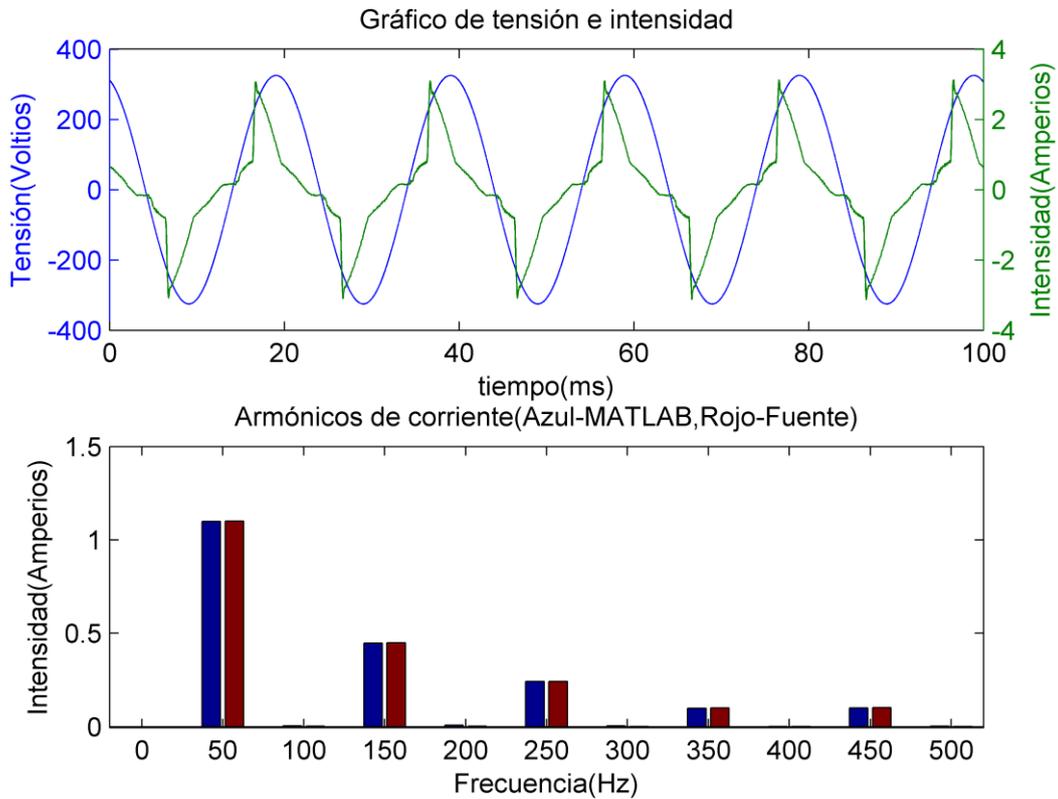


Figura 51: Gráfico de lámparas LED y CFL sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,15	0,08
$I_{rms}(A)$	1,2362	1,2353	0,07
$P(W)$	231,49	231,47	0,01
$Q(VAr)$	165,01	-102,29	61,32
$D(VAd)$	-	129,39	-
$S(VA)$	284,29	284,22	0,02
$I_{max}(A)$	3,1361	3,1361	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
f_{dp}	0,81	0,81	0,00
THDi	0,46	0,51	9,80
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 23: Parámetros eléctricos de lámparas LED y CFL sin balasto electrónico.

4.2.7. Lámparas LED y CFL con balasto electrónico.

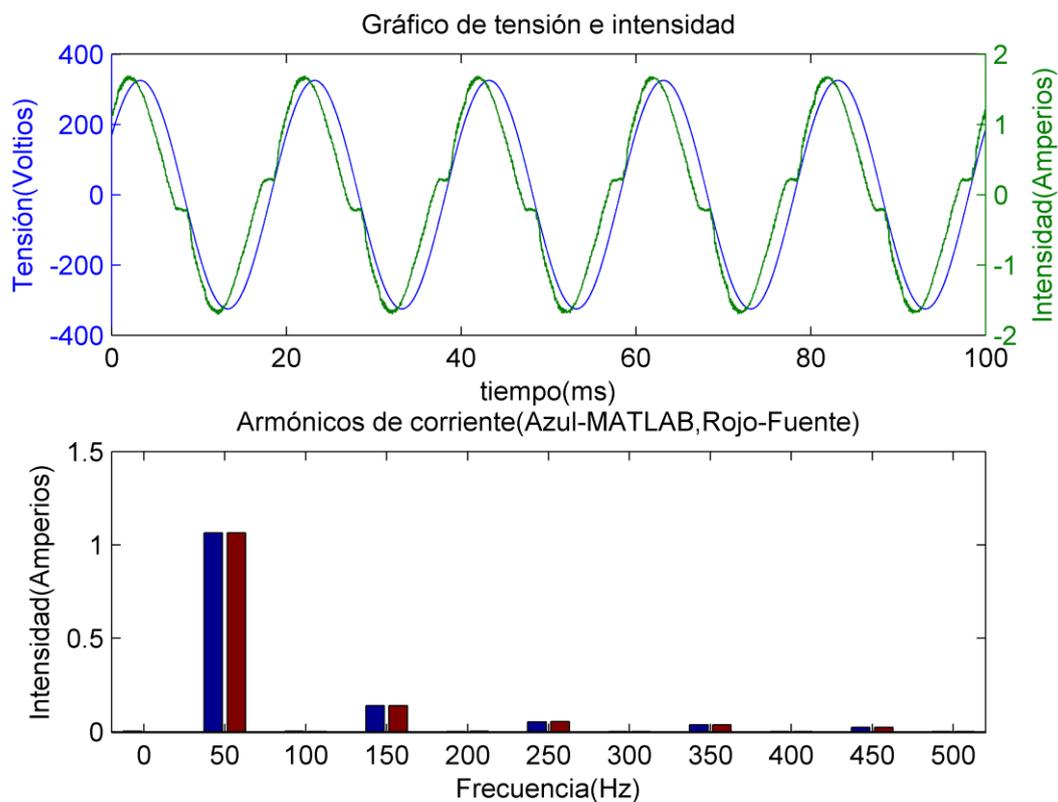


Figura 52: Gráfico de lámparas LED y CFL con balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	229,87	0,04
$I_{rms}(A)$	1,0763	1,0767	0,04
$P(W)$	231,74	231,69	0,02
$Q(VAr)$	86,99	-78,89	10,27
$D(VAd)$	-	36,29	-
$S(VA)$	247,52	247,43	0,04
$I_{max}(A)$	1,7064	1,6952	0,66
$\cos(\varphi)$	-	0,95	-
f_{dp}	0,94	0,94	0,00
$THDi$	0,15	0,15	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 24: Parámetros eléctricos de lámparas LED y CFL con balasto electrónico.

4.2.8. Lámparas microled y CFL sin balasto electrónico.

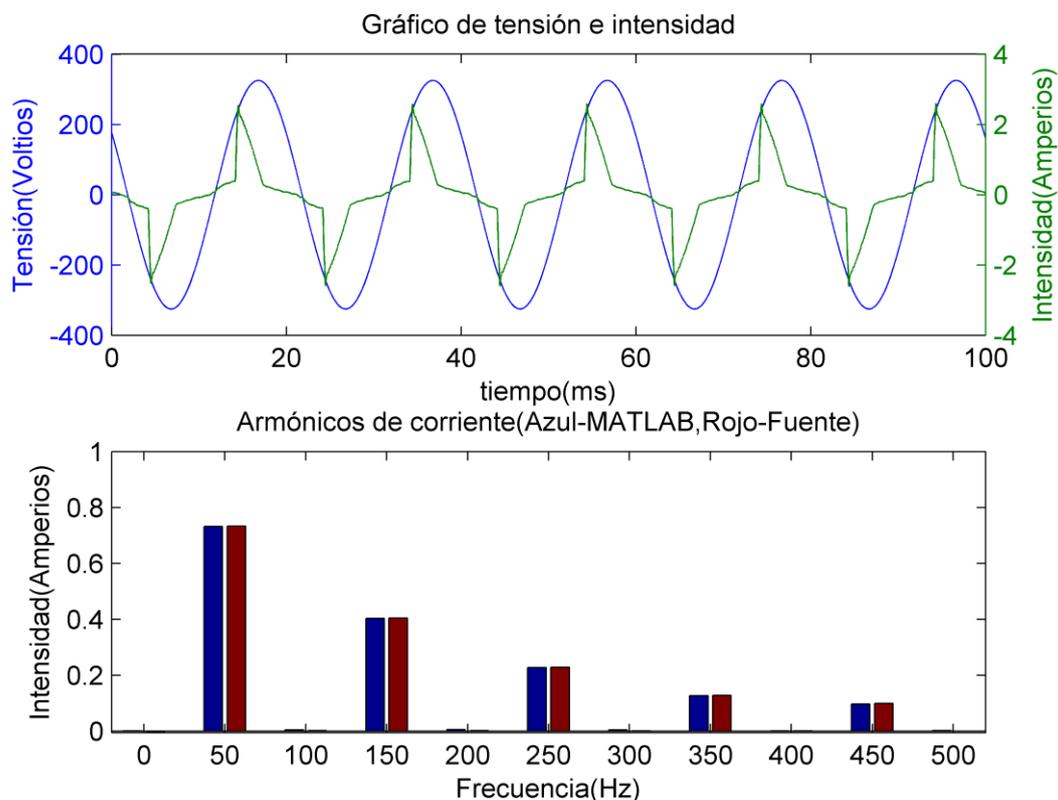


Figura 53: Gráfico de lámparas microled y CFL sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	229,86	0,05
$I_{rms}(A)$	0,9006	0,8996	0,11
$P(W)$	152,29	152,32	0,02
$Q(VAr)$	140,37	-72,50	93,61
$D(VAd)$	-	120,11	-
$S(VA)$	207,11	207,09	0,01
$I_{max}(A)$	2,6110	2,6025	0,33
$\cos(\varphi)$	-	0,9029	-
f_{dp}	0,7353	0,7356	0,04
$THDi$	0,58	0,71	18,31
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 25: Parámetros eléctricos de lámparas microled y CFL sin balasto electrónico.

4.2.9. Lámparas microled y CFL con balasto electrónico.

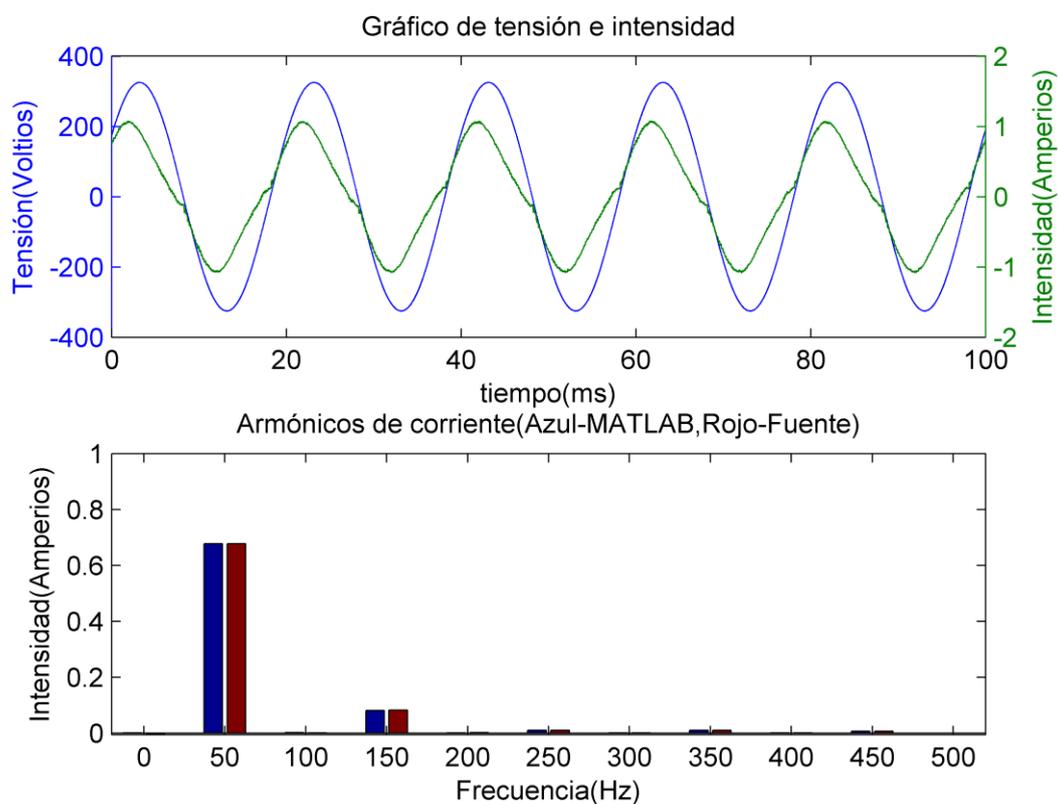


Figura 54: Gráfico de lámparas microled y CFL con balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	229,88	0,04
$I_{rms}(A)$	0,6829	0,6831	0,03
$P(W)$	147,80	147,77	0,02
$Q(VAr)$	53,10	-49,34	7,62
$D(VAd)$	-	19,39	-
$S(VA)$	157,05	156,99	0,04
$I_{max}(A)$	1,0862	1,0805	0,53
$\cos(\varphi)$	-	0,95	-
f_{dp}	0,94	0,94	0,00
$THDi$	0,12	0,12	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 26: Parámetros eléctricos de lámparas microled y CFL con balasto electrónico.

4.2.10. Lámparas CFL con y sin balasto electrónico.

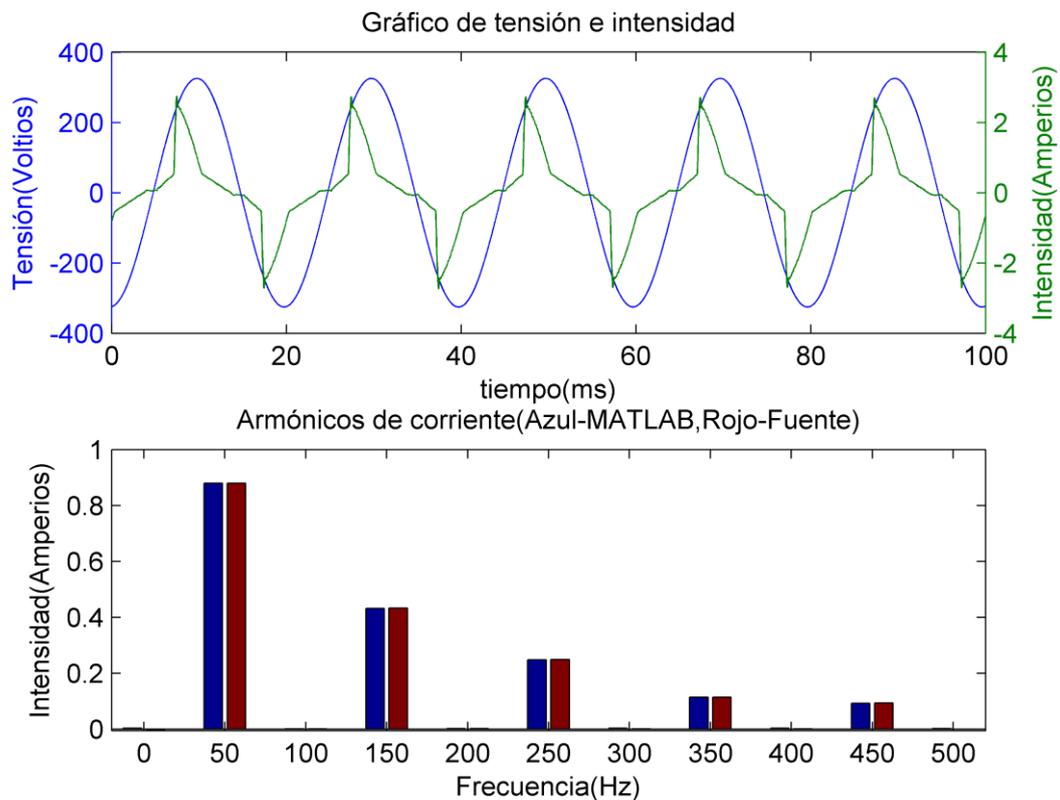


Figura 55: Gráfico de lámparas CFL con y sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,19	0,10
$I_{rms}(A)$	1,0383	1,0376	0,07
$P(W)$	188,67	188,70	0,02
$Q(VAr)$	146,34	-72,92	100,69
$D(VAd)$	-	126,83	-
$S(VA)$	238,77	238,77	0,00
$I_{max}(A)$	2,7569	2,7569	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,93	-
f_{dp}	0,79	0,79	0,00
$THDi$	0,53	0,63	15,87
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 27: Parámetros eléctricos de lámparas CFL con y sin balasto electrónico.

4.2.11. Lámparas LED, microled y CFL sin balasto electrónico.

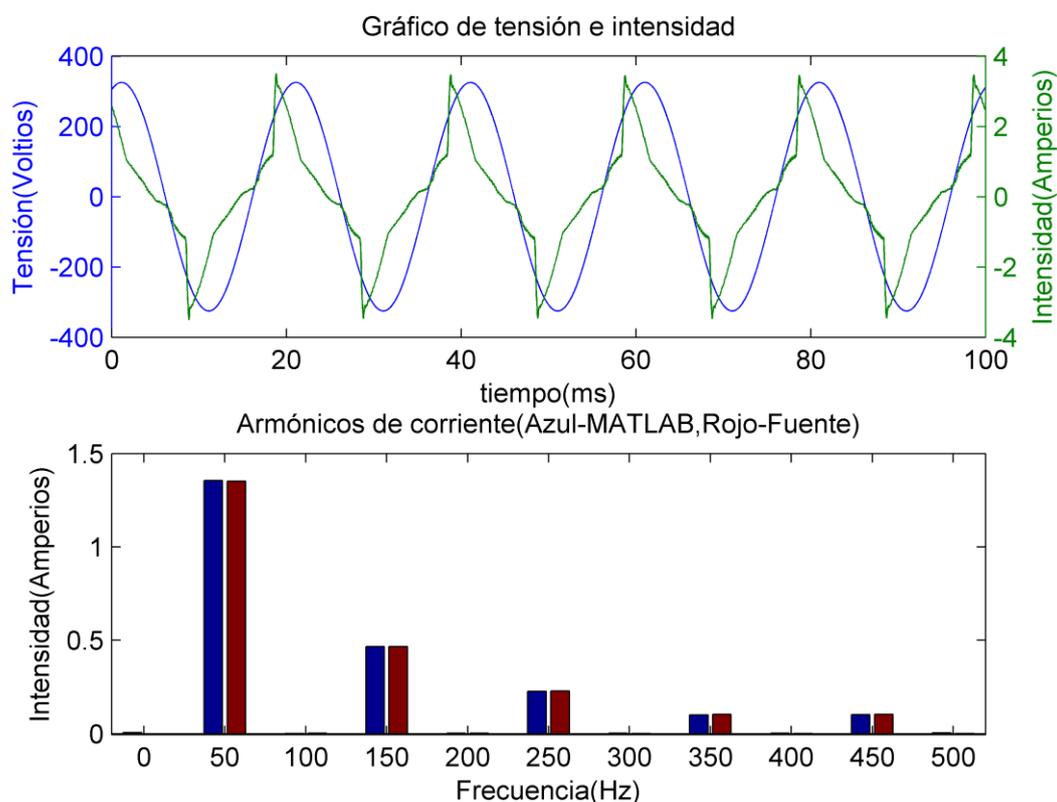


Figura 56: Gráfico de lámparas LED, microled y CFL sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,15	0,08
$I_{rms}(A)$	1,4680	1,4708	0,19
$P(W)$	284,92	284,86	0,02
$Q(VAr)$	181,10	-124,57	45,38
$D(VAd)$	-	131,32	-
$S(VA)$	337,60	337,50	0,03
$I_{max}(A)$	3,5125	3,5125	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,92	-
f_{dp}	0,84	0,84	0,00
$THDi$	0,39	0,42	7,14
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 28: Parámetros eléctricos de lámparas LED, microled y CFL sin balasto electrónico.

4.2.12. Lámparas LED, microled y CFL con balasto electrónico.

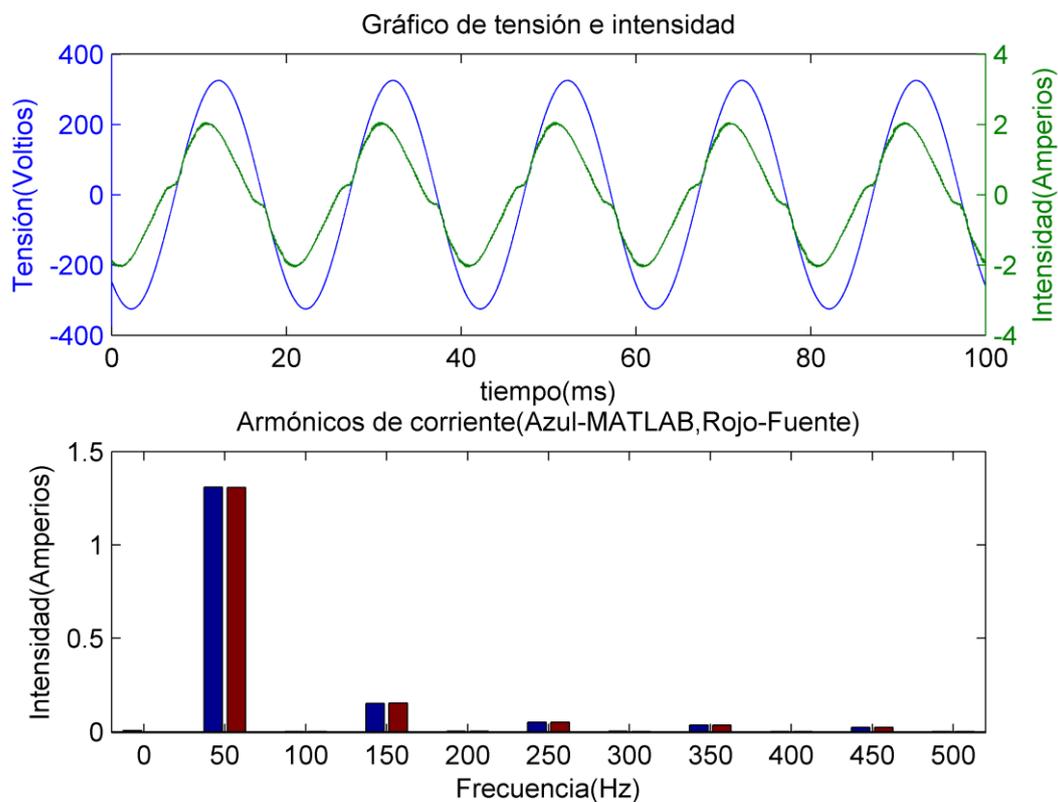


Figura 57: Gráfico de lámparas LED, microled y CFL con balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,01	0,02
$I_{rms}(A)$	1,3187	1,3202	0,11
$P(W)$	282,78	282,81	0,01
$Q(VAr)$	109,54	-102,32	7,06
$D(VAd)$	-	38,69	-
$S(VA)$	303,25	303,23	0,01
$I_{max}(A)$	2,0663	2,0663	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,94	-
f_{dp}	0,93	0,93	0,00
$THDi$	0,13	0,13	0,00
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 29: Parámetros eléctricos de lámparas LED, microled y CFL con balasto electrónico.

4.2.13. Lámparas LED y CFL con y sin balasto electrónico.

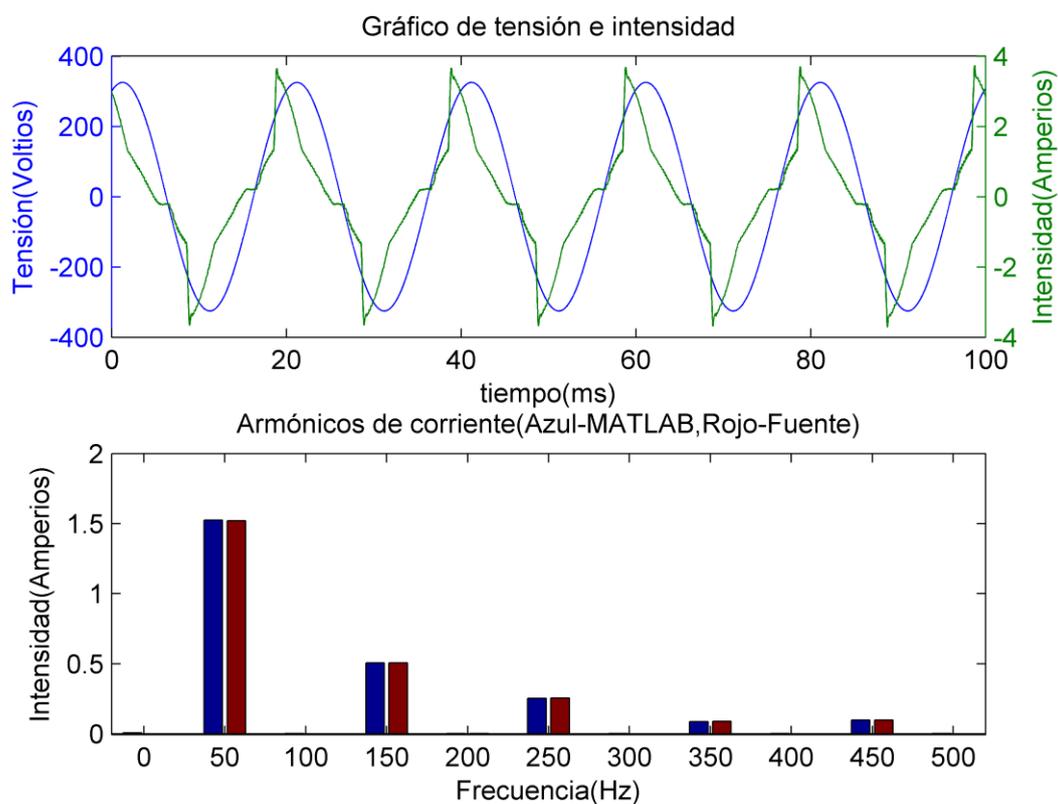


Figura 58: Gráfico de lámparas LED y CFL con y sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,14	0,07
$I_{rms}(A)$	1,6408	1,6444	0,22
$P(W)$	326,00	325,92	0,02
$Q(VAr)$	190,01	-126,95	49,67
$D(VAd)$	-	141,21	-
$S(VA)$	377,33	377,21	0,03
$I_{max}(A)$	3,7373	3,7373	0,00
$\cos(\varphi)$	-	0,93	-
f_{dp}	0,86	0,86	0,00
$THDi$	0,37	0,40	7,50
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 30: Parámetros eléctricos de lámparas LED y CFL con y sin balasto electrónico.

4.2.14. Lámparas microled, y CFL con y sin balasto electrónico.

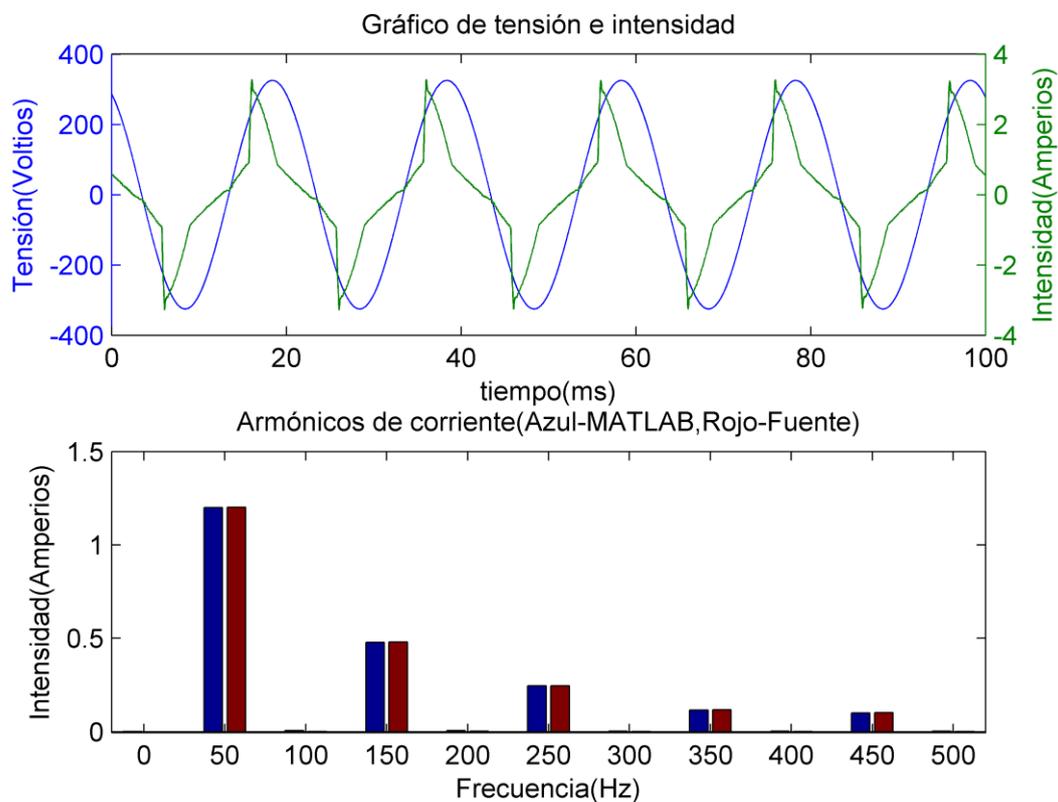


Figura 59: Gráfico de lámparas microled y CFL con y sin balasto electrónico.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,97	230,08	0,05
$I_{rms}(A)$	1,3394	1,3383	0,08
$P(W)$	256,83	256,83	0,00
$Q(VAr)$	170,06	-102,21	66,38
$D(VAd)$	-	135,82	-
$S(VA)$	308,03	307,99	0,01
$I_{max}(A)$	3,2907	3,2904	0,01
$\cos(\varphi)$	-	0,93	-
f_{dp}	0,83	0,83	0,00
THDi	0,44	0,49	10,20
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 31: Parámetros eléctricos de lámparas microled y CFL con y sin balasto electrónico.

4.2.15. Todas las tecnologías de lámparas.

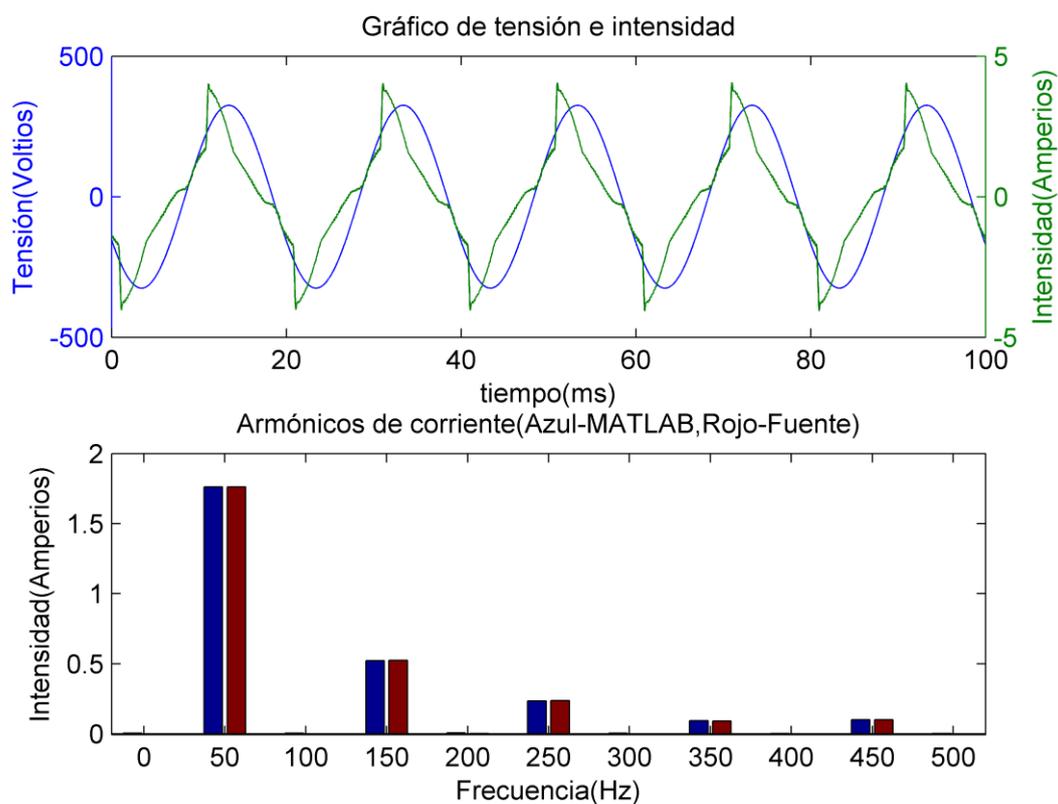


Figura 60: Gráfico de todas las tecnologías de lámparas.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	229,98	229,86	0,05
$I_{rms}(A)$	1,8688	1,8680	0,04
$P(W)$	376,75	376,81	0,02
$Q(VAr)$	206,79	-149,39	38,42
$D(VAd)$	-	142,83	-
$S(VA)$	429,78	429,78	0,00
$I_{max}(A)$	4,0816	4,0677	0,34
$\cos(\varphi)$	-	0,93	-
f_{dp}	0,88	0,88	0,00
$THDi$	0,33	0,35	5,71
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 32: Parámetros eléctricos de todas las tecnologías de lámparas.

4.3. El contador digital.

4.3.1. Plan de sustitución de equipos de medida.

La orden del ministerio de industria 3860/2007 de 28 de Diciembre, en su disposición adicional primera, establece un plan de sustitución de equipos de medida [29].

1. *Todos los contadores de medida en suministros de energía eléctrica con una potencia contratada de hasta 15kW deberán ser sustituidos por nuevos equipos que permitan la discriminación horario y la telegestión antes del 31 de Diciembre de 2018. Este cambio se realizará de acuerdo al plan de sustitución que se establece en la presente disposición.*
2. *El número de equipos que deberán ser sustituidos por cada una de las compañías distribuidoras se establece como un porcentaje del total del parque de contadores de medida de cada una de dichas empresas para este tipo de suministros y deberá ajustarse a los valores que se señalan a continuación para cada intervalo de tiempo:*

Entre el 1 de enero de 2008 y el 31 de diciembre de 2010 deberá sustituirse un 30 por ciento del total del parque de contadores de hasta 15kW de potencia contratada de cada empresa distribuidora.

Entre el 1 de enero de 2011 y el 31 de diciembre de 2012 deberá sustituirse un 20 por ciento del total del parque de contadores de hasta 15kW de potencia contratada de cada empresa distribuidora.

Entre el 1 de enero de 2013 y el 31 de diciembre de 2015 deberá sustituirse un 20 por ciento del total del parque de contadores de hasta 15kW de potencia contratada de cada empresa distribuidora.

Entre el 1 de enero de 2016 y el 31 de diciembre de 2018 deberá sustituirse un 30 por ciento del total del parque de contadores de hasta 15kW de potencia contratada de cada empresa distribuidora.

Así pues, y citando sólo una pequeña parte de dicha orden -que menciona otros muchos temas como tarifas, etc- es claro que es obligada en España la sustitución del 100% de los contadores domésticos (potencia contratada menor de 15 kilovatios) antes del 31 de diciembre de 2018. Pero no por contadores de cualquier tipo, sino por contadores que permitan la discriminación horaria y telegestión, y por tanto por contadores digitales en los que cambia el método físico de medida respecto a los contadores tradicionales (analógicos).

4.3.2. El contador tradicional de potencia activa.

El contador de electricidad analógico o contador de luz tradicional, es un contador de inducción cuyo principio de funcionamiento físico se basa en las corrientes de Foucault. Se presenta en la siguiente figura una fotografía de un contador analógico donde se presentan diferentes numeritos que más tarde nos ayudarán a nombrar cada una de sus partes.

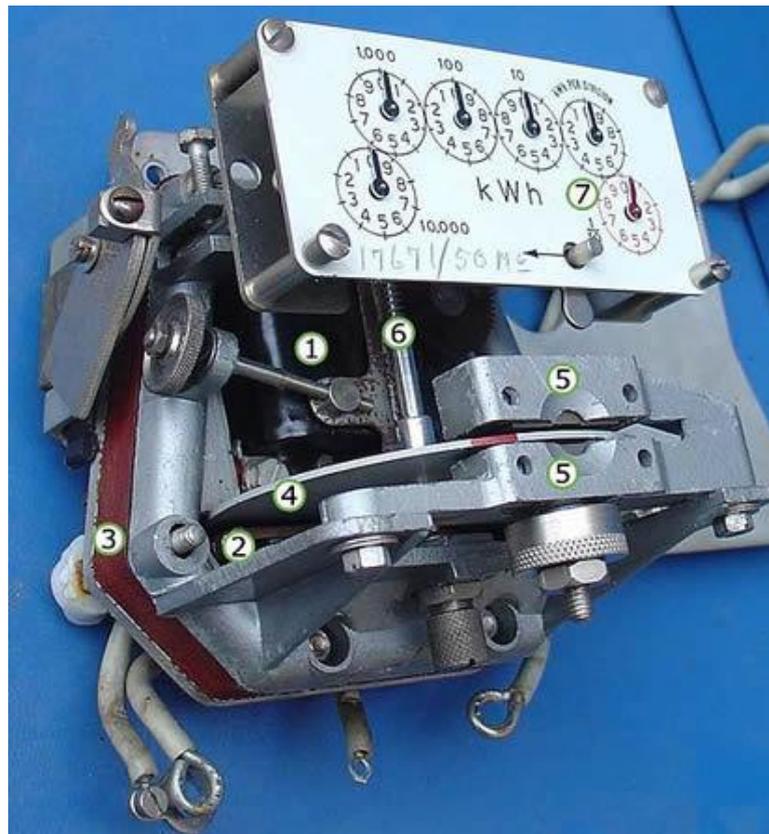


Figura 61: Contador analógico de electricidad (energía activa). Fuente: <http://e-ducativa.catedu.es/>

Nombramos a continuación cada una de sus partes:

1. Bobina voltimétrica, de hilo fino y de muchas vueltas, y conectada en paralelo con la carga.
2. Bobina amperimétrica, de hilo grueso y conectada en serie con la carga.
3. Estátor, que concentra el campo magnético.
4. Rotor, que consiste en un disco de aluminio.
5. Freno magnético del rotor, para que éste no se envale.
6. Eje con tornillo sin fin.
7. Relojes contadores.

Y en la figura 57, se muestra el esquema interno de un contador de inducción, donde podemos apreciar perfectamente que dispone de dos bobinas, una amperimétrica conectada en serie con la carga (la carga es la instalación eléctrica) y otra voltimétrica conectada en paralelo.

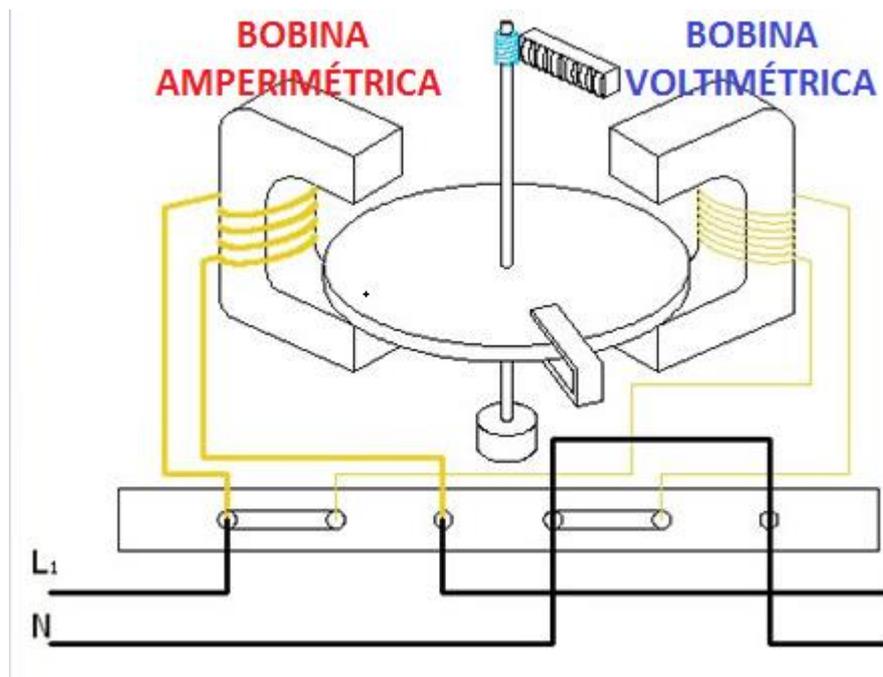


Figura 62: Esquema interno de un contador de inducción (energía activa). Fuente: <http://e-educativa.catedu.es/>

Funcionamiento de un contador de inducción:

- El paso de la corriente eléctrica a través de las bobinas genera un flujo magnético, flujo magnético el cual genera en el disco unas corrientes de Foucault. Pero a su vez, éste genera por definición, unas corrientes que se oponen al flujo magnético creado en el disco provocando el giro del mismo.
- Cuando el disco comienza a girar, y para evitar que se embale, se dispone de un freno magnético que estabiliza su velocidad de rotación. Y así, las vueltas que da el disco se transmiten al eje, y éste a su vez las transmite a un sistema de engranajes a través del cual queda registrado el consumo total.

4.3.3. El contador digital.

Pasemos ahora a hablar del contador digital, pues según hemos mencionado anteriormente, está sustituyendo al contador analógico tradicional, y del cual se dispondrá en todos los hogares españoles a partir del 1 de enero de 2019.

La potencia instantánea consumida por una instalación o circuito eléctrico es:

$$p(t) = u(t)i(t)$$

Ecuación 55: Potencia instantánea consumida por un circuito eléctrico.

Y teniendo en cuenta que si integramos la potencia instantánea a lo largo de un ciclo tenemos el consumo de energía eléctrica durante un ciclo, podemos dividir dicha energía por el periodo del ciclo y resulta la potencia media (recordemos $E=Pt$) tal como se muestra en la ecuación 50.

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt$$

Ecuación 56: Potencia media consumida por un circuito eléctrico.

Que discretizando dicha ecuación para poder usarla en un contador digital pues los datos usados para su cálculo son resultado de muestrear las señales de tensión e intensidad, nos queda dicha ecuación como sigue:

$$P_{media} = \frac{\sum_{i=0}^N U_n I_n}{N}$$

Ecuación 57: Fórmula discretizada de la potencia media consumida.

Pero lo que a nosotros nos interesa es el consumo de energía eléctrica, así que hemos de multiplicar dicha potencia por el tiempo. Lo que se hace para calcularlo es lo que sigue: como sabemos que la frecuencia de la red es de 50Hz, el contador toma datos y calcula la potencia media para x ciclos, siendo por tanto el tiempo que conlleva dicha toma de datos $L=xT$. Y entonces, el consumo eléctrico durante ese número de ciclos será [30][31]:

$$E = \frac{\sum_{i=0}^N U_n I_n}{N} \frac{L}{3600}$$

Ecuación 58: Consumo eléctrico parcial.

Donde la tensión está dada en voltios, la intensidad de corriente en amperios, L en segundos y se divide por 3600 para pasar de segundos a horas y por tanto obtener el consumo en vatios-hora. Y acumulando el contador dicho consumo podemos luego conocer el consumo con discriminación horaria tan útil para este tipo de facturación que se impone en la actualidad.

4.3.4. Ensayo del contador.

Observando todas las gráficas de los datos obtenidos de los diferentes ensayos realizados, es claro que en todos los casos hay armónicos y que la onda de corriente no se puede confundir con la del seno, y muchísimo menos en el caso de las compactas fluorescentes sin balasto electrónico tal y como podemos observar en la figura 48.

Entonces, nos surge la duda de si realizarán o no correctamente su trabajo los contadores digitales cuando miden el consumo de cargas no lineales tal como todas las lámparas que utilizamos aquí. Pero como no todas las cargas generan formas de onda tan extrañas como las de las compactas fluorescentes sin balasto electrónico, y por tanto éstas no son condiciones de trabajo que se vayan a dar en la realidad, vamos a utilizar una carga eléctrica que sea mezcla de los varios tipos existentes para generar una forma de onda que sea más lógica que se de en el día a día en las instalaciones eléctricas. Y a fin de que la medida sea de una carga lo suficientemente grande (suficiente vataje) como para que el consumo del contador se pueda asemejar lo más posible a la realidad, se encenderán a la vez las dieciséis lámparas durante una semana y luego contrastaremos la medida del contador con los datos proporcionados por la fuente.

En resumen, lo que vamos a hacer es dejar encendidas las dieciséis lámparas de los ensayos realizados anteriormente, y medir el consumo con el contador digital mencionado en la figura 24, además de tomar una medida con la fuente AGILENT 6812B con la que obtendremos la potencia consumida por las dieciséis lámparas encendidas a la vez, que multiplicada por las horas durante las que están encendidas, obtendremos la energía consumida realmente que compararemos con el consumo registrado por el contador.

Nótese como la figura 63 coincide con la figura 60 debido a que ambos ensayos son el mismo pues corresponden al funcionamiento de todas las lámparas a la vez, y la única diferencia entre ambas figuras es que la imagen está desplazada lateralmente debido al instante inicial en que se empieza a medir.

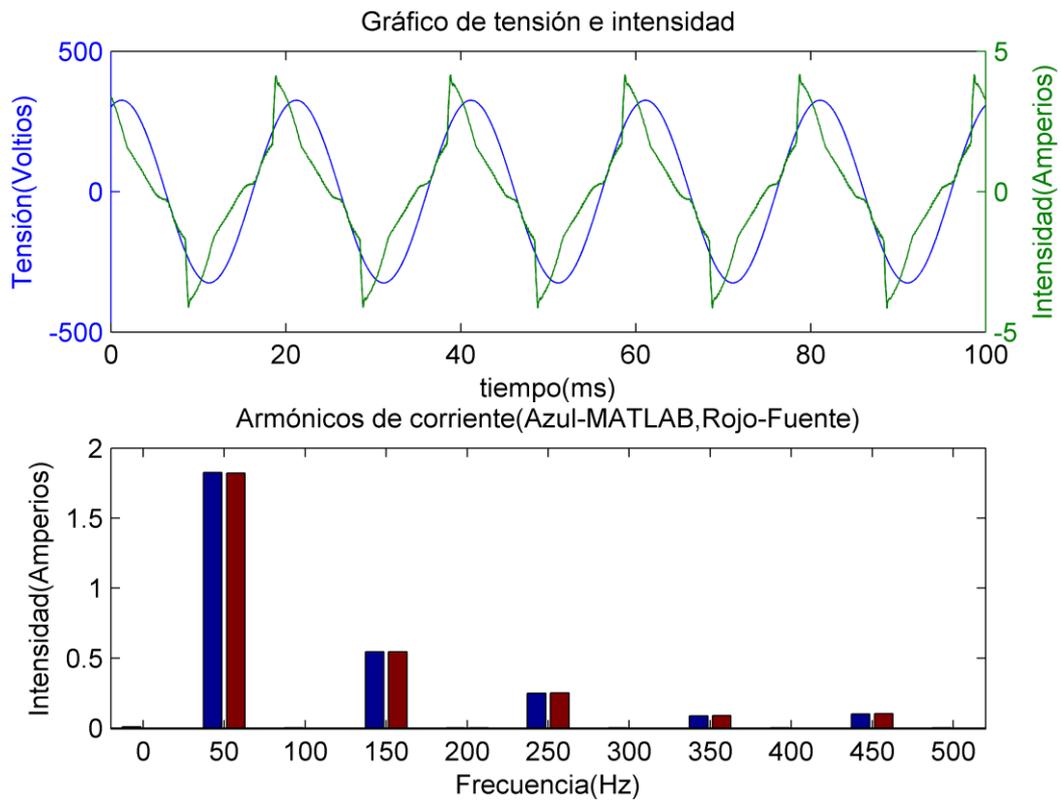


Figura 63: Gráfico de la forma de onda y armónicos con los que trabaja el contador.

El ensayo comenzó el día martes 10 de junio de 2014 a las 11:00 horas y terminó el día lunes 16 de junio de 2014 a la hora 19:00 horas por lo que la duración total del ensayo fue de 152 horas. Y teniendo en cuenta que la potencia medida por la fuente fue de 389,17W, y la calculada por Matlab en base a los datos proporcionados por esta de 389,08W, y tomando como más exacta la de Matlab debido a su mayor poder computacional (diferencia de tan sólo un 0,023%), el consumo total será de:

$$E_{Matlab} = Pt = 389,08W \cdot 152h \cdot \frac{1kWh}{1000Wh} = 59,14kWh$$

Ecuación 59: Consumo durante 152 horas de todas las lámparas según la fuente.

Por otra parte, el consumo inicial marcado por el contador antes de iniciar el ensayo era de 0,89kWh, y una vez finalizado el enunciado fue de x kWh. Por lo que el consumo medido por el contador digital es de:

$$E_{Contador} = E_{C\ final} - E_{C\ inicial} = 59,41 - 0,89 = 58,52 kWh$$

Ecuación 60: Consumo durante 152 de todas las lámparas según el contador digital.

Así que la diferencia es de tan sólo:

$$\Delta E = |E_{Matlab} - E_{Contador}| = |59,14 - 58,52| = 0,62 \text{ kW}$$

Ecuación 61: Diferencia de consumo indicado entre Matlab y el contador.

Por lo que el incremento en tanto por ciento es de tan sólo:

$$\text{Incremento}(\%) = \frac{\Delta E}{E_{Matlab}} = \frac{0,62}{59,14} 100\% = 1,05\%$$

Ecuación 62: Incremento de consumo entre el contador y Matlab en %.

4.4. Transitorios en la tensión de alimentación.

A todos nos ha pasado que estamos en casa y de repente vemos como la bombilla incandescente de toda la vida comienza a parpadear y pensamos “que no se vaya la luz por favor”. Pues bien, este fenómeno y muchos más se deben a transitorios en la tensión de alimentación del circuito. Y es que todo este tipo de fenómenos se pueden deber a problemas en la generación -como un alternador que empiece a dar fallos-, transporte -caída del tendido eléctrico- y distribución final en el transformador de al lado de casa -por ejemplo un posible incendio-.

Entonces, con el fin de simular dicho tipo de fenómenos con los receptores objeto de este estudio, en este apartado, provocaremos sobretensiones, bajadas de tensión y microcortes en la tensión de alimentación del circuito. Así pues, en todos estos casos en los que controlaremos la tensión de alimentación del circuito, nos dedicaremos a estudiar la forma de onda de la corriente para ver qué comportamiento tiene frente a todo este tipo de transitorios para poder predecir por ejemplo si se producirán sobrecalentamientos en las redes e instalaciones eléctricas, o corrientes muy elevadas que puedan dañar otros aparatos de la misma instalación.

4.4.1. Sobretensiones y bajadas de tensión.

Para provocar sobretensiones, partiendo de una tensión de alimentación con una forma de onda perfectamente sinusoidal de valor rms 230V y 50Hz, y perfectamente estabilizada, cambiaremos la tensión de alimentación de 230 a 260V para ver cuáles son sus consecuencias. Análogamente haremos con las bajadas de tensión sólo que en vez de pasar la tensión de 230 a 260V, ésta pasará de 230 a 180V. Cuando hablemos en lo que sigue de sobretensiones, lo extrapolaremos automáticamente a bajadas de tensión.

Esto lo haremos con una lámpara de cada uno de los cuatro tipos diferentes de los que disponemos en el laboratorio por lo que en total serán cuatro los ensayos realizados: uno con la lámpara LED número 1, otro con la lámpara microled número 4, otro con la lámpara compacta fluorescente sin balasto electrónico número 11, y el último con la lámpara compacta fluorescente con balasto electrónico número 10.

Tal y como ocurría en los ensayos anteriores, muestrearemos la señal con una frecuencia de muestreo $f_s=40\text{kHz}$, y dado que la frecuencia de la red es de 50Hz, es claro que necesitamos 800 posiciones de memoria para almacenar un ciclo completo. Y dado que la memoria de la fuente guarda 4096 puntos digitalizados distintos, nos serán de utilidad los 4000 primeros para almacenar cinco ciclos completos. El proceso a seguir en este ensayo será que una vez estabilizada la señal con 230V, empezaremos a muestrear la señal hasta tomar los datos pertenecientes a un ciclo completo (800 puntos, aunque se han tomado 816 realmente para apreciar correctamente el período completo de la onda de corriente a 230V), y justo entonces cambiaremos la tensión a 260V (ó 180V en el caso de bajadas de tensión) sin dejar de muestrear la señal en ningún momento hasta agotar todas las posiciones de memoria. Se mostrará la gráfica (al igual que en los demás casos) perteneciente a los 4000 primeros puntos para obtener cinco ciclos completos.

También compararemos aquí las potencias activa y aparente para 260V y 180V con la que hay a 230V, así como también el factor de potencia en cuyo cálculo se utilizarán los dos últimos ciclos que se muestran en la gráfica, y por tanto las posiciones de memoria que van de la número 2401 a la 4000 (nótese que en Matlab las posiciones de memoria se cuentan a partir del 1, y no a partir del 0). Para cada una de las lámparas, se mostrará primero la gráfica correspondiente a la sobretensión, luego la tabla comparativa de los resultados de

este ensayo y del de la bajada de tensión, y por último la gráfica de la bajada de tensión.

Mostramos a continuación los resultados obtenidos para cada uno de las cuatro lámparas utilizadas en este ensayo:

- **Lámpara 1 (LED).**

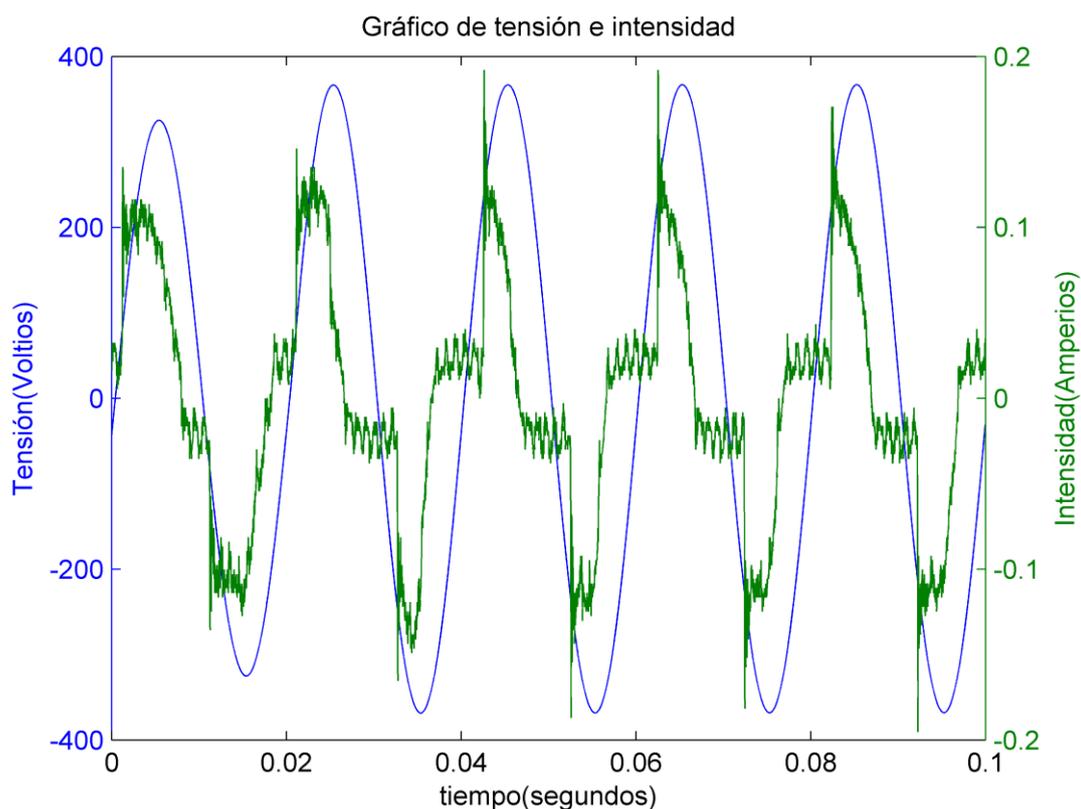


Figura 64: Sobretensión en una lámpara LED.

$U_{rms}(V)$	$P(W)$	$S(VA)$	f_{dp}
180	14,30	15,06	0,95
230	14,33	17,20	0,83
260	12,20	17,19	0,71

Tabla 33: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara LED.

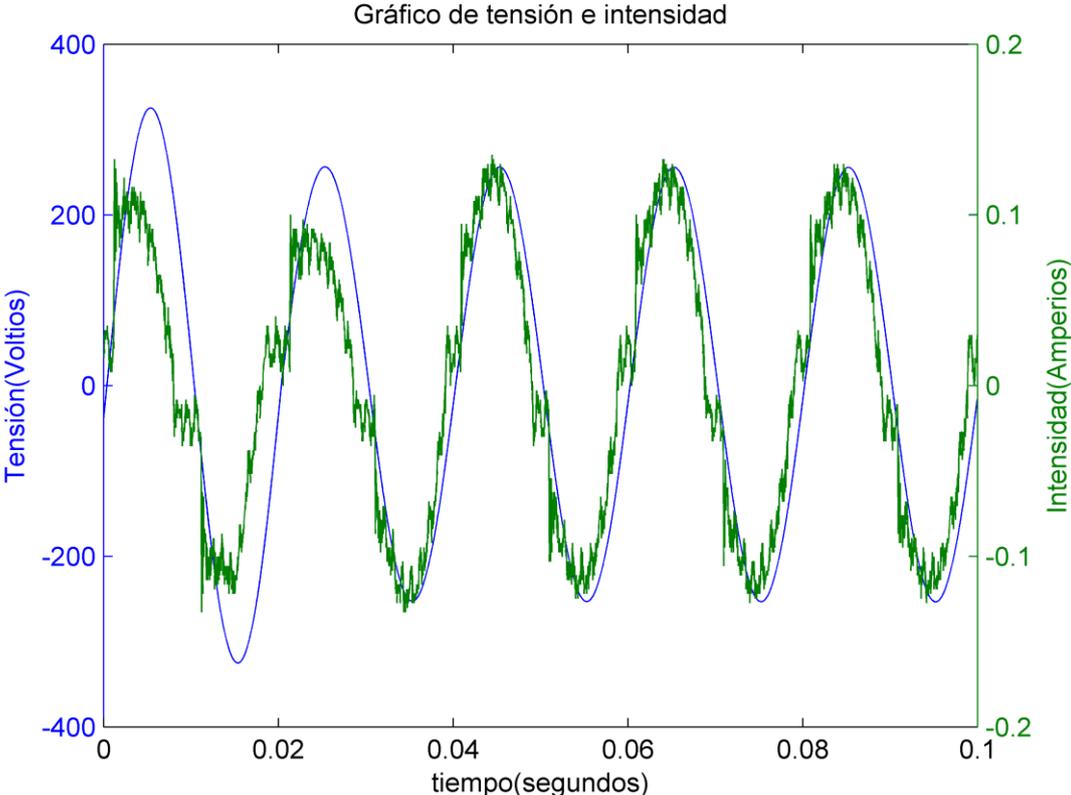


Figura 65: Bajada de tensión en una lámpara LED.

- Lámpara 4 (microled).

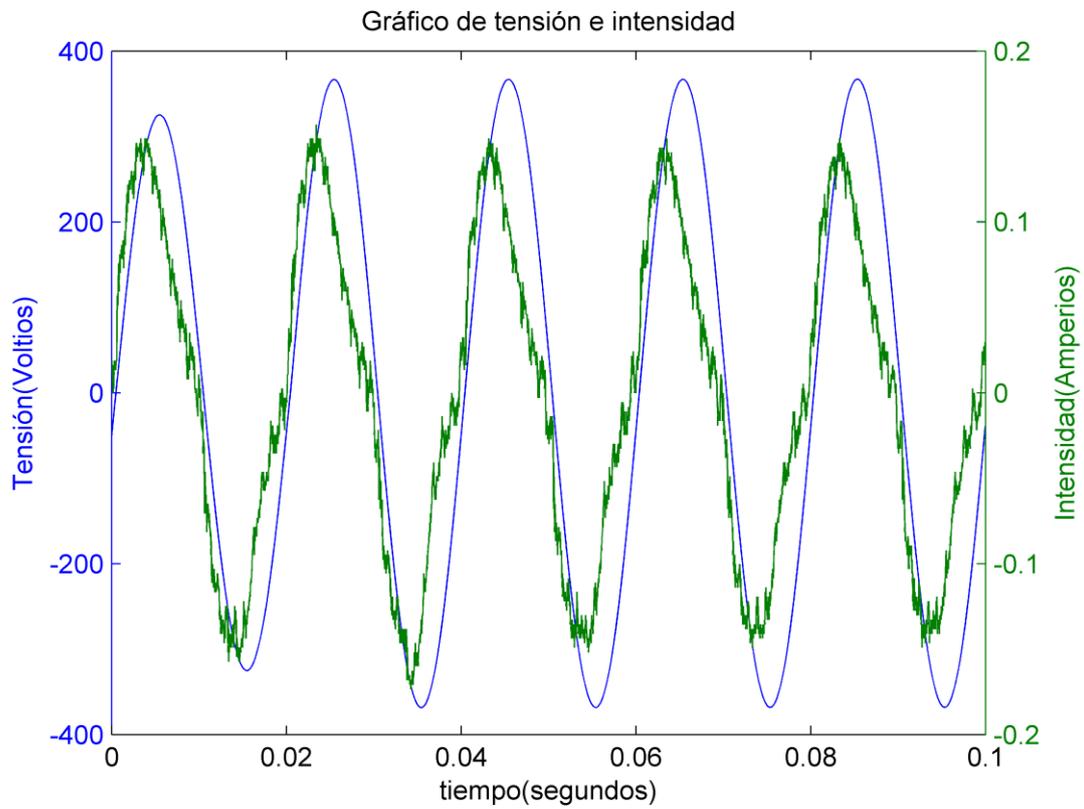


Figura 66: Sobretensión en una lámpara microled.

$U_{rms}(V)$	$P(W)$	$S(VA)$	f_{dp}
180	18,80	19,75	0,95
230	20,07	22,21	0,90
260	20,49	23,47	0,87

Tabla 34: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara microled.

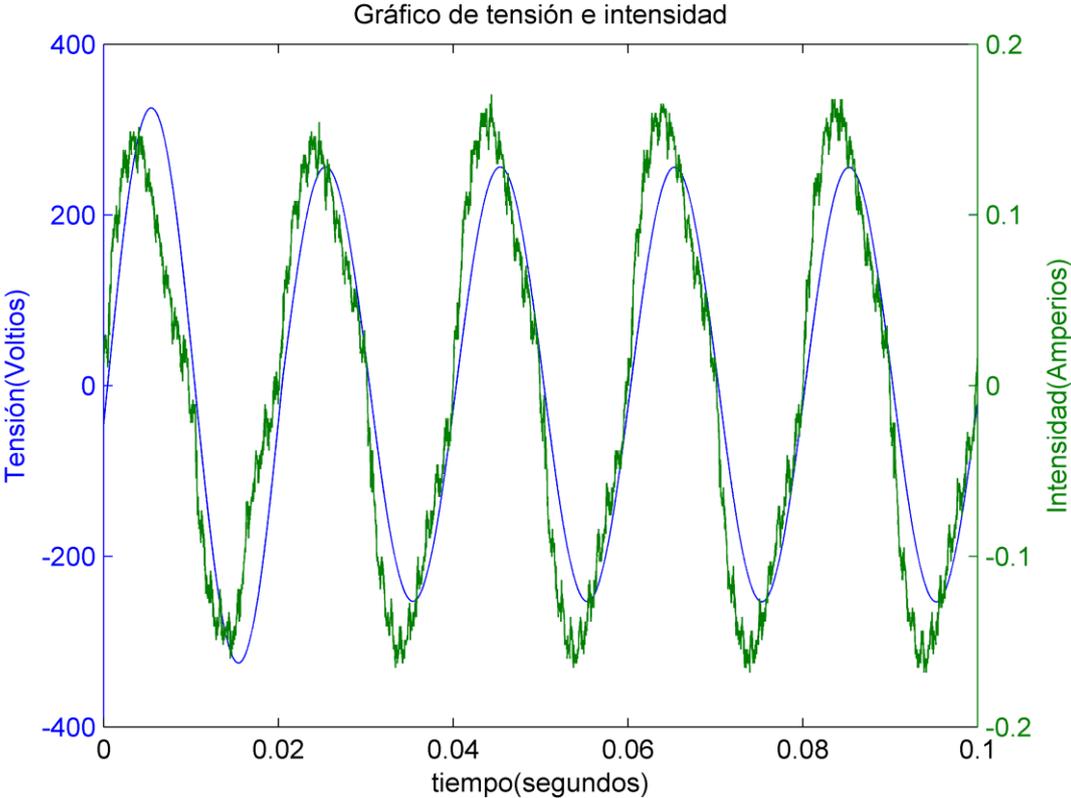


Figura 67: Bajada de tensión en una lámpara microled.

- Lámpara 10 (CFL con balasto electrónico).

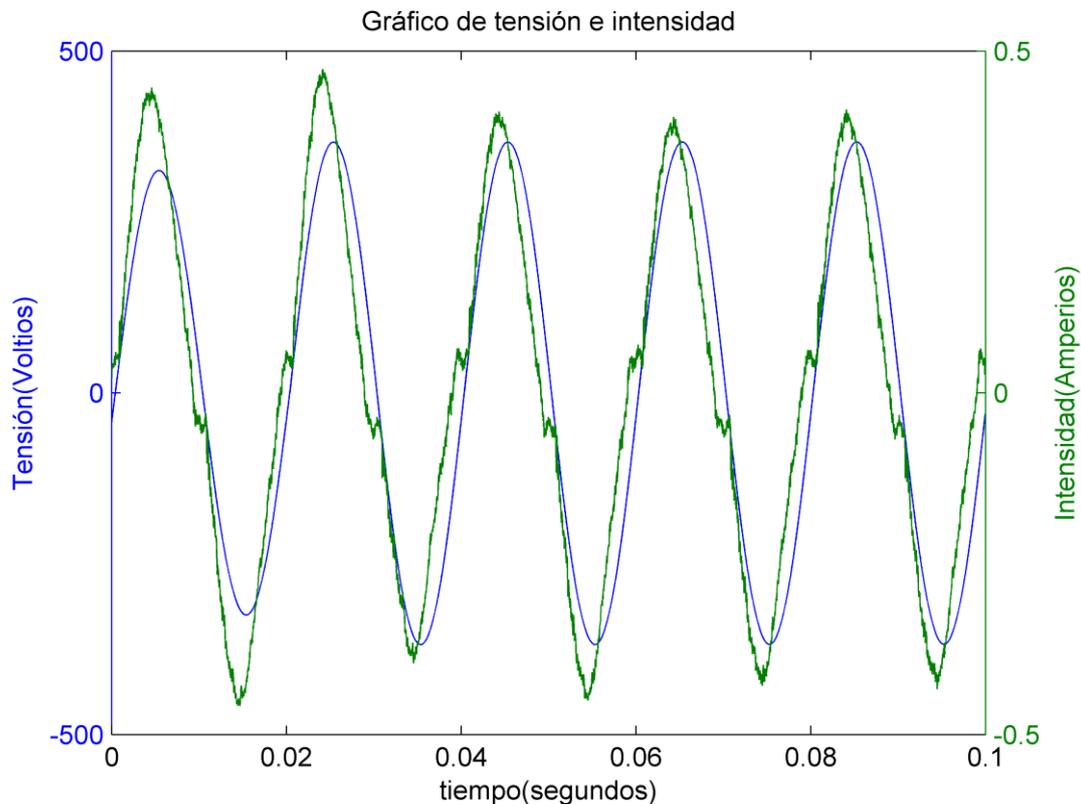


Figura 68: Sobretensión en una lámpara CFL con balasto electrónico.

$U_{rms}(V)$	$P(W)$	$S(VA)$	f_{dp}
180	61,14	62,26	0,98
230	60,37	63,06	0,96
260	61,60	65,58	0,94

Tabla 35: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara CFL con balasto electrónico.

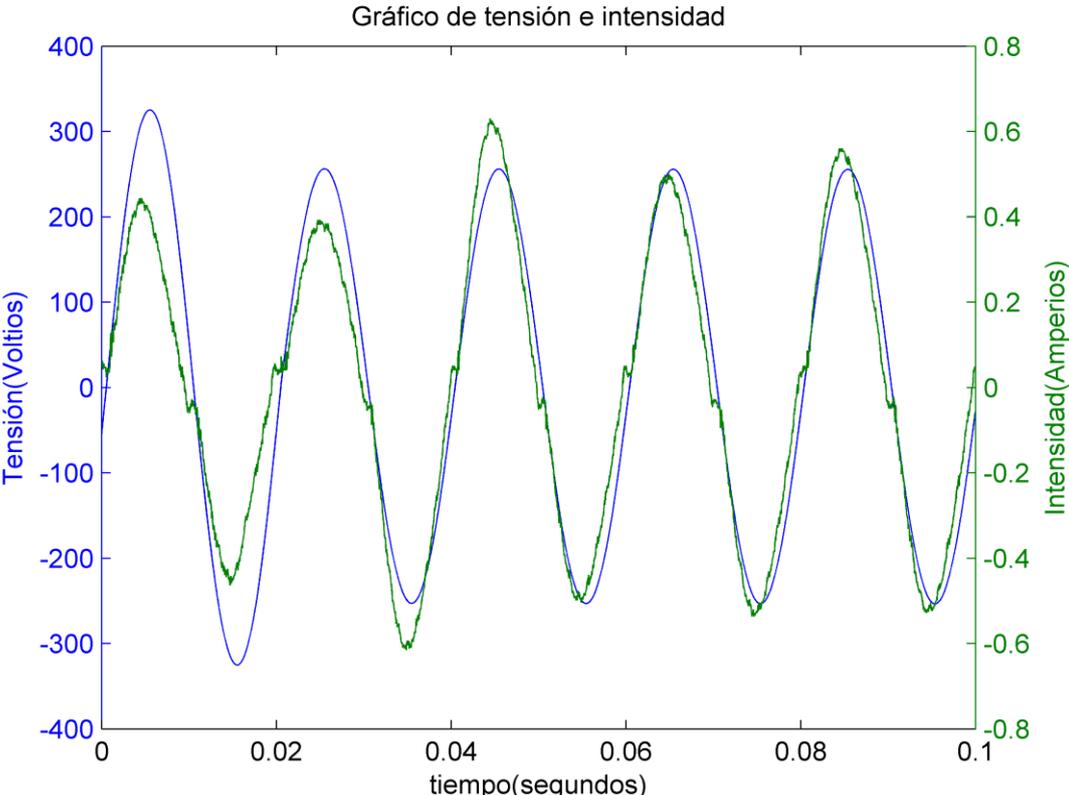


Figura 69: Bajada de tensión en una lámpara CFL con balasto electrónico.

- Lámpara 11 (CFL sin balasto electrónico).

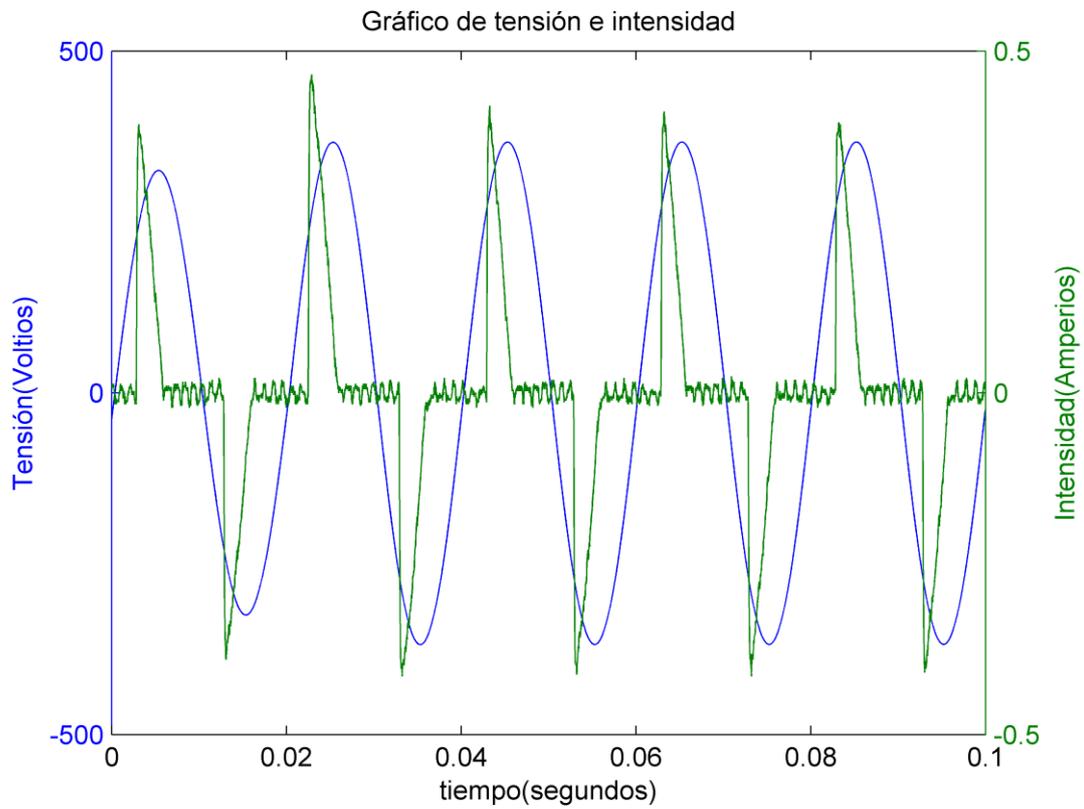


Figura 70: Sobretensión en una lámpara CFL sin balasto electrónico.

$U_{rms}(V)$	$P(W)$	$S(VA)$	f_{dp}
180	16,17	25,67	0,63
230	19,55	31,44	0,62
260	22,27	36,45	0,61

Tabla 36: Influencia de la tensión de alimentación en una lámpara CFL sin balasto electrónico.

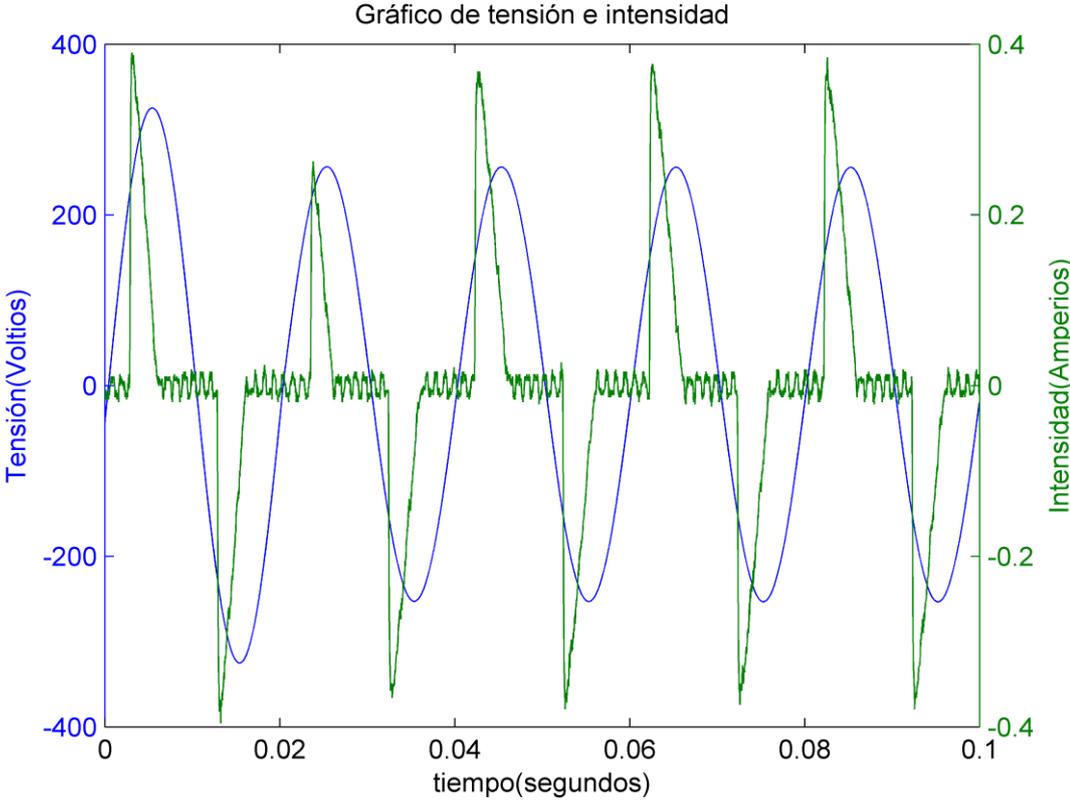


Figura 71: Bajada de tensión en una lámpara CFL sin balasto electrónico.

4.4.2. Microcortes.

En los ensayos pertenecientes a este subapartado, cortaremos el suministro de la tensión de alimentación (ideal) por un tiempo inferior al tiempo $t=3\text{ms}$ de duración de un ciclo a la frecuencia fundamental ($T=1/f=20\text{ ms}$), para luego dejar que la tensión de alimentación siga su curso como si nunca se hubiera producido ese microcorte en la tensión de alimentación tal como se muestra en las siguientes figuras, por ejemplo en la figura 72. Se estudiará así de forma cualitativa sus posibles efectos en base a la forma de onda de corriente generada durante dicho suceso.

Se producirá esto también para una lámpara de cada uno de los cuatro tipos diferentes disponibles en el laboratorio, al igual que se hizo en los ensayos pertenecientes al subapartado anterior, y por tanto se hará también con las lámparas número 1, 4, 10 y 11.

Los microcortes durarán exactamente 3ms y los produciremos para $\varphi=0, 15, 30, 45, 60, 75$ y 90° a fin de estudiar su efecto en distintas fases de un mismo período. Y antes de producirse dichos microcortes, se tomarán exactamente 1360 puntos digitalizados (muestras) de tensión e intensidad de corriente. Nótese como al elegir el desfase con que queremos que se produzca el microcorte, y decir que se tomen siempre los datos de los 1360 puntos anteriores (algo más de un ciclo y medio para que se vea perfectamente las ondas de tensión y corriente antes y después del microcorte ya que aunque lo que nos interesa es la respuesta, hay que ver la onda antes para poder compararla) la onda de tensión no partirá siempre de un mismo punto para $t=0$ segundos, sino que progresivamente irá avanzando de 15 en 15° tal y como lo hace el microcorte, lo que se corresponde con 0,833 ms de diferencia en el inicio entre dos gráficas consecutivas.

Mostramos a continuación gráficamente los resultados obtenidos de los ensayos de cada una de las lámparas, que teniendo en cuenta que van de 15 en 15° y empiezan en 0 y terminan en 90 grados, serán 7 ensayos por lámpara, 28 ensayos en total.

- Lámpara 1 (LED).

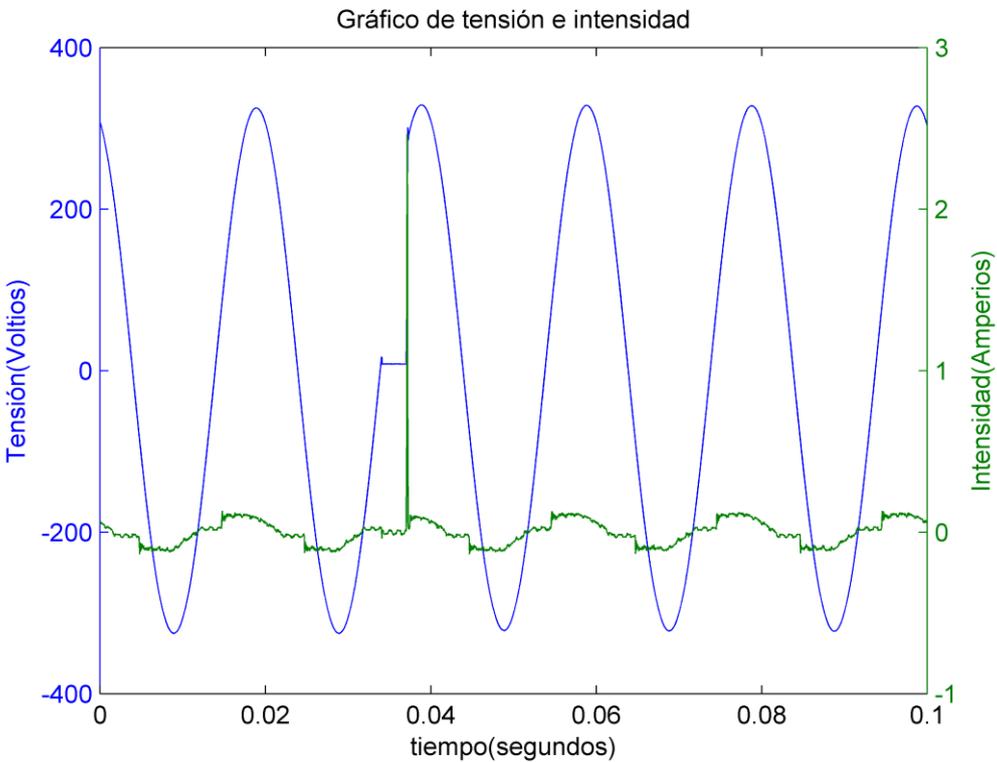


Figura 72: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=0$ grados.

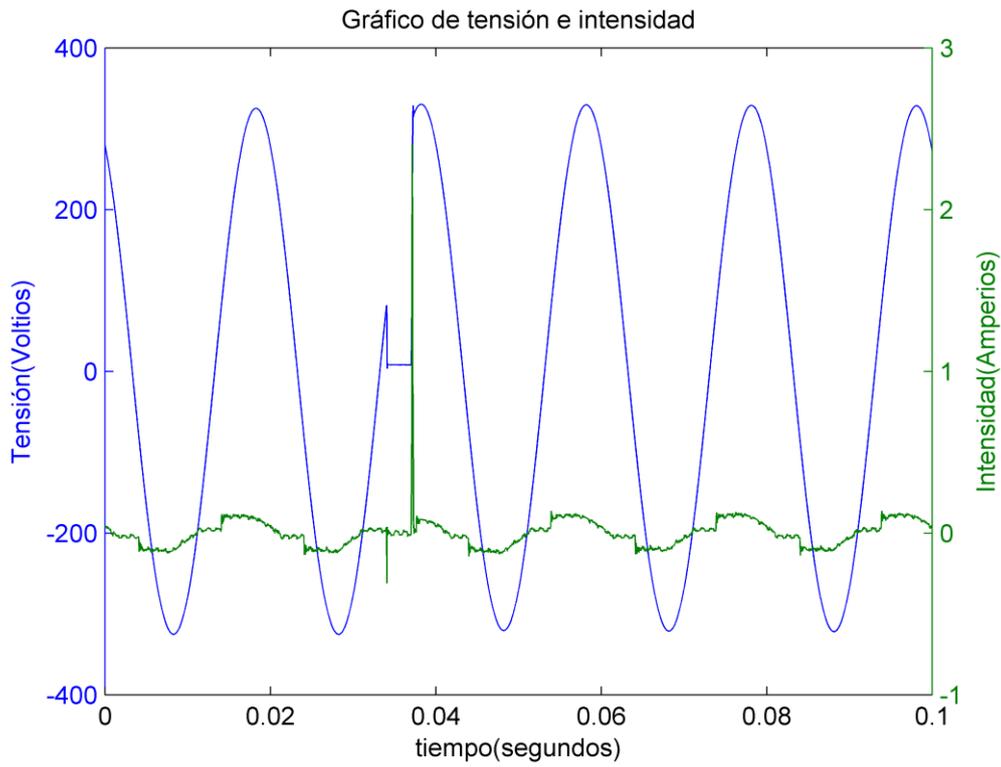


Figura 73: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=15$ grados.

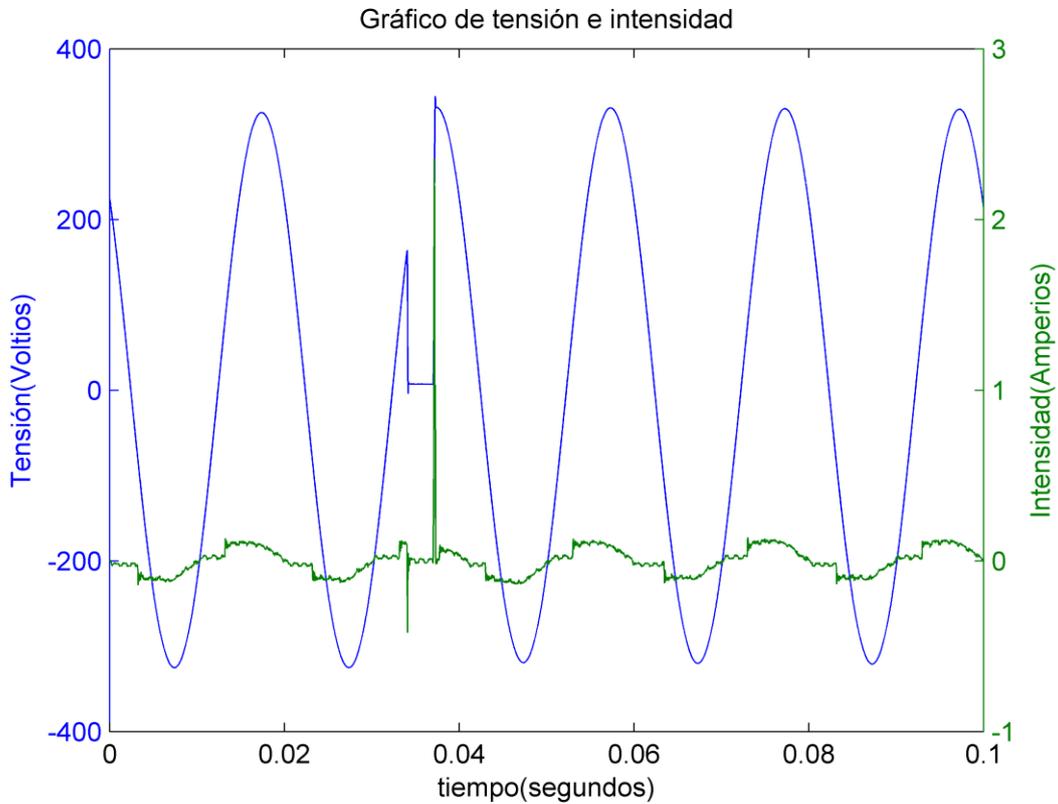


Figura 74: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=30$ grados.

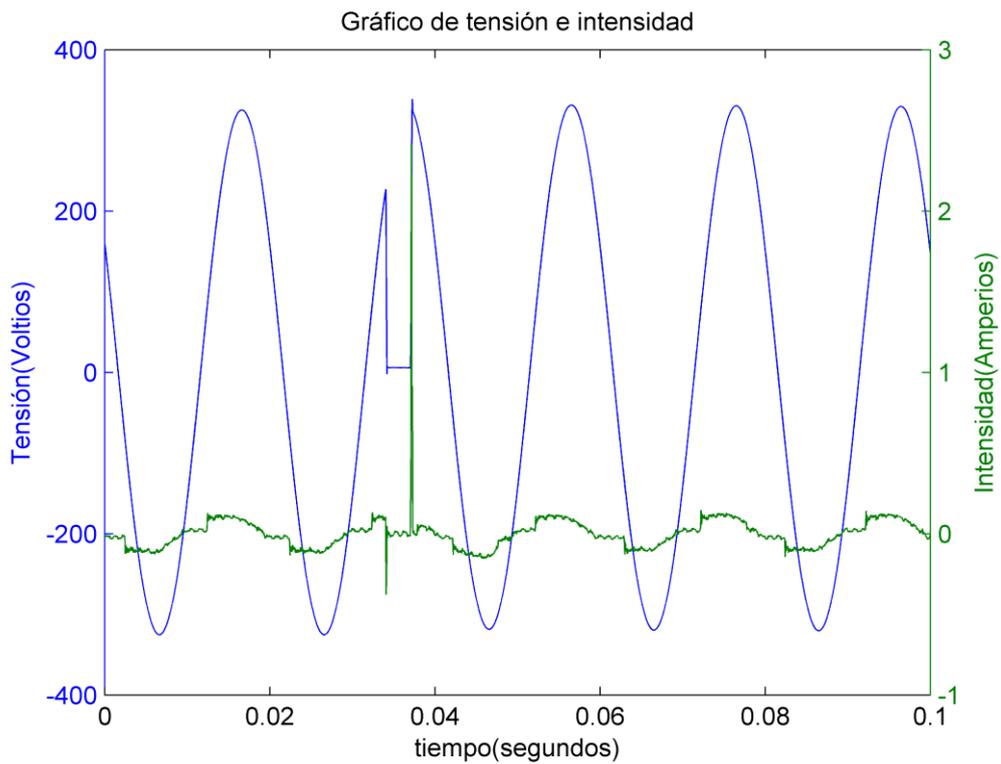


Figura 75: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=45$ grados.

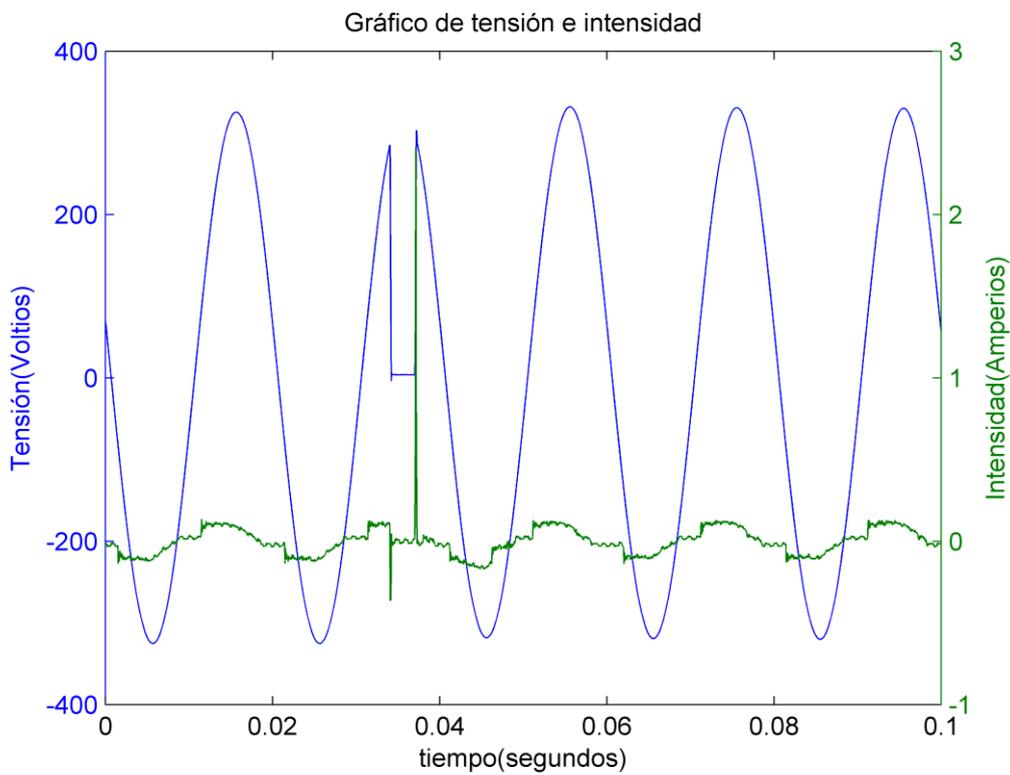


Figura 76: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=60$ grados.

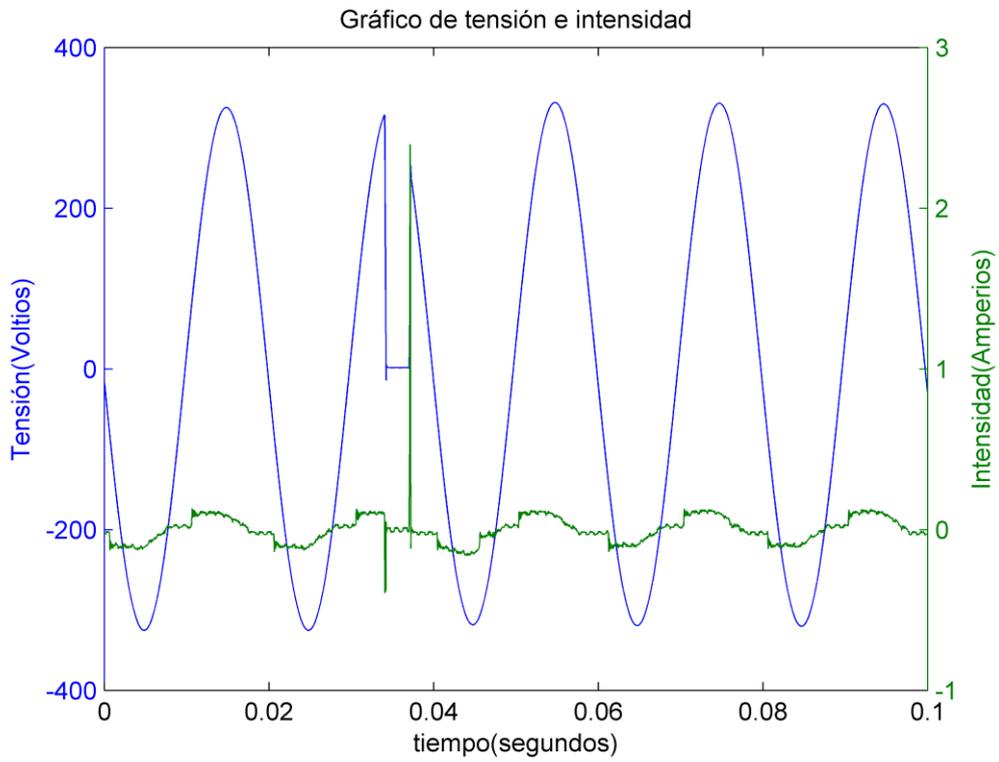


Figura 77: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=75$ grados.

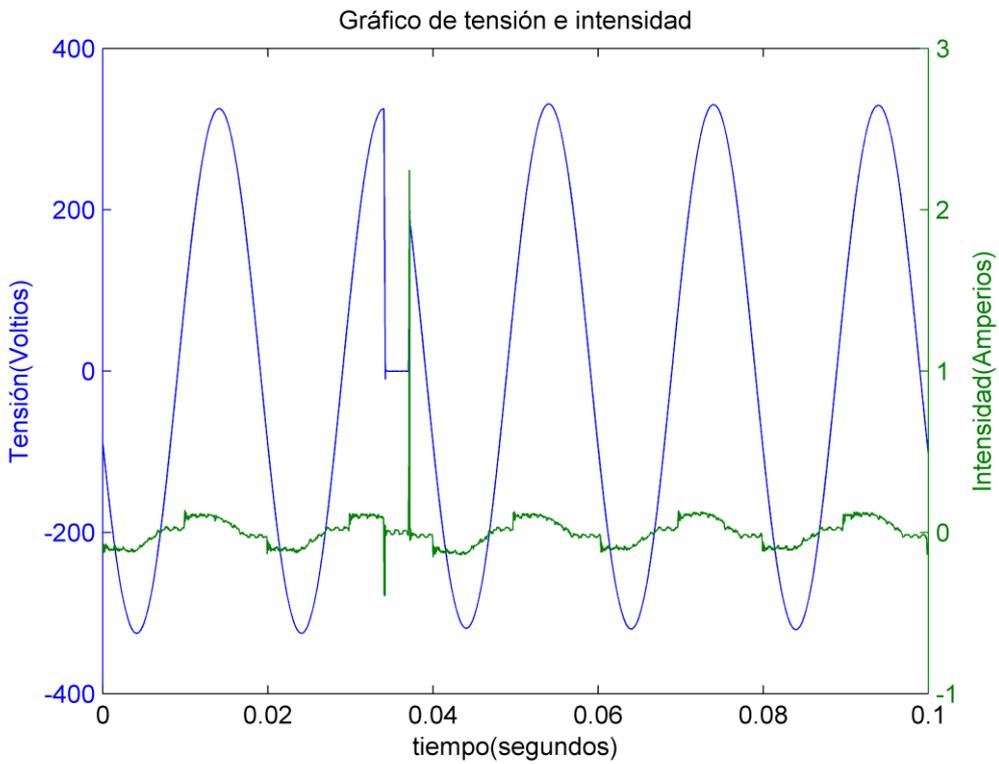


Figura 78: Microcorte de tensión de una lámpara LED para $\varphi=90$ grados.

- Lámpara 4 (microled).

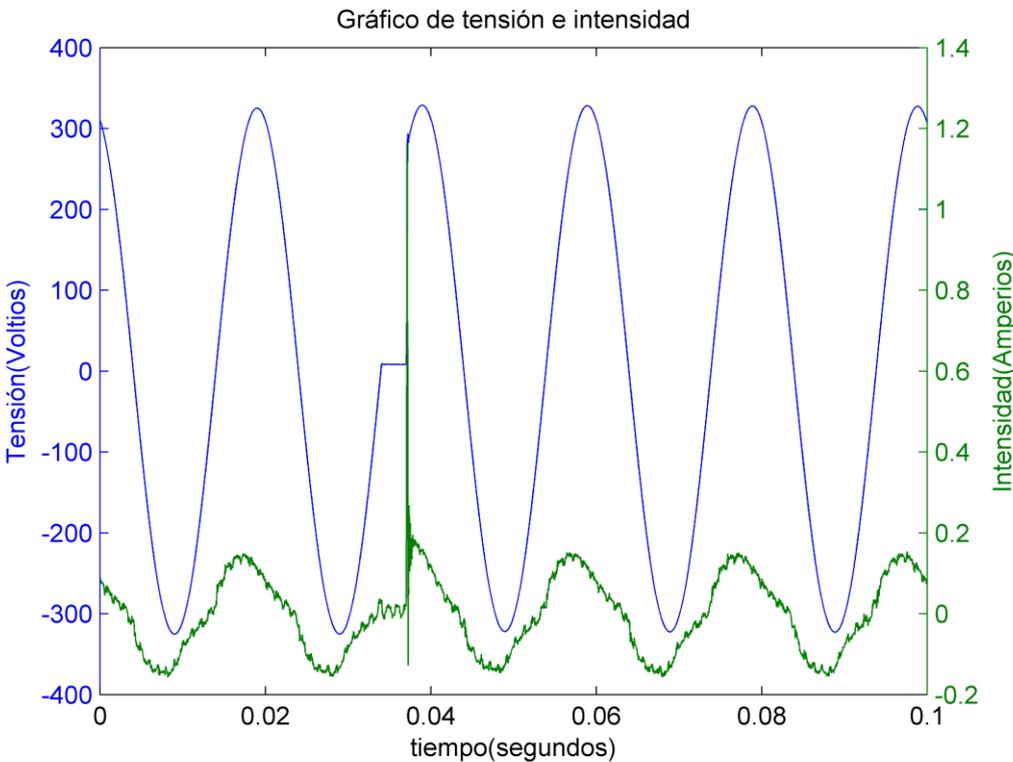


Figura 79: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=0$ grados.

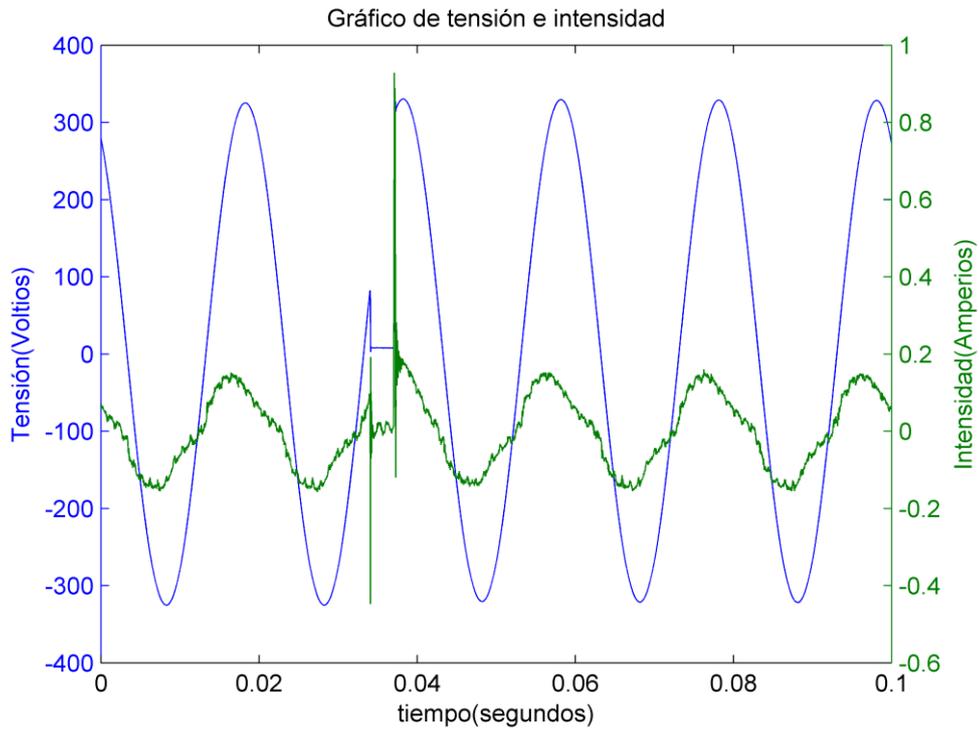


Figura 80: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=15$ grados.

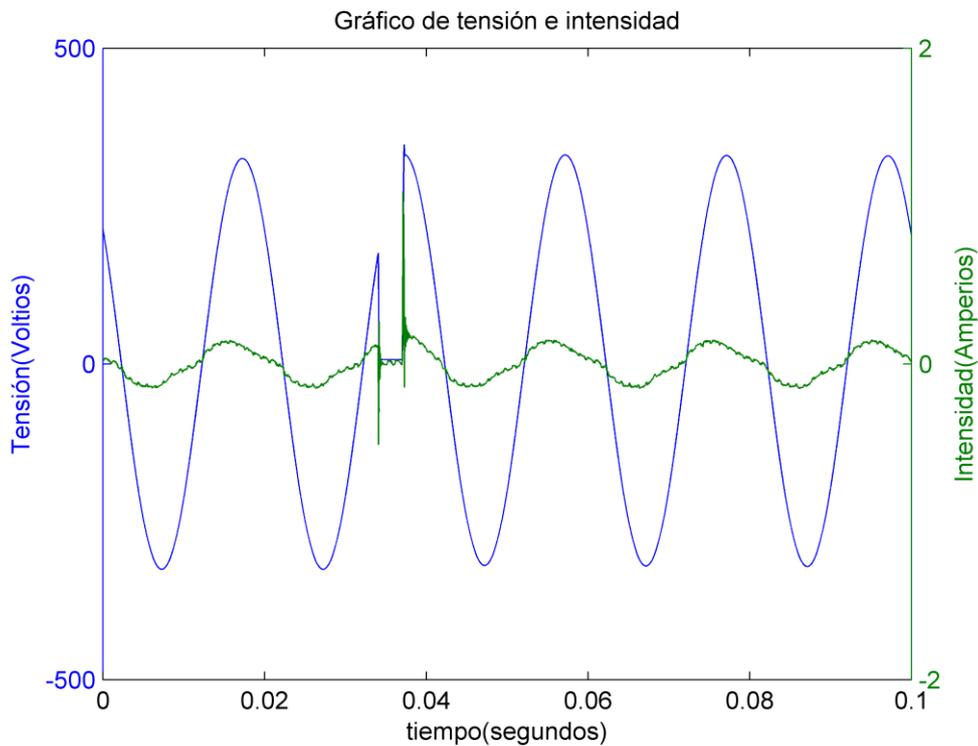


Figura 81: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=30$ grados.

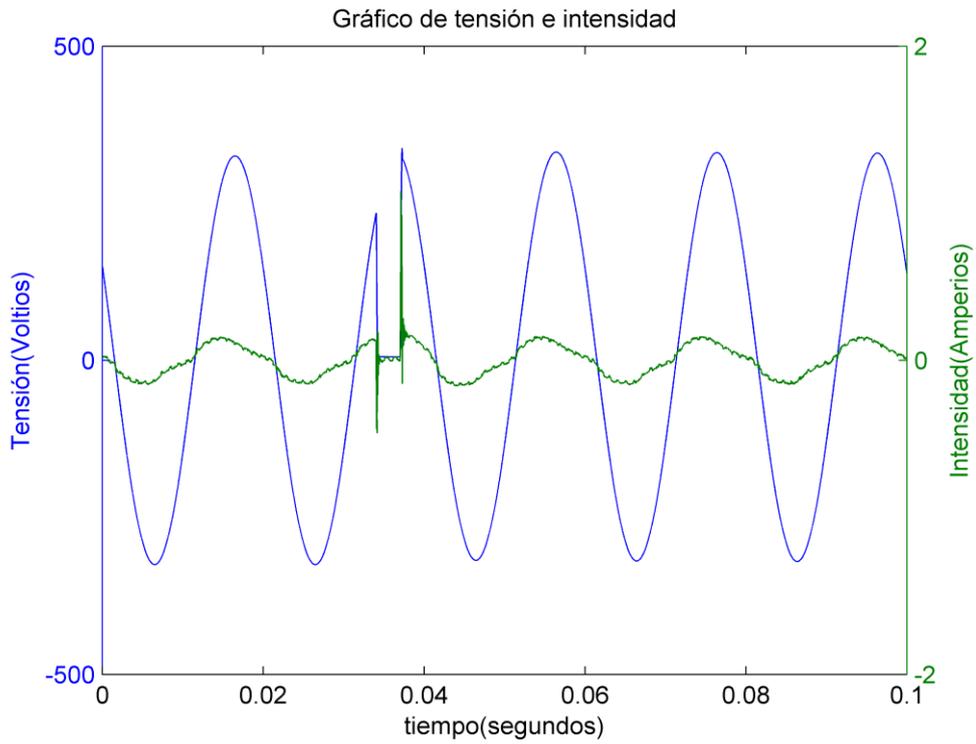


Figura 82: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=45$ grados.

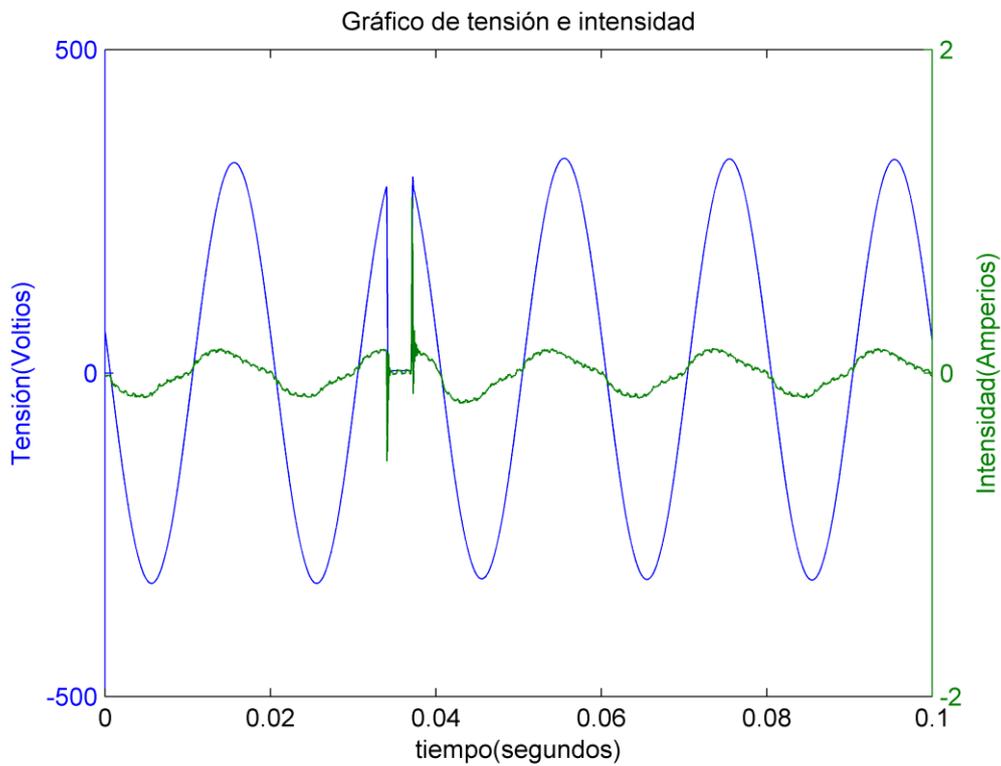


Figura 83: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=60$ grados.

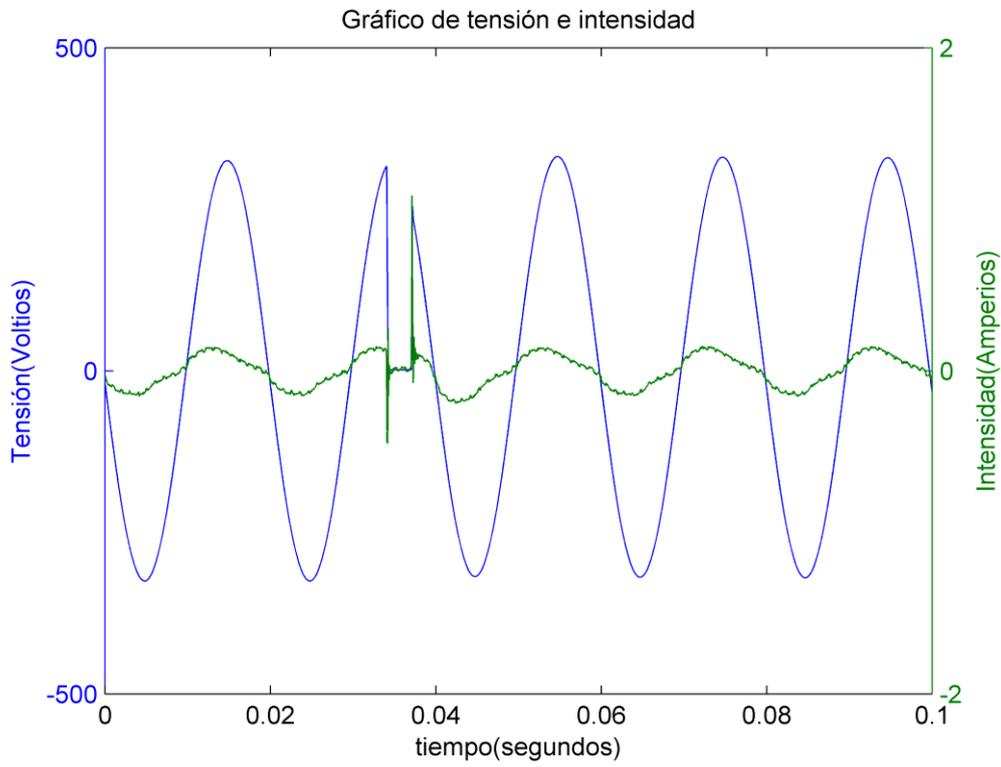


Figura 84: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=75$ grados.

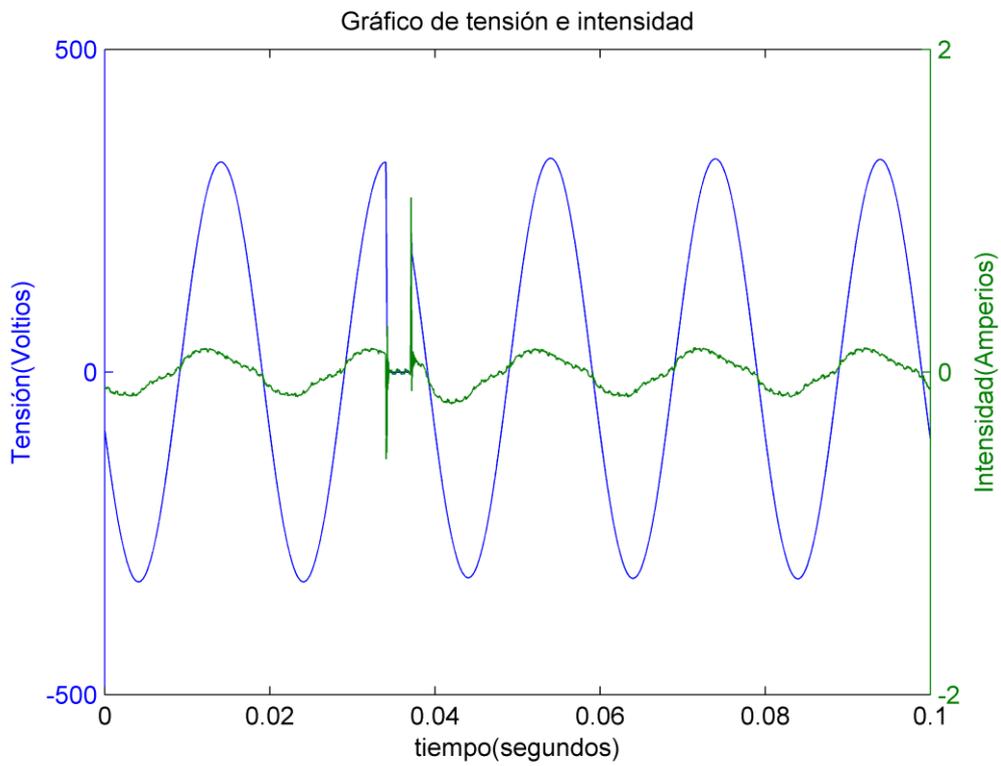


Figura 85: Microcorte de tensión de una lámpara microled para $\varphi=90$ grados.

- Lámpara 10 (CFL con balasto electrónico).

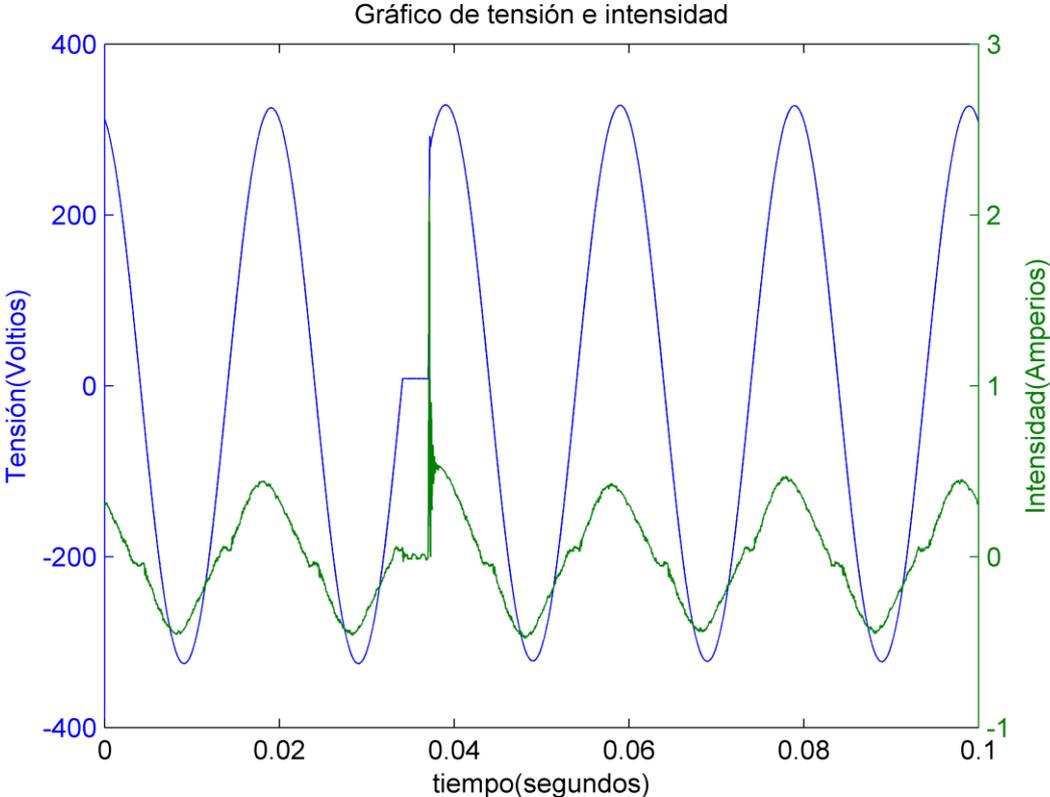


Figura 86: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=0$ grados.

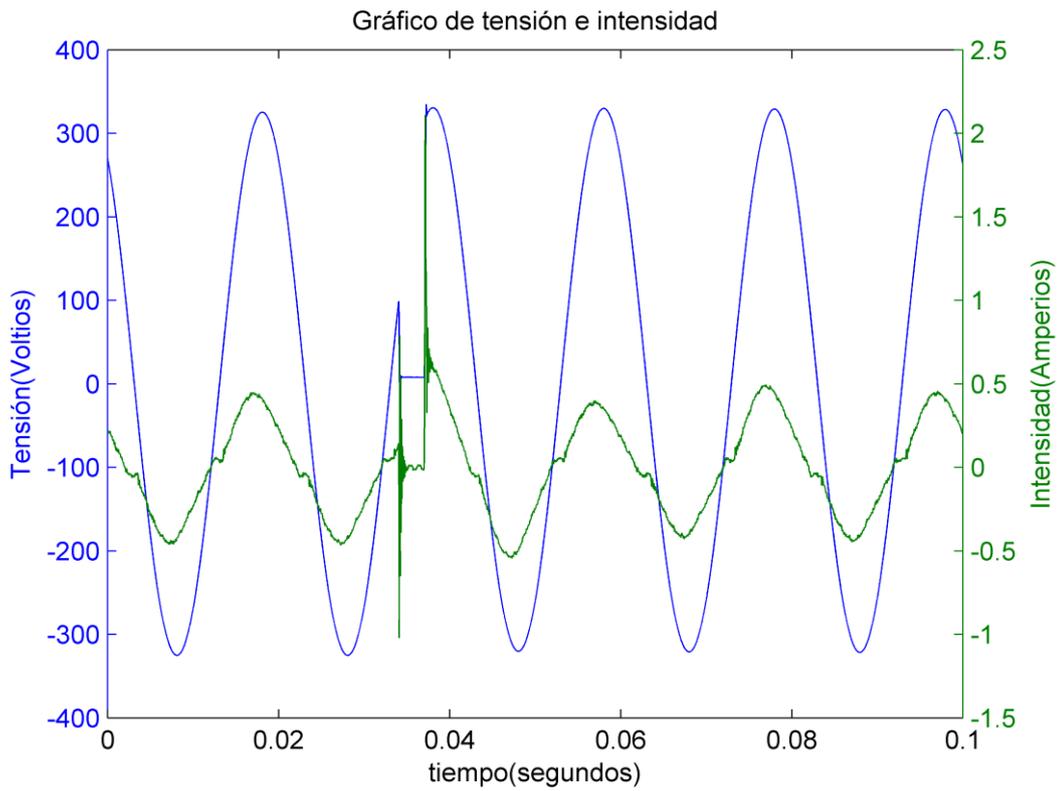


Figura 87: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=15$ grados.

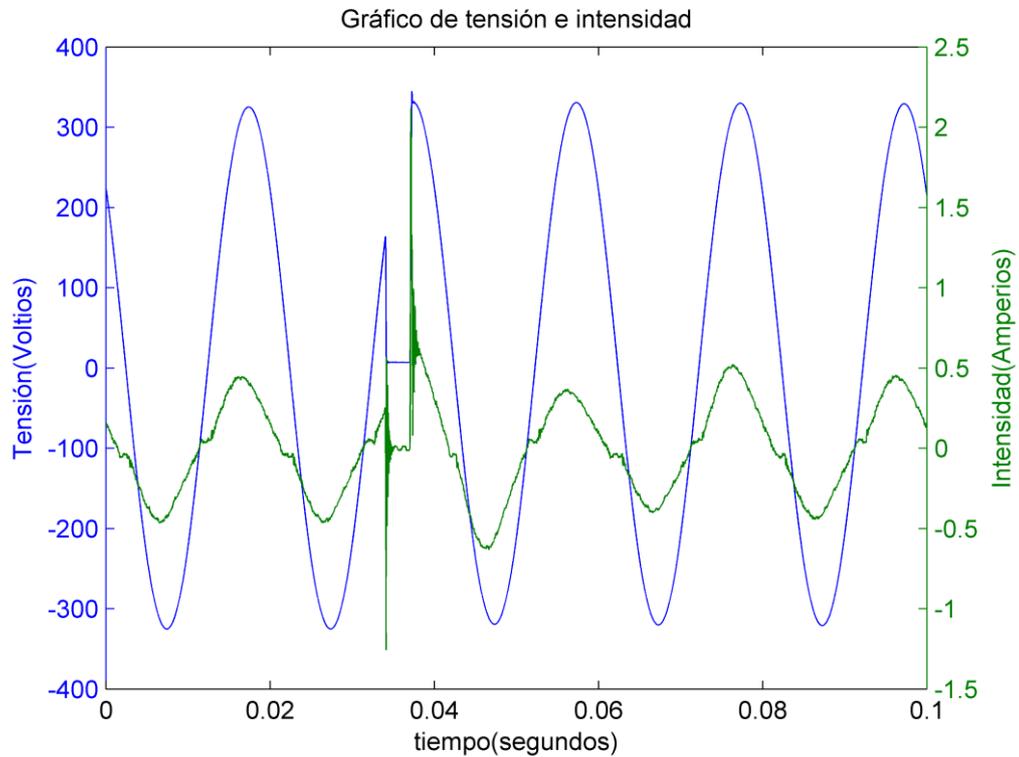


Figura 88: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=30$ grados.

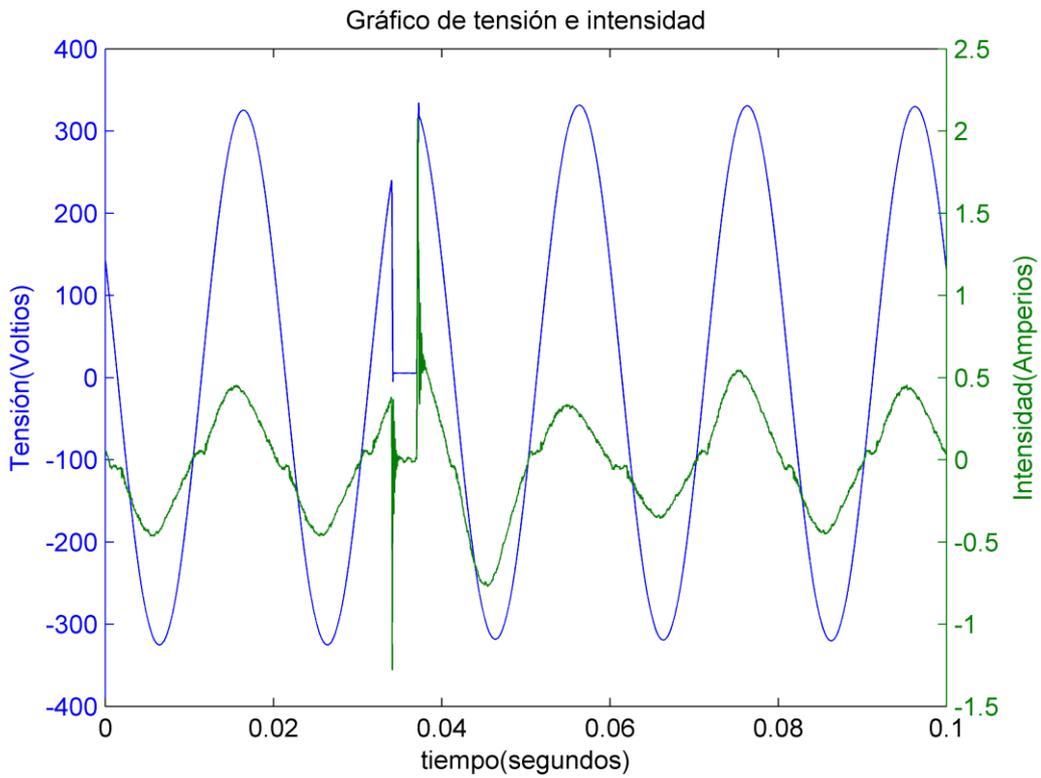


Figura 89: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=45$ grados.

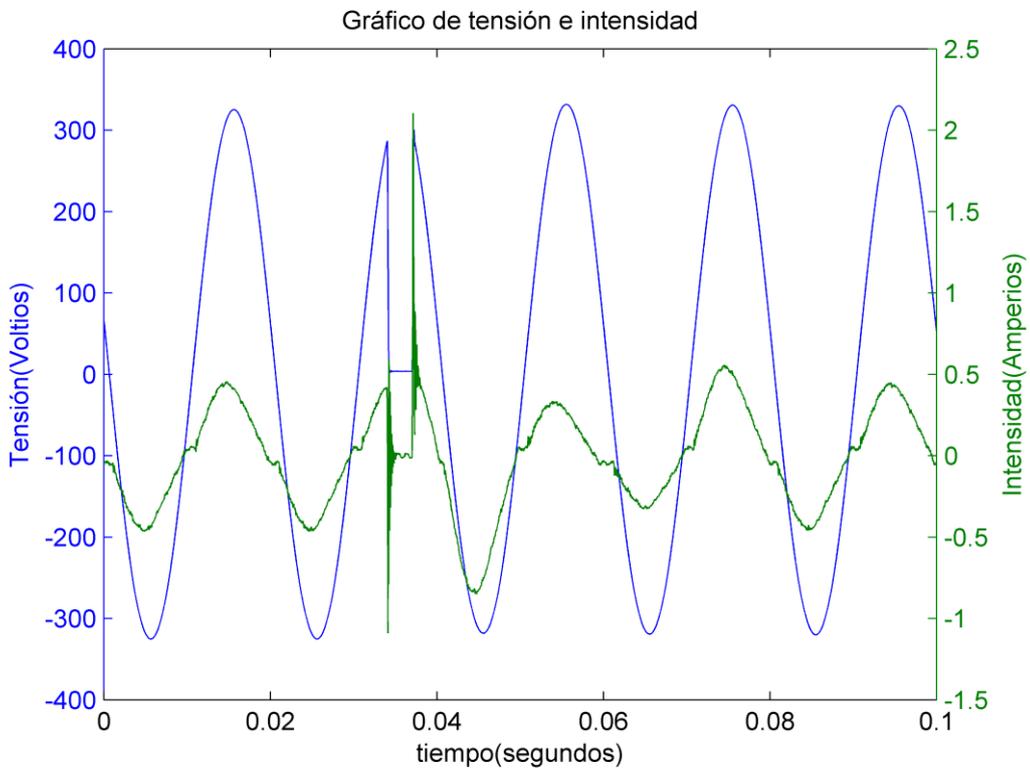


Figura 90: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=60$ grados.

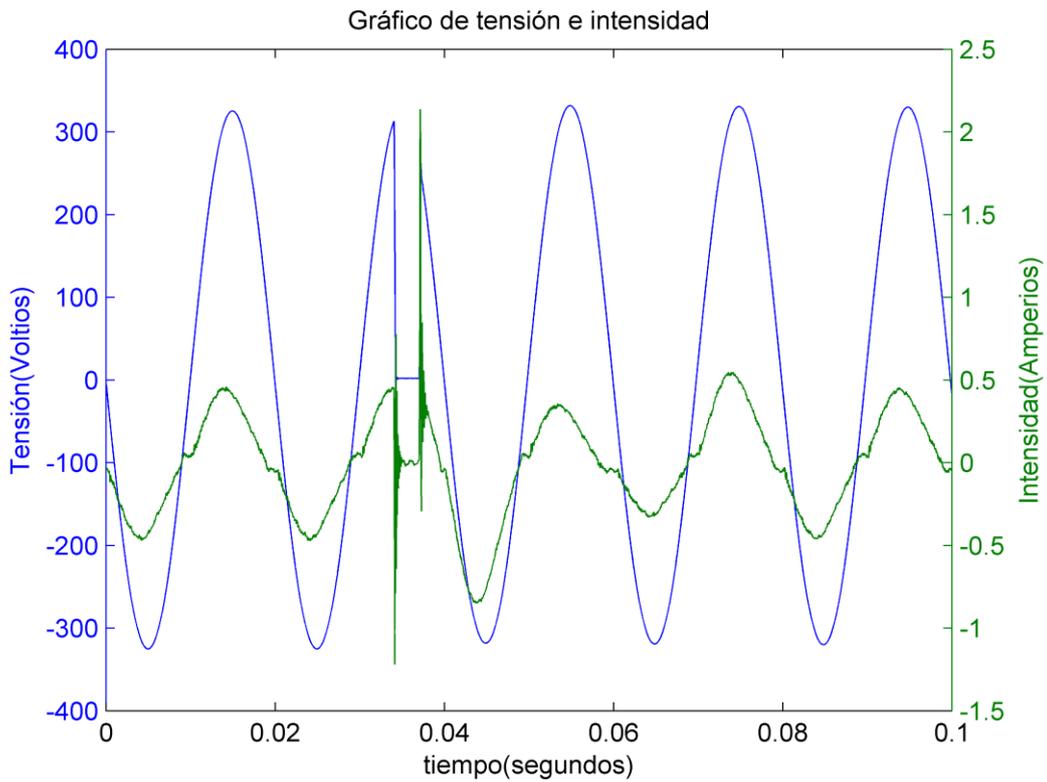


Figura 91: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=75$ grados.

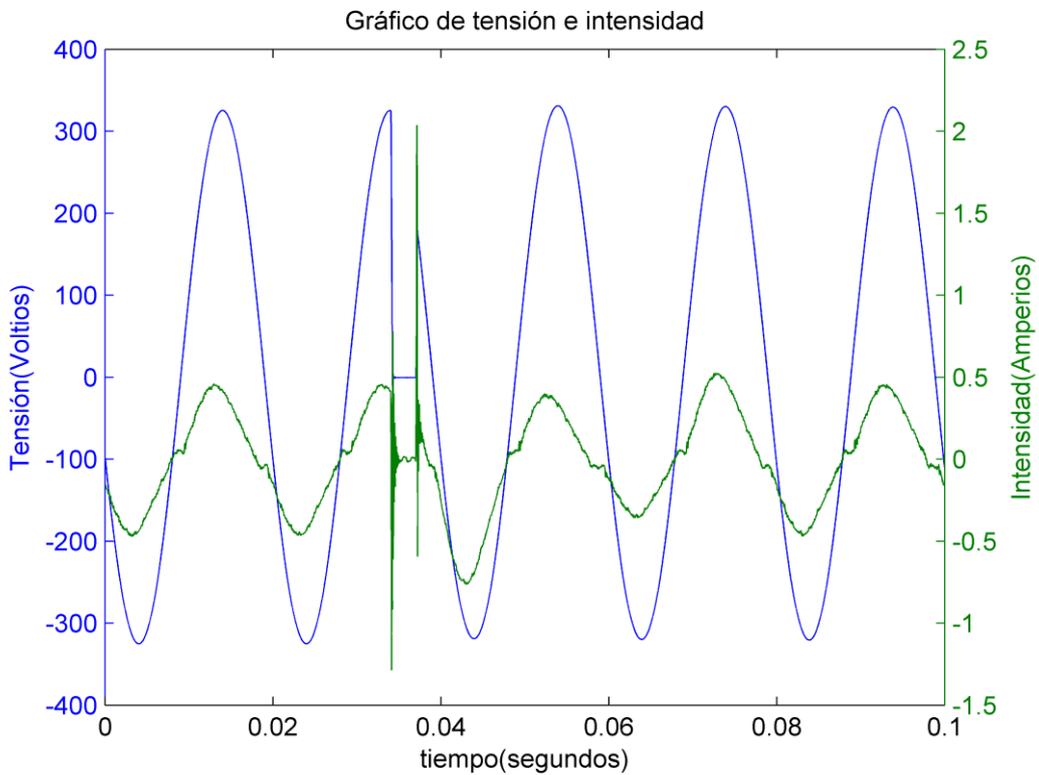


Figura 92: Microcorte de tensión de una lámpara CFL con balasto electrónico para $\varphi=90$ grados.

- Lámpara 11 (CFL sin balasto electrónico).

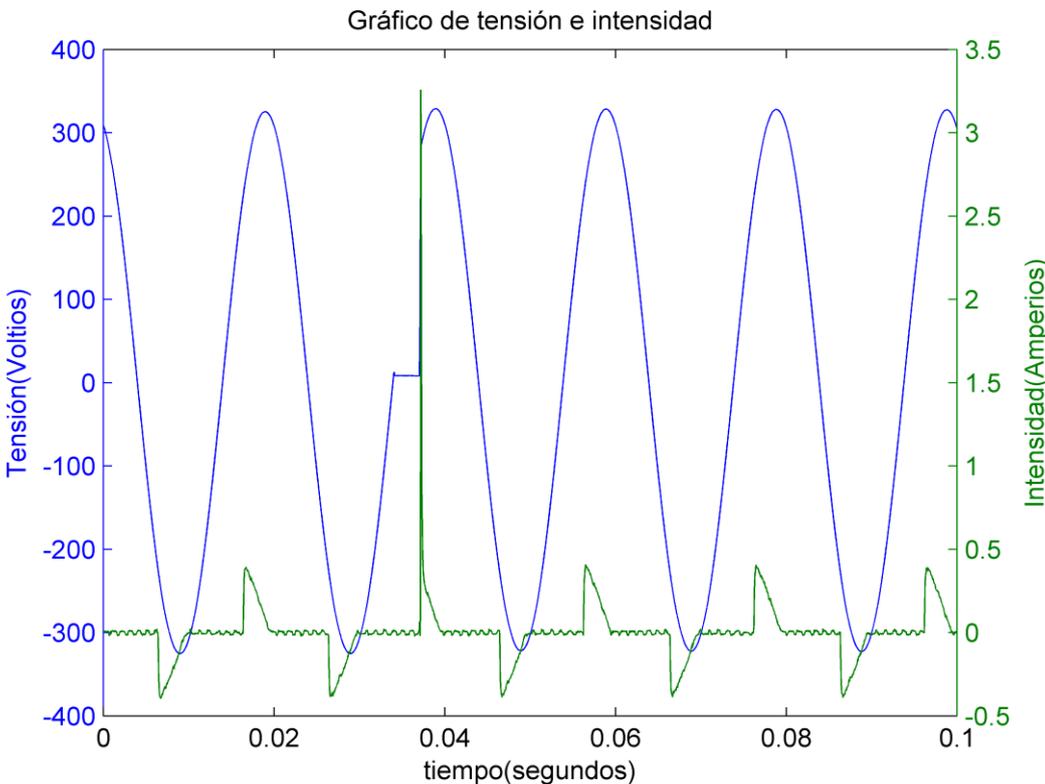


Figura 93: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=0$ grados.

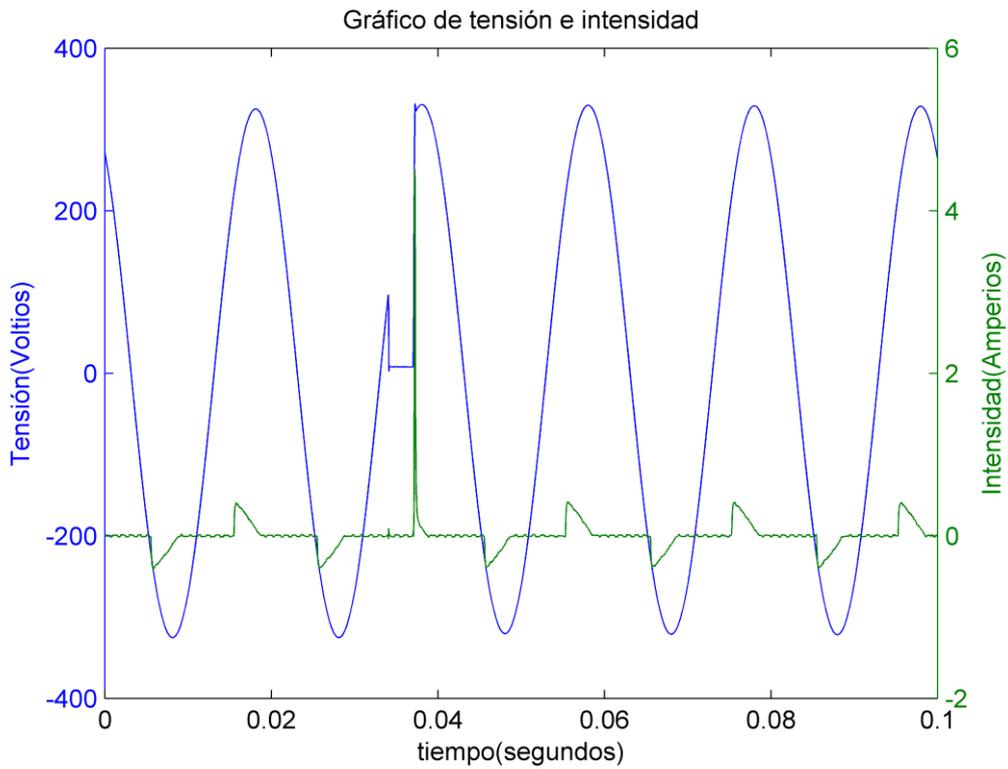


Figura 94: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=15$ grados.

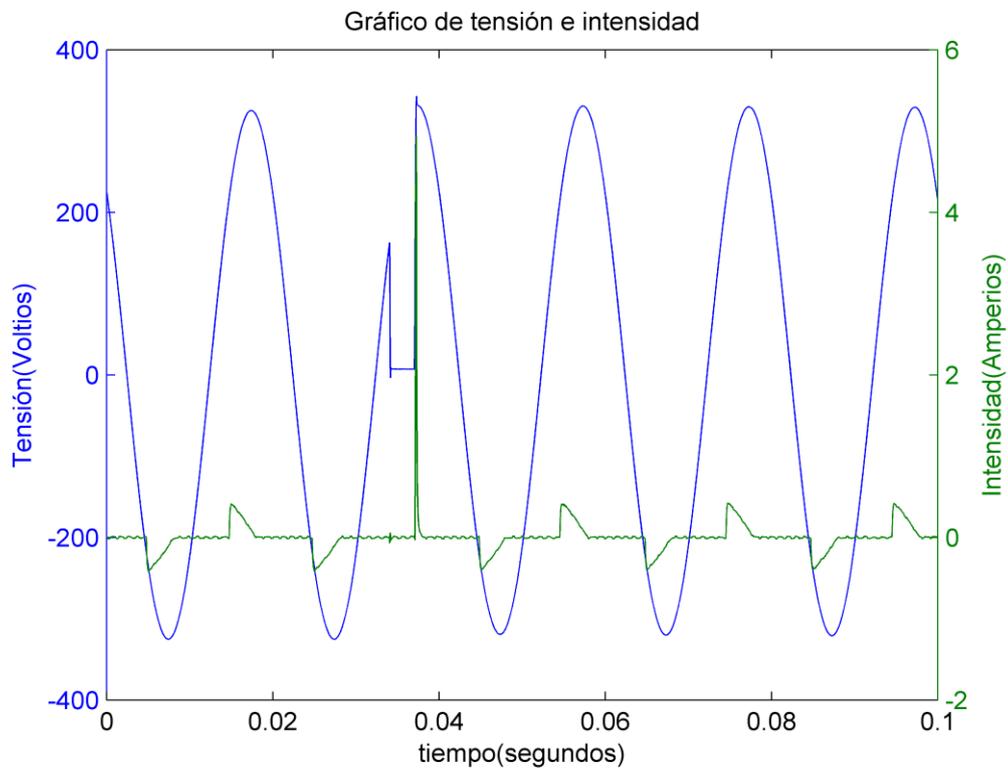


Figura 95: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=30$ grados.

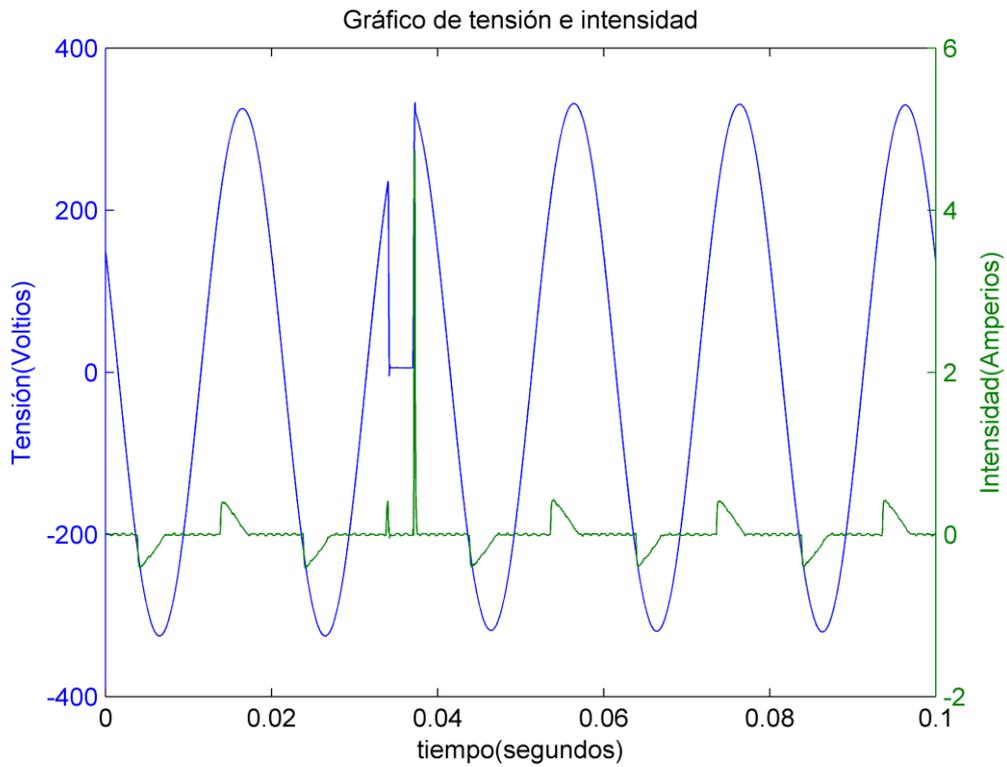


Figura 96: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=45$ grados.

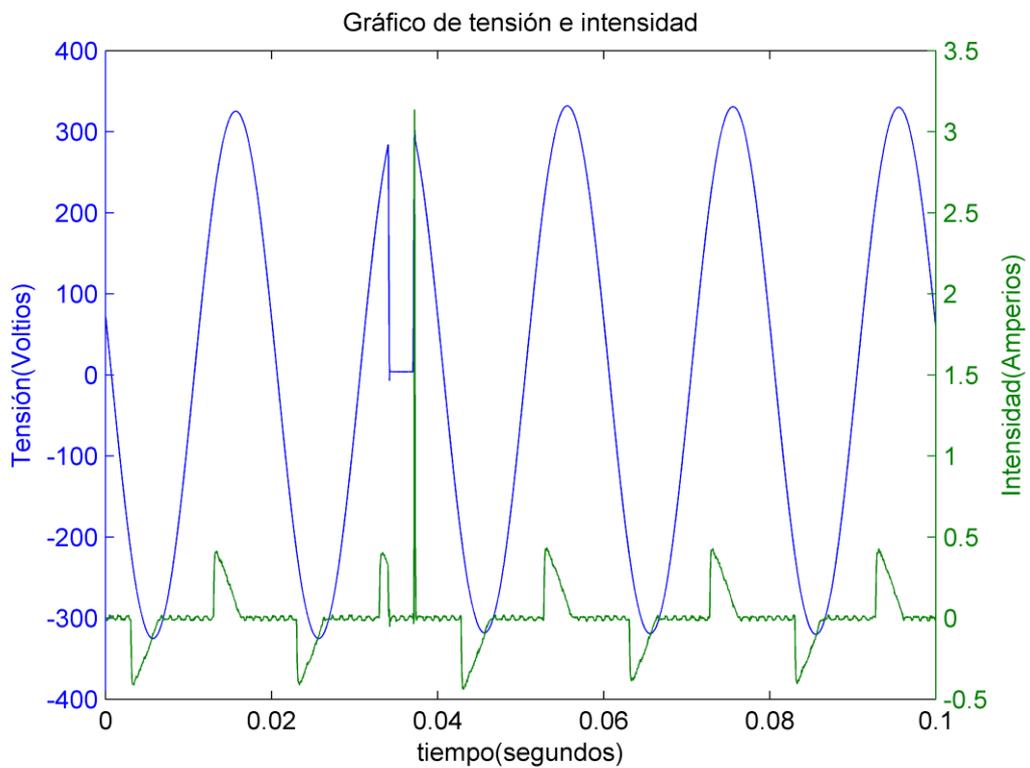


Figura 97: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=60$ grados.

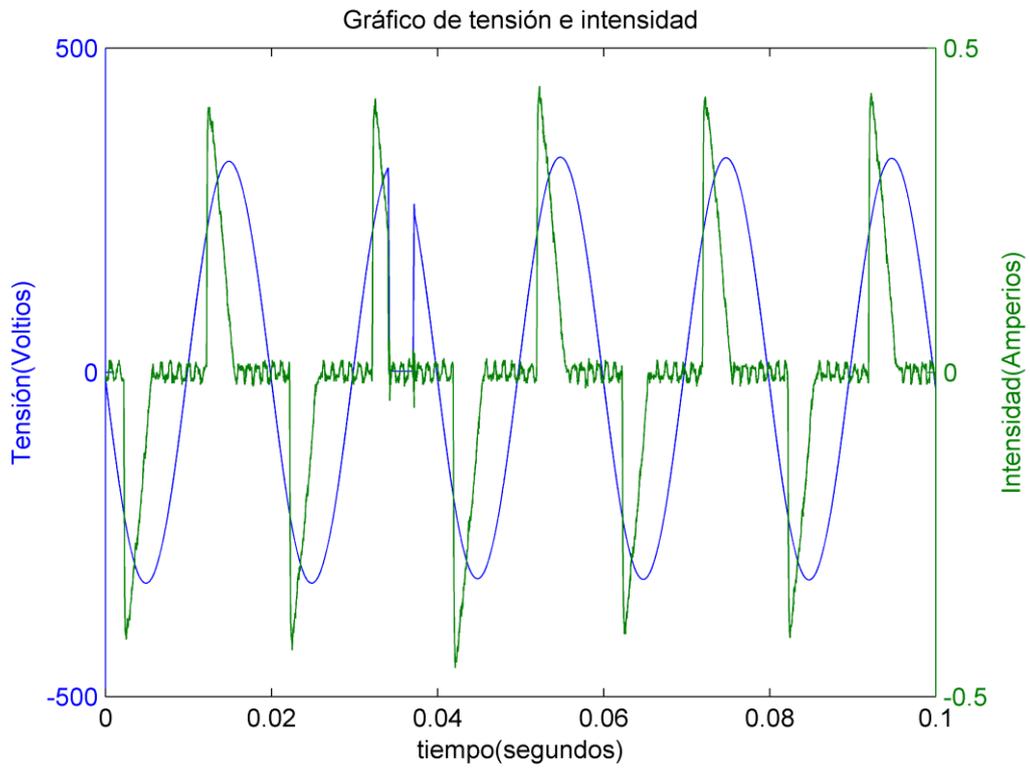


Figura 98: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=75$ grados.

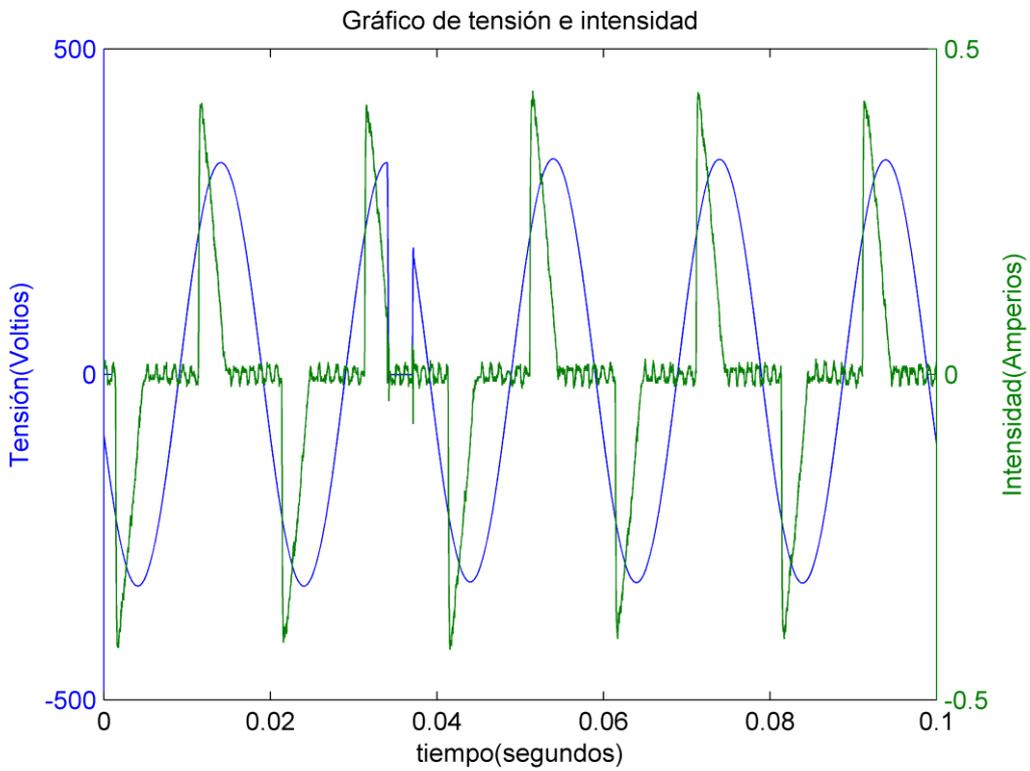


Figura 99: Microcorte de tensión de una lámpara CFL sin balasto electrónico para $\varphi=90$ grados.

4.5. Alimentación con tensión distorsionada.

Los grupos inversores de corriente -aquellos que transforman la corriente continua en corriente alterna- que son utilizados por ejemplo en centrales fotovoltaicas, generan armónicos en tensión, armónicos los cuáles llegan a las viviendas e instalaciones cercanas y hacen funcionar a los aparatos eléctricos de sus instalaciones en su presencia. También generan este tipo de armónicos los equipos SAI (Sistemas de Alimentación Ininterrumpida) que se utilizan en instalaciones de pequeña potencia donde ha de asegurarse el suministro eléctrico por cuestiones de seguridad, salud, etc, ya que también son equipos inversores de corriente. Y por último, incluso en el caso de que alimentemos a nuestra instalación con una tensión ideal, también podemos encontrarnos con el caso de que cargas no lineales produzcan armónicos en tensión, los cuáles afectan a las demás cargas de la instalación [32].

Así pues, y a fin de simular lo anteriormente dicho para cargas no lineales, en este apartado reproduciremos estudios anteriormente realizados en previos apartados de este mismo capítulo cuatro, sólo que no con una tensión de alimentación con una forma de onda perfectamente sinusoidal de valor eficaz 230V y 50Hz de frecuencia, sino que con una tensión de alimentación con presencia de varios armónicos.

Concretamente, emplearemos en este ensayo las lámparas 1 (LED), 4(microled), 10 (CFL con balasto electrónico) y 11 (CFL sin balasto electrónico o CFL convencional). Y a cada una de esas lámparas, funcionando por separado las someteremos a cada uno de los tres siguientes ensayos:

- Primer ensayo.
 - Armónico fundamental de onda sinusoidal de 230V rms y 50Hz.
 - Tercer armónico de valor eficaz un 10% del fundamental.
 - Quinto armónico del 5%.
 - Séptimo armónico del 2%.
- Segundo ensayo.
 - Armónico fundamental de 230V.
 - Tercer armónico del 15%.
 - Quinto armónico del 7,5%.
 - Séptimo armónico del 3%.

- Tercer ensayo.
 - Armónico fundamental de 230V.
 - Tercer armónico del 20%.
 - Quinto armónico del 10%.
 - Séptimo armónico del 5%.

Nótese que todos los armónicos que componen la onda de salida son impares, y es que esto se ha hecho así debido a que todos los armónicos presentes en la red eléctrica son impares tal como se puede comprobar fácilmente de los resultados de los ensayos hasta aquí mostrados donde todos los armónicos pares de corriente son nulos.

Se mostrarán así pues en cada uno de los subapartados que siguen los resultados obtenidos para cada una de las cuatro lámparas en presencia de armónicos, al igual que se hizo con la tensión de alimentación ideal disponible en la red. No obstante, como ya se ha comentado, serán tres las combinaciones de armónicos a las que la someteremos así que se mostrarán esos tres ensayos uno a continuación del otro en cada uno de dichos apartados.

Después de esto, repetiremos el ensayo del contador cuyos resultados se muestran en las páginas 115 y 116, sólo que esta vez no será un ensayo con una alimentación de tensión con onda sinusoidal de valor eficaz 230V, sino para la combinación de armónicos que corresponden al primer ensayo de los tres enunciados en la página anterior, es decir, al armónico fundamental de 230V, un tercer armónico del 10%, un tercer armónico del 5% y un séptimo armónico del 2%, el cual se tratará con mayor detalle a continuación, aunque ya adelantamos que al igual que en el caso anterior, se han puesto a funcionar todas las lámparas a la vez.

4.5.1. Lámpara número 1 (LED).

- **Primer ensayo.**

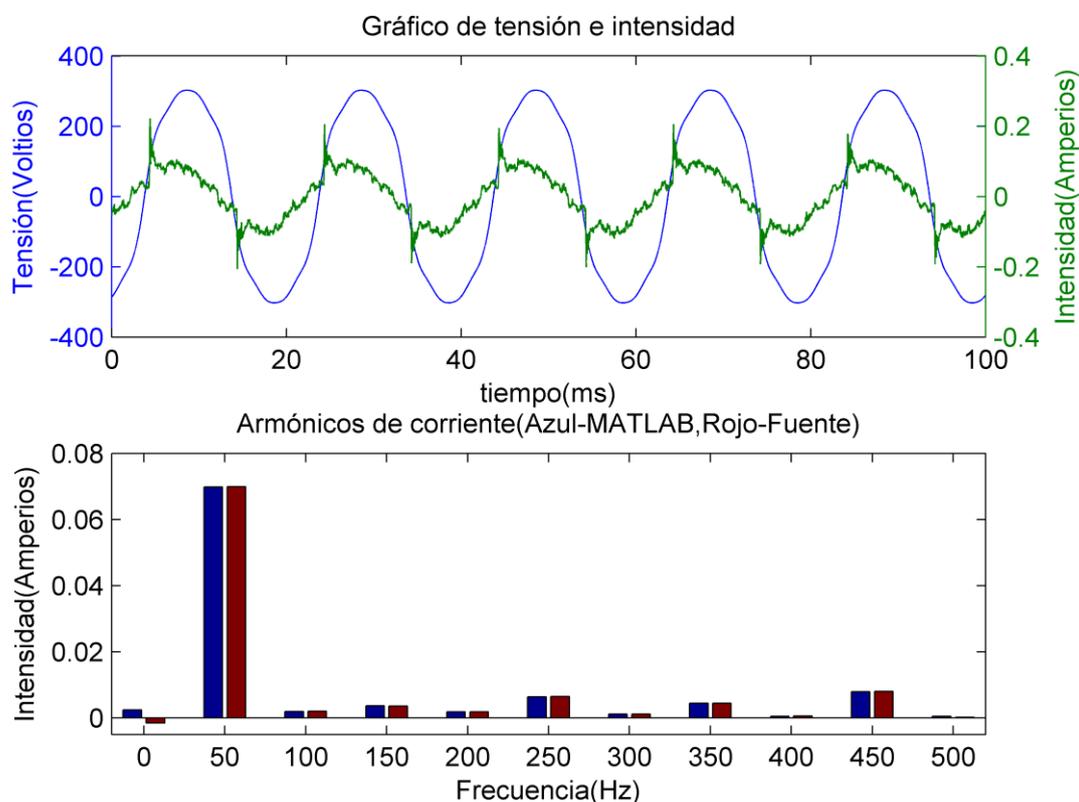


Figura 100: Gráfico de lámpara 1 bajo combinación 1.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	231,43	231,54	0,05
$I_{rms}(A)$	0,0725	0,0724	0,14
$P(W)$	14,04	14,04	0
$Q(VAr)$	9,20	-8,16	0,13
$D(VAd)$	-	3,53	-
$S(VA)$	16,78	16,62	0,96
$I_{max}(A)$	0,2219	0,2219	0
$\cos(\varphi)$	-	0,85	-
fdp	0,84	0,84	0
$THDi$	0,26	0,22	18,18
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 37: Parámetros eléctricos para lámpara 1 bajo la combinación 1.

• **Segundo ensayo.**

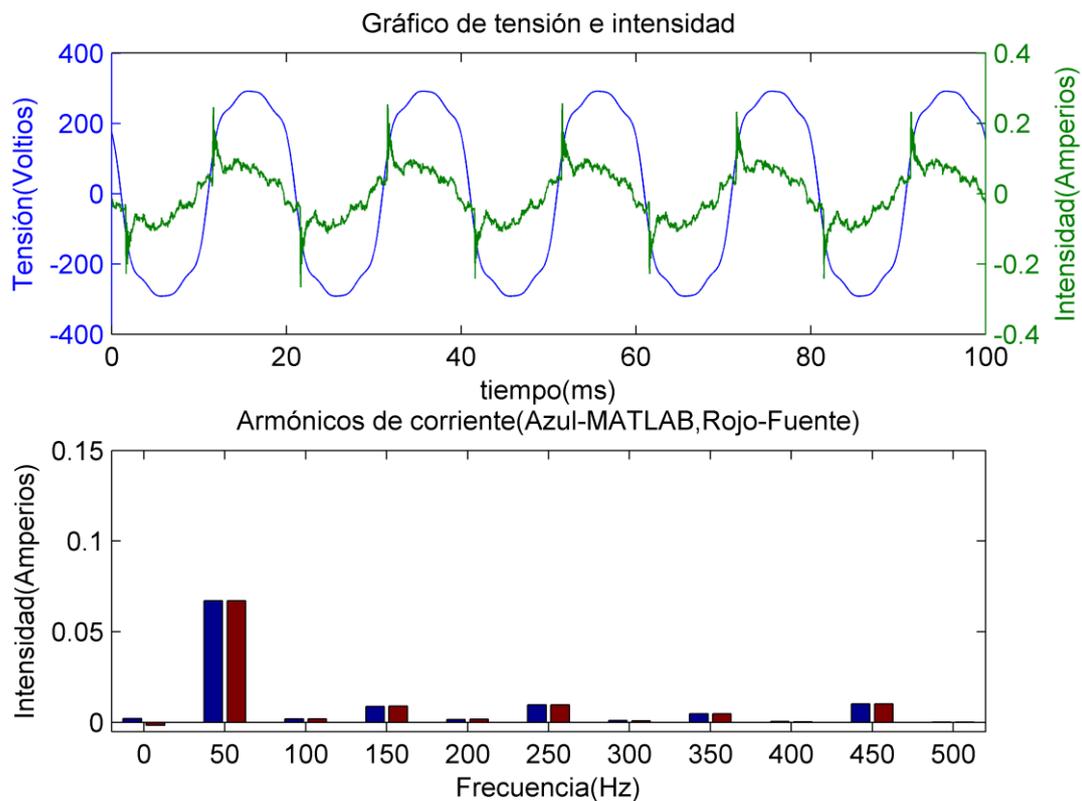


Figura 101: Gráfico de lámpara 1 bajo combinación 2.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	233,26	233,14	0,05
$I_{rms}(A)$	0,0715	0,0716	0,14
$P(W)$	13,69	13,69	0
$Q(VAr)$	9,56	-8,11	17,88
$D(VAd)$	-	4,23	-
$S(VA)$	16,69	16,46	1,40
$I_{max}(A)$	0,2656	0,2571	3,31
$\cos(\varphi)$	-	0,84	-
f_{dp}	0,82	0,81	1,23
$THDi$	0,35	0,27	29,63
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 38: Parámetros eléctricos para lámpara 1 bajo la combinación 2.

- **Tercer ensayo.**

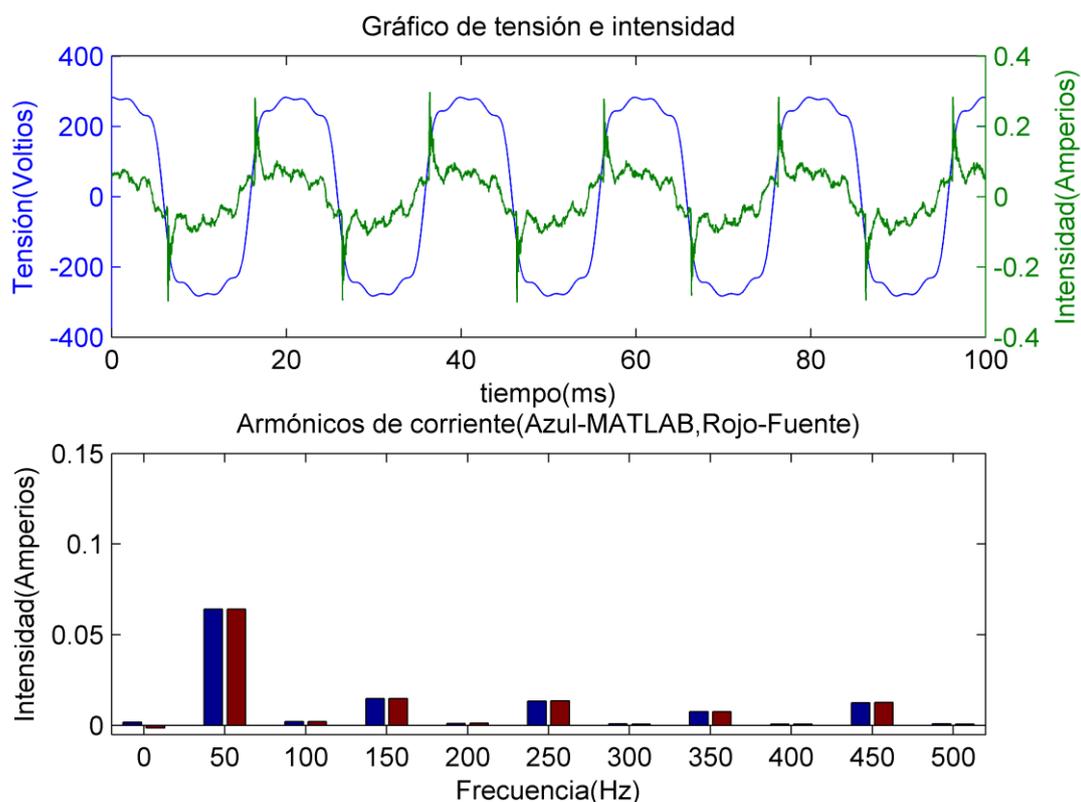


Figura 102: Gráfico de lámpara 1 bajo combinación 3.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	235,91	236,01	0,04
$I_{rms}(A)$	0,0719	0,0720	0,14
$P(W)$	13,51	13,51	0
$Q(VAr)$	10,24	-8,07	26,89
$D(VAd)$	-	5,44	-
$S(VA)$	16,96	16,65	1,86
$I_{max}(A)$	0,3008	0,2978	1,01
$\cos(\varphi)$	-	0,81	-
f_{dp}	0,80	0,77	3,90
THDi	0,45	0,36	25
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 39: Parámetros eléctricos para lámpara 1 bajo la combinación 3.

4.5.2. Lámpara número 4 (microled).

- **Primer ensayo.**

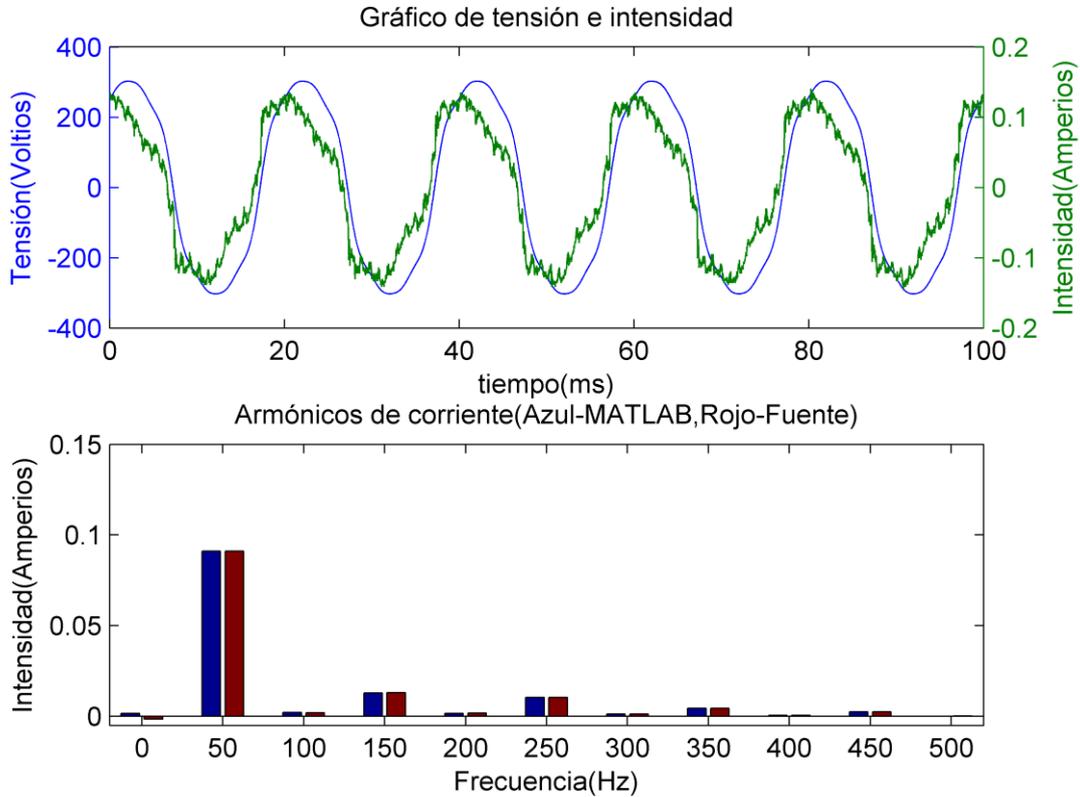


Figura 103: Gráfico de lámpara 4 bajo combinación 1.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	231,43	231,47	0,02
$I_{rms}(A)$	0,0931	0,0932	0,11
$P(W)$	19,86	19,86	0
$Q(VAr)$	8,36	-7,83	6,77
$D(VAd)$	-	2,39	-
$S(VA)$	21,55	21,48	0,33
$I_{max}(A)$	0,1437	0,1407	2,13
$\cos(\varphi)$	-	0,91	-
f_{dp}	0,92	0,91	1,10
THDi	0,21	0,11	90,91
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 40: Parámetros eléctricos para lámpara 4 bajo la combinación 1.

• **Segundo ensayo.**

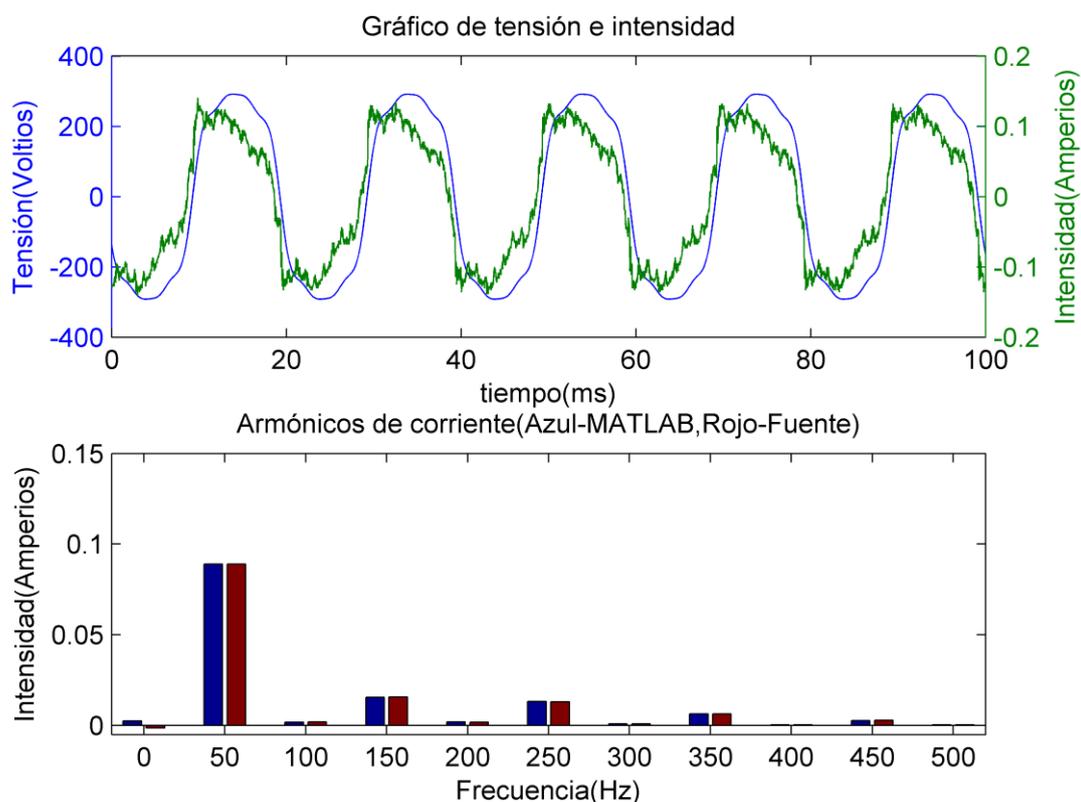


Figura 104: Gráfico de lámpara 4 bajo combinación 2.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	233,26	233,12	0,06
$I_{rms}(A)$	0,0920	0,0921	0,11
$P(W)$	19,80	19,80	0
$Q(VAr)$	8,28	-7,73	7,12
$D(VAd)$	-	2,44	-
$S(VA)$	21,46	21,40	0,28
$I_{max}(A)$	0,1410	0,1407	0,21
$\cos(\varphi)$	-	0,90	-
f_{dp}	0,92	0,89	3,37
$THDi$	0,25	0,11	127,27
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 41: Parámetros eléctricos para lámpara 4 bajo la combinación 2.

• **Tercer ensayo.**

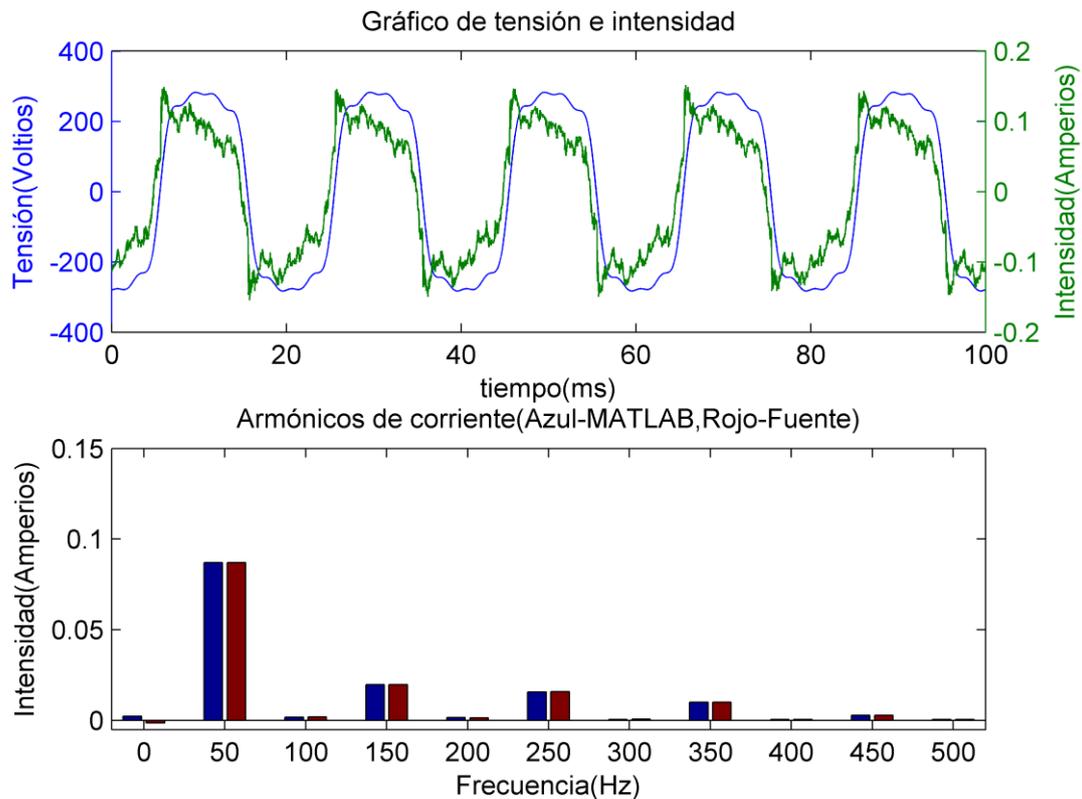


Figura 105: Gráfico de lámpara 4 bajo combinación 3.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	235,91	236,00	0,04
$I_{rms}(A)$	0,0918	0,0919	0,11
$P(W)$	19,84	19,84	0
$Q(VAr)$	8,68	-7,88	10,15
$D(VAd)$	-	3,15	-
$S(VA)$	21,65	21,58	0,32
$I_{max}(A)$	0,1545	0,1515	1,98
$\cos(\varphi)$	-	0,88	-
f_{dp}	0,92	0,87	5,75
THDi	0,32	0,15	113,33
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 42: Parámetros eléctricos para lámpara 4 bajo la combinación 3.

4.5.3. Lámpara número 10 (CFL con balasto).

- **Primer ensayo.**

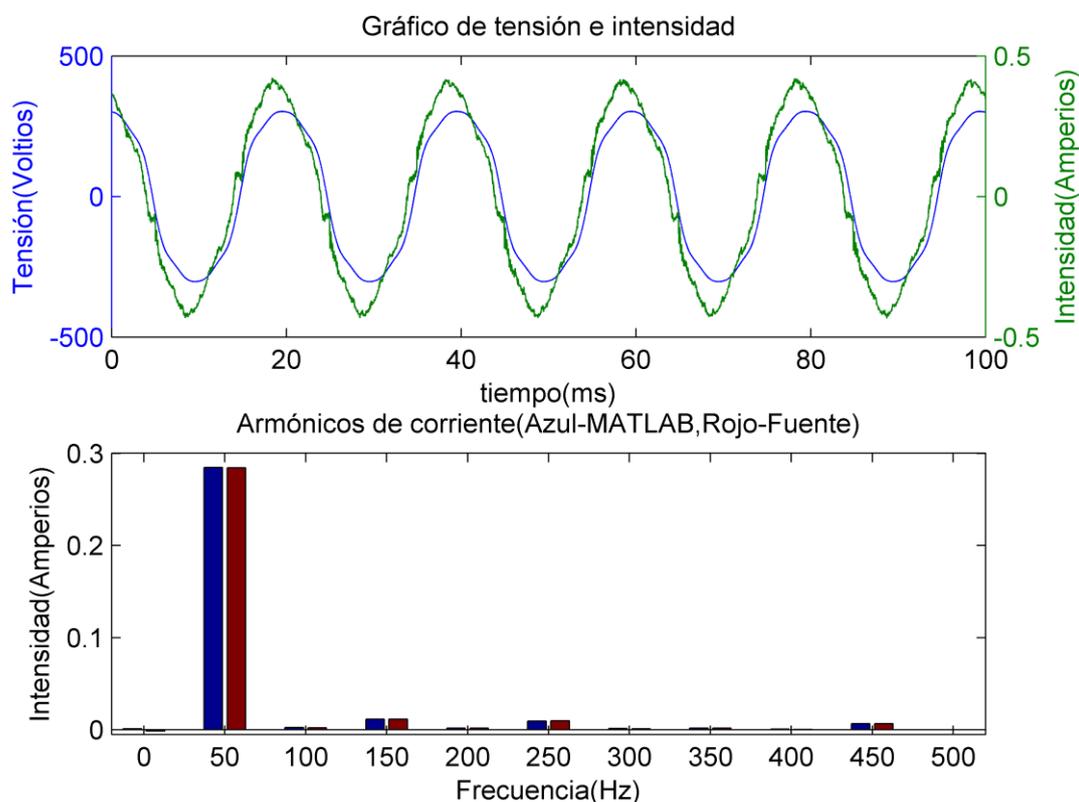


Figura 106: Gráfico de lámpara 10 bajo combinación 1.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	231,43	231,59	0,07
$I_{rms}(A)$	0,2851	0,2853	0,07
$P(W)$	63,83	63,82	0,02
$Q(VAr)$	16,66	-15,14	10,04
$D(VAd)$	-	6,60	-
$S(VA)$	65,97	65,93	0,06
$I_{max}(A)$	0,4335	0,4223	2,65
$\cos(\varphi)$	-	0,97	-
fdp	0,97	0,96	1,04
$THDi$	0,07	0,10	30
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 43: Parámetros eléctricos para lámpara 10 bajo la combinación 1.

- **Segundo ensayo.**

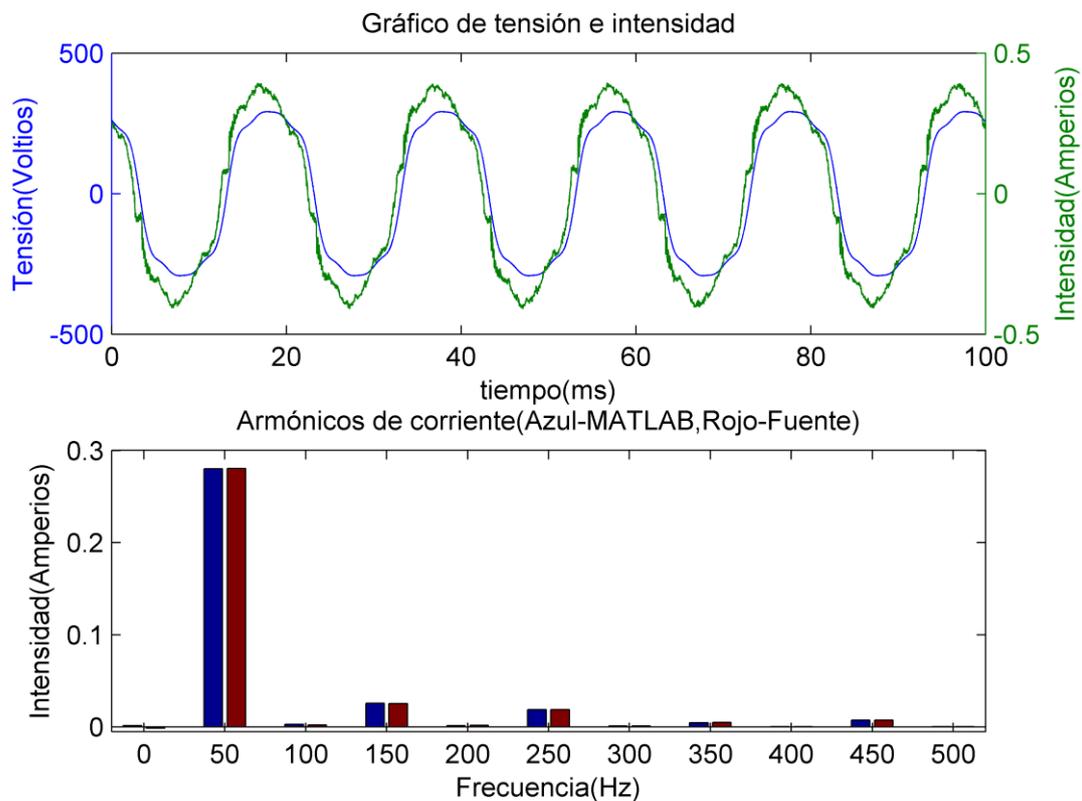


Figura 107: Gráfico de lámpara 10 bajo combinación 2.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	233,26	233,31	0,02
$I_{rms}(A)$	0,2826	0,2824	0,07
$P(W)$	63,86	63,86	0
$Q(VAr)$	16,31	-15,09	8,08
$D(VAd)$	-	5,73	-
$S(VA)$	65,91	65,87	0,06
$I_{max}(A)$	0,4091	0,3953	3,49
$\cos(\varphi)$	-	0,96	-
f_{dp}	0,97	0,95	2,11
$THDi$	0,13	0,09	44,44
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 44: Parámetros eléctricos para lámpara 10 bajo la combinación 2.

• **Tercer ensayo.**

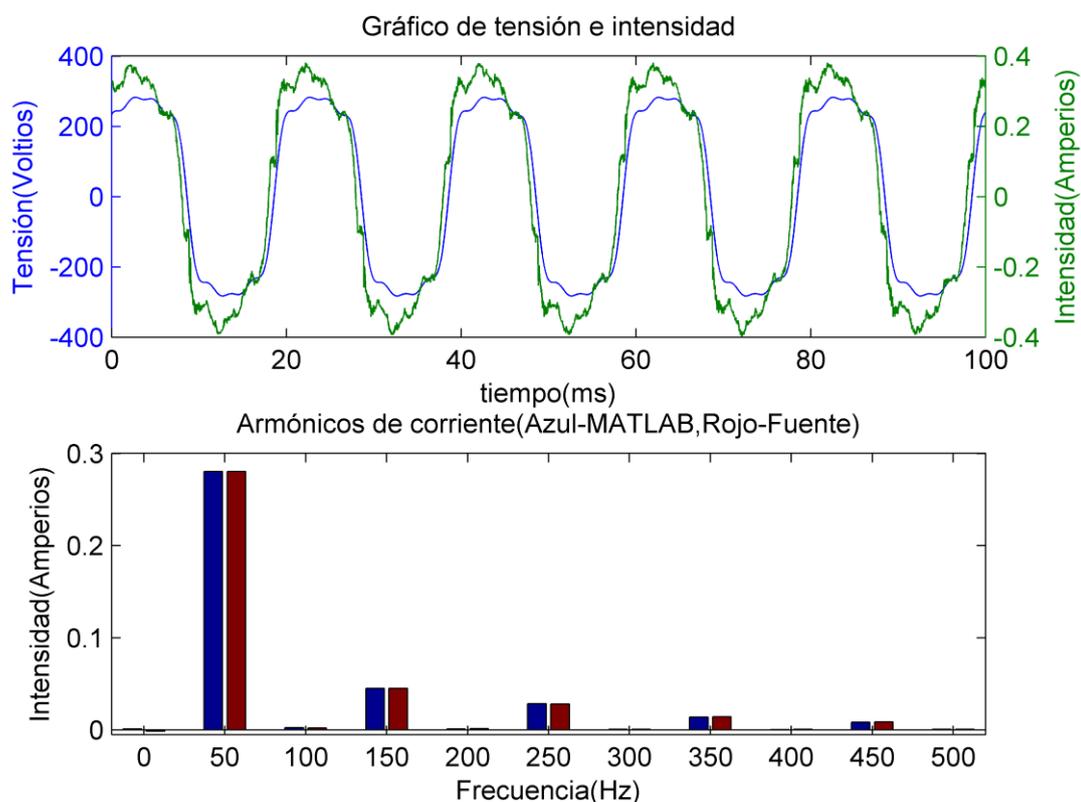


Figura 108: Gráfico de lámpara 10 bajo combinación 3.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	235,91	235,91	0
$I_{rms}(A)$	0,2863	0,2864	0,03
$P(W)$	65,47	65,46	0,02
$Q(VAr)$	16,61	-15,40	7,86
$D(VAd)$	-	5,79	-
$S(VA)$	67,54	67,49	0,07
$I_{max}(A)$	0,3983	0,3817	4,35
$\cos(\varphi)$	-	0,94	-
f_{dp}	0,97	0,93	4,30
THDi	0,20	0,09	122,22
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 45: Parámetros eléctricos para lámpara 10 bajo la combinación 3.

4.5.4. Lámpara número 11 (CFL sin balasto).

- **Primer ensayo.**

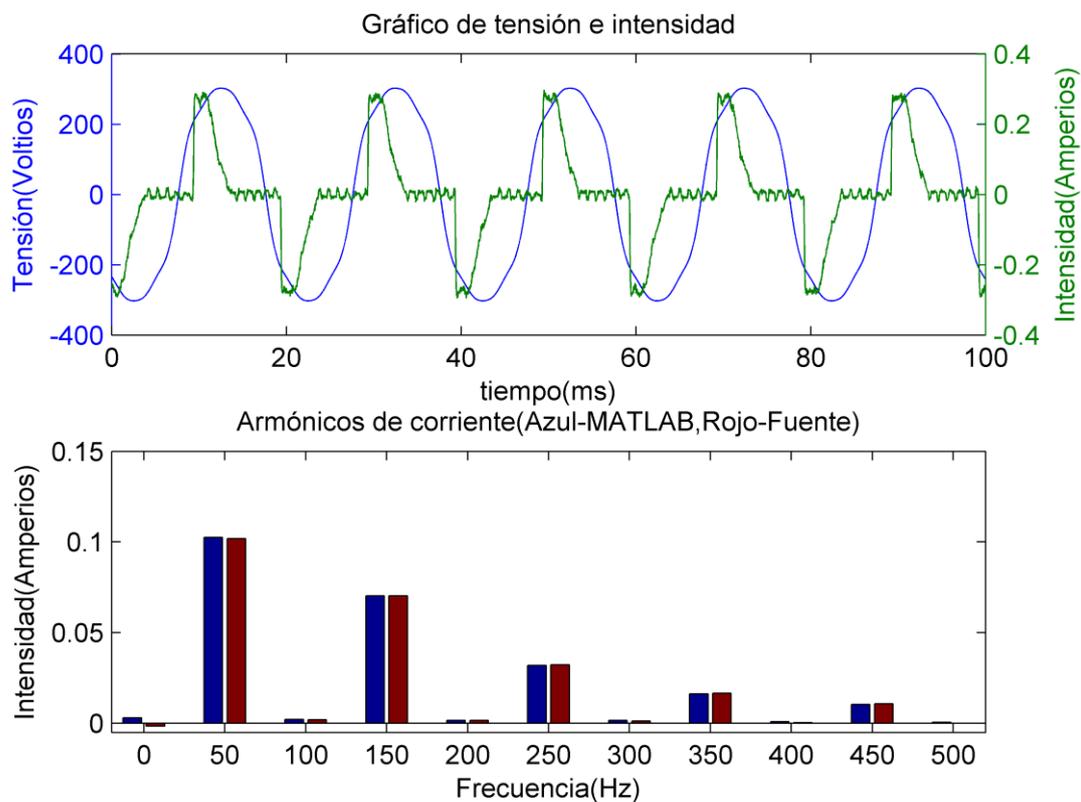


Figura 109: Gráfico de lámpara 11 bajo combinación 1.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	231,43	231,44	0
$I_{rms}(A)$	0,1322	0,1326	0,30
$P(W)$	20,09	20,09	0
$Q(VAr)$	23,08	-10,30	124,08
$D(VAd)$	-	20,54	-
$S(VA)$	30,60	30,52	0,26
$I_{max}(A)$	0,2978	0,2978	0
$\cos(\varphi)$	-	0,89	-
f_{dp}	0,66	0,66	0
THDi	0,64	0,87	26,44
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 46: Parámetros eléctricos para lámpara 11 bajo la combinación 1.

• **Segundo ensayo.**

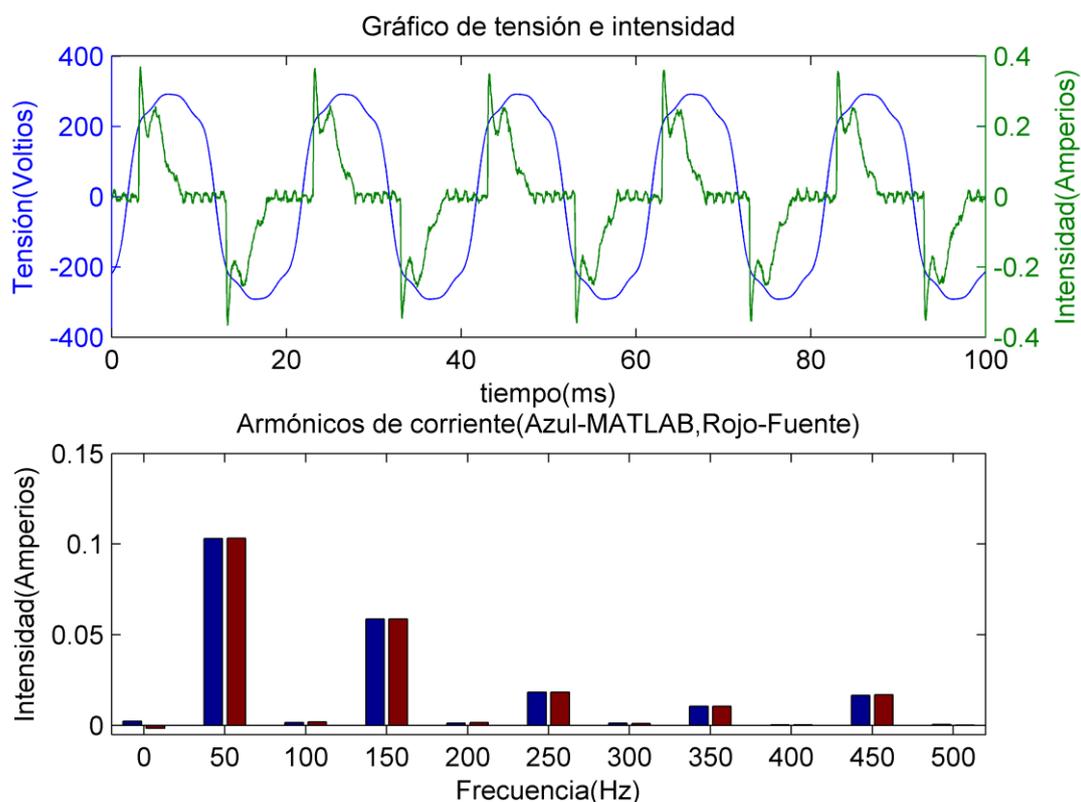


Figura 110: Gráfico de lámpara 11 bajo combinación 2.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	233,26	233,23	0,01
$I_{rms}(A)$	0,1387	0,1390	0,22
$P(W)$	20,21	20,20	0,05
$Q(VAr)$	22,03	-11,29	95,13
$D(VAd)$	-	18,74	-
$S(VA)$	29,90	29,78	0,40
$I_{max}(A)$	0,3709	0,3709	0
$\cos(\varphi)$	-	0,85	-
f_{dp}	0,68	0,66	3,03
$THDi$	0,59	0,78	24,36
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 47: Parámetros eléctricos para lámpara 11 bajo la combinación 2.

• **Tercer ensayo.**

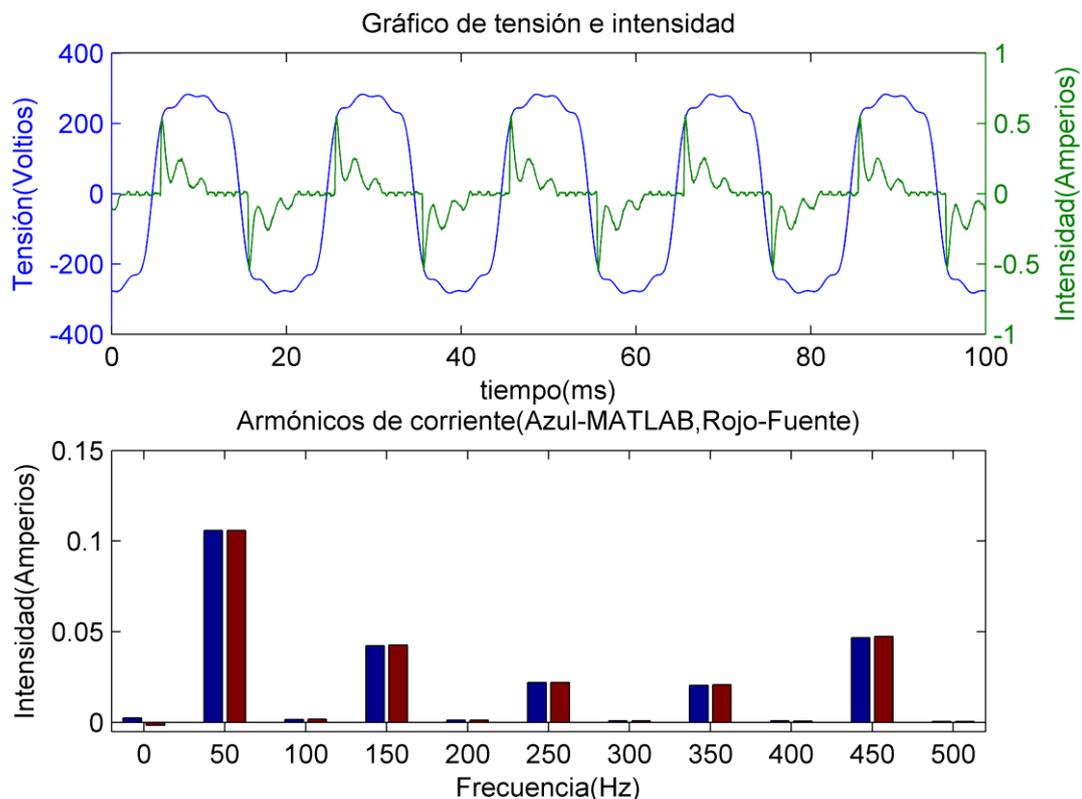


Figura 111: Gráfico de lámpara 11 bajo combinación 3.

Parámetro	Medida fuente	Medida MATLAB	Incremento (%)
$U_{rms}(V)$	235,91	235,99	0,03
$I_{rms}(A)$	0,1419	0,1418	0,07
$P(W)$	21,31	21,31	0
$Q(VAr)$	25,83	-13,00	98,69
$D(VAd)$	-	22,03	-
$S(VA)$	33,48	33,29	0,57
$I_{max}(A)$	0,5632	0,5632	0
$\cos(\varphi)$	-	0,77	-
f_{dp}	0,64	0,58	10,34
$THDi$	0,67	0,88	23,86
$f(Hz)$	50	-	-

Tabla 48: Parámetros eléctricos para lámpara 11 bajo la combinación 3.

4.5.5. Contador.

En este subapartado se pretende medir el consumo total de todas las lámparas cuando la tensión de alimentación contiene armónicos, en concreto contendrá: el armónico fundamental de 230V de valor rms a 50Hz, un 10% del tercer armónico, un 5% del quinto y un 2% del séptimo.

Se pretende así hacer lo mismo que se hizo en el apartado 4.3 sólo que en ese caso se hacía con una tensión de alimentación sinusoidal ideal, y comprobar así la influencia o no de las cargas no lineales y sus posibles situaciones de funcionamiento frente al correcto funcionamiento de contadores digitales.

Al contrario del ensayo anterior, el cual duró 152 horas, éste sólo durará media hora pues la fuente no permite trabajar en este tipo de condiciones por más tiempo. Así pues, se muestra en la figura

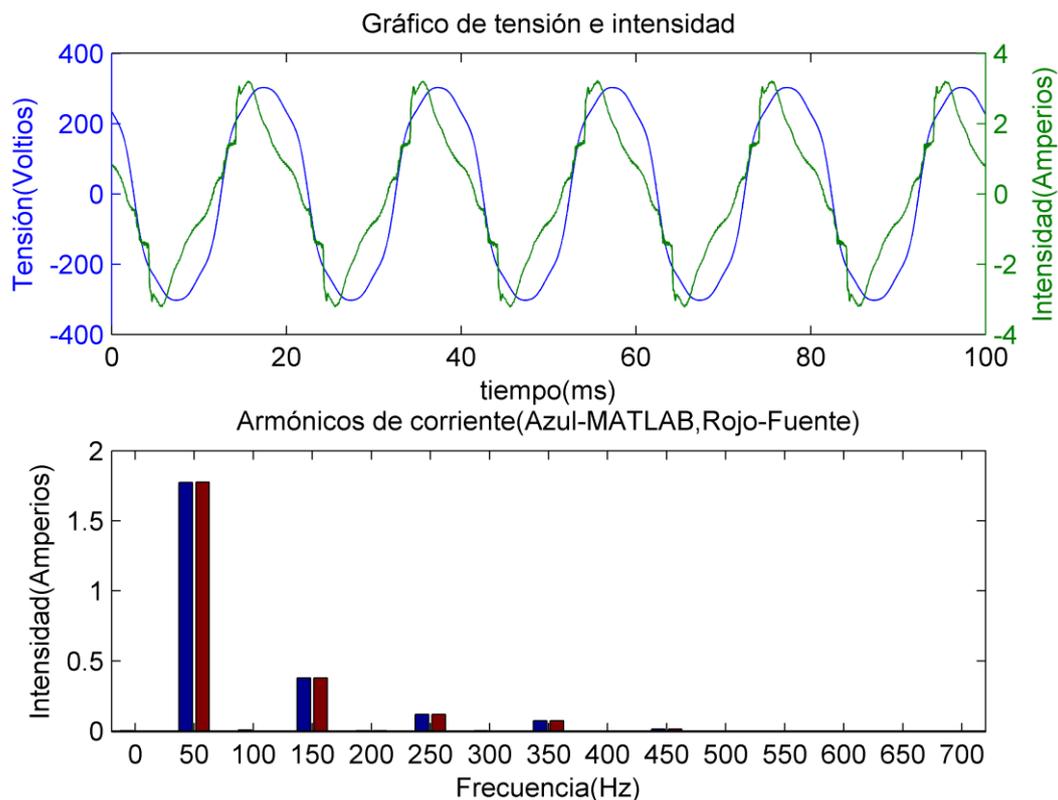


Figura 112: Gráfico del ensayo del contador en presencia de armónicos.

En base a ello, y dado que la potencia suministrada por Matlab en base a los cálculos es de 379,5536W, la energía que habrá sido consumida por el contador durante media hora es:

$$E_{Matlab} = 379,5536W \cdot \frac{1kW}{1000W} \cdot 0,5h = 0,1898kWh$$

Ecuación 63: Consumo estimado según Matlab en presencia de armónicos.

Y el consumo de energía medida por el contador, teniendo en cuenta que la lectura inicial (antes del ensayo) era de 61,62kWh, y la final (después del ensayo) era de 61,81kWh, será:

$$E_{contador} = 61,81 - 61,62 = 0,19kWh$$

Ecuación 64: Consumo medido por el contador en presencia de armónicos.

Por lo que la diferencia entre el consumo registrado por el contador digital y el calculado con Matlab según el consumo de potencia del circuito es:

$$Incremento = \frac{0,19 - 0,1898}{0,1898} \cdot 100\% = 0,11\%$$

Ecuación 65: Diferencia de consumo para el contador en presencia de armónicos.

Capítulo 5. Discusión y conclusiones.

En este capítulo se hará un análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de los diferentes apartado del capítulo 4. No se mostrarán nuevamente los resultados obtenidos, ya expuestos en tablas y gráficas en el apartado anterior, sino que se analizarán dichos resultados y se extraerán las conclusiones a las que nos lleve cada tipo de examen en cuanto a los parámetros eléctricos se refiere.

5.1. Diferentes tecnologías de lámparas. Semejanzas, diferencias y conclusiones.

En este apartado se pusieron a funcionar por separado cada una de las 16 lámparas disponibles en el laboratorio para tal fin, las cuales pertenecen a cuatro tipos de tecnologías de iluminación diferentes: LED, microled, y compactas fluorescentes tanto con como sin balasto electrónico y cuyos resultados se muestran en las tablas 2 hasta la 17, y figuras 30 hasta la 45.

En vista de los resultados, la primera conclusión que extraemos, y no por ello menos importante que las demás, es el hecho de que **lámparas de la misma tecnología se comportan de la misma forma** en cuanto a comportamiento de la forma de onda de la corriente se refiere y demás parámetros eléctricos dando lugar a las mismas conclusiones. Además, en todos los casos la onda de tensión coincide perfectamente con la generada por la fuente y no se ve afectada de modo alguno por las cargas no lineales por lo que llegamos también a la conclusión general de que **las cargas no lineales no afectan a su propia tensión de alimentación.**

Entre las conclusiones que se harán a continuación, figurará el número de armónicos considerables para lo cual se tomará como criterio de si un armónico es considerable o no si su valor eficaz es mayor que el 4% del valor eficaz del armónico fundamental.

5.1.1. Características de las diferentes tecnologías de iluminación.

Por tanto, expondremos a continuación las conclusiones extraídas para cada uno de los diferentes tecnologías de lámparas:

- LED.
 - Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
 - Carga capacitiva.
 - Onda de corriente distorsionada.
 - Sólo existen armónicos impares.
 - Existen armónicos considerables hasta de orden 7 (350Hz).
- Microled.
 - Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
 - Carga capacitiva.
 - Onda de corriente POCO distorsionada.
 - Sólo existen armónicos impares.
 - Existen armónicos considerables hasta de orden 5 (250Hz).
- CFL con balasto.
 - Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
 - Carga capacitiva.
 - Onda de corriente distorsionada.
 - Sólo existen armónicos impares.
 - Existen armónicos considerables hasta de orden 3 (150Hz).
- CFL sin balasto.
 - Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
 - Carga capacitiva.
 - Onda de corriente MUY distorsionada.
 - Sólo existen armónicos impares.
 - Existen armónicos considerables hasta de orden 39 (1950Hz).

5.1.2. Sejemanzas y diferencias.

Ahora, estableceremos las semejanzas y diferencias del funcionamiento eléctrico de las lámparas de esos cuatro tipos de tecnologías de iluminación diferentes.

- Semejanzas.
 - En ningún caso las luminarias de los diferentes tipos afectan a la forma de onda de la tensión de alimentación.
 - Todas las cargas de los diferentes tipos de ondas son capacitivas.
 - Todas las ondas de corriente están distorsionadas en mayor o menor medida, y por tanto presentan armónicos.
- Diferencias. Todas las diferencias se encuentran en el menor o mayor grado de distorsión de las diferentes ondas de corriente, y por tanto, en el mayor o menor número de armónicos presentes en cada caso. Dichos datos se han dispuesto en una tabla 5x3 donde en la primera fila se expresa el nombre del parámetro medido y en la primera columna a las lámparas de qué tipo corresponden las conclusiones. Para ello, se ha clasificado el grado de distorsión de la onda en bajo (1), medio (2) y alto (3) según el mayor o menor parecido de la onda a la onda ideal, y los armónicos presentes con el número correspondiente al orden del mayor armónico presente y su frecuencia correspondiente en hercios entre paréntesis. Presentamos a continuación la tabla comparativa.

	Grado de distorsión	Armónicos presentes hasta orden x (f Hz)
LED	Medio (2)	9 (450 Hz)
Microled	Bajo (1)	5 (250 Hz)
CFL con balasto	Medio (2)	7 (350 Hz)
CFL sin balasto	Alto (3)	31 (1550 Hz)

Tabla 49: Tabla resumen de diferencias entre lámparas de diferentes tecnologías.

Y tal como podemos apreciar en la tabla, la tecnología lumínica que más distorsión crea en la forma de onda de la corriente, y por tanto más armónicos, son las compactas fluorescentes sin balasto electrónico (CFL convencionales). Por otro lado, las que menos distorsión crean son las microled, y entremedio están las LED y las CFL con balasto electrónico, siendo estas últimas las que mejor calidad de señal proporcionan de las dos, y

aunque ambas distan de la forma sinusoidal, no son tan catastróficas como las CFL sin balasto electrónico las cuáles es difícil explicar cómo proporcionan iluminación con esa forma de onda.

5.2. Combinación de lámparas. Conclusiones y cumplimiento del Teorema de Boucherot.

Sabiendo ya del apartado anterior que lámparas del mismo tipo (de cada uno de los 4 tipos ensayados), se comportan de la misma forma, examinaremos ahora el comportamiento de todas las combinaciones posibles de esos cuatro grupos, que según sabemos de la teoría de la combinatoria estadística forman un total de 15 grupos tal como se muestra en la ecuación número 56. También, haremos la comprobación del teorema de Boucherot para ver si se cumple o no con las potencias activa y reactiva para las diferentes tecnologías de lámparas, y además de eso también haremos la comprobación del teorema de Boucherot para la potencia de distorsión viendo así si se cumple o no.

Empezaremos a analizar los datos tal y como se hicieron los ensayos, primero agrupando todas las lámparas de la misma tecnología por separado y luego las demás combinaciones. Pero como ya hemos analizado en el apartado anterior el comportamiento de las diferentes lámparas de cada tipo y tienen siempre el mismo comportamiento, para los cuatro primeros casos lo único que haremos será la comprobación del teorema de Boucherot pues lo demás ya se ha tratado anteriormente.

Además, sólo se comprobará el teorema de Boucherot para los cuatro tipos de tecnologías de lámparas por separado por el simple hecho de que si se cumple para cada grupo, se cumplirá para todos los demás, y si no se cumple para algún tipo de lámparas, no se cumplirá para cualquier combinación de lámparas en la que aparezca alguna lámpara de ese grupo que no cumple. No obstante, se hará una comprobación final con todas las lámparas para demostrar lo anteriormente dicho.

Se tomará aquí, al igual que en el apartado anterior, el mismo criterio para considerar si un armónico es considerable o no (y es que en la mayoría de los ensayos existen armónico de muy pequeño orden hasta casi el nivel máximo detectable por la fuente que es para el armónico de orden 50), es decir, si su valor eficaz es superior o no al 4% del valor eficaz del armónico fundamental.

5.2.1. LED.

Superposición en lámparas LED									
	Número de luminaria						Suma	Medida	Incremento(%)
	1	2	3	7	8	16			
Pi(W)	14,33	12,72	7,85	36,24	36,27	32,41	139,82	134,12	4,25
Qi(VAr)	-8,70	-8,42	-5,84	-9,24	-9,23	-14,80	-56,22	-53,28	5,52
Di(VAd)	3,84	3,94	5,83	4,99	4,86	6,04	29,50	20,77	42,03

Tabla 50: Comprobación del Teorema de Boucherot para lámparas LED.

Tal como podemos apreciar en la tabla anterior, extrapolando el Teorema de Boucherot para redes no lineales podemos apreciar que no se cumple en lámparas LED, sobre todo en lo que se refiere a la potencia de distorsión, aunque si bien es cierto que nos proporciona una aproximación (en exceso) bastante buena y por tanto nos permitiría dimensionar una instalación eléctrica.

5.2.2. Microled.

Superposición en lámparas MICROLED						
	Número de luminaria			Suma	Medida	Incremento(%)
	4	5	6			
Pi(W)	20,07	19,26	19,97	59,30	56,7354	4,51
Qi(VAr)	-8,82	-8,55	-8,63	-26,00	-25,4256	2,28
Di(VAd)	3,54	3,39	3,44	10,37	9,9263	4,46

Tabla 51: Comprobación del teorema de Boucherot para lámparas microled.

Análogamente al caso anterior sólo que para lámparas microled, obtenemos unos resultados mejores (más aproximados) y en todos los casos con un diferencia menor al 5%. Se podría pues usar también el teorema de Boucherot extrapolado para redes no lineales para dimensionar instalaciones eléctricas con unos resultados bastante aproximados.

5.2.3. CFL sin balasto.

Superposición en lámparas CFL sin balasto								
	Número de luminaria					Suma	Medida	Incremento(%)
	11	12	13	14	15			
Pi(W)	19,55	19,81	19,25	18,96	19,92	97,49	95,04	2,58
Qi(VAr)	-9,03	-9,16	-8,95	-8,64	-9,35	-45,13	-46,27	2,47
Di(VAd)	22,91	24,04	22,39	22,29	22,94	114,56	114,83	0,23

Tabla 52: Comprobación del teorema de Boucherot para lámparas CFL sin balasto electrónico.

Sorprendente es el hecho de que mejores aún que en los casos anteriores son los resultados de extrapolar el Teorema de Boucherot para sistemas no lineales aún a pesar de la forma de onda de corriente tan nefasta que éstas generan (véase la figura 48 de la página 87).

5.2.4. CFL con balasto.

Superposición en lámparas CFL con balasto					
	Nº de luminaria		Suma	Medida	Incremento(%)
	9	10			
Pi(W)	33,47	60,37	93,84	94,81	1,03
Qi(VAr)	-9,81	-15,84	-25,65	-25,56	0,35
Di(VAd)	7,09	9,05	16,14	16,12	0,13

Tabla 53: Comprobación del teorema de Boucherot para lámparas CFL con balasto electrónico.

En este caso los resultados son sorprendentes debido a que la forma de onda de la figura 49 página 88 coincide prácticamente con una onda sinusoidal y prueba de ello es que dispone de un único tercer armónicos (a considerar en cuanto a su valor), además del armónico fundamental claro está.

5.2.5. LED y microled.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente POCO distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 5(250Hz).

5.2.6. LED y CFL sin balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente MUY distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta orden 21 (1050Hz).

5.2.7. LED y CFL con balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 5 (250Hz).

5.2.8. Microled y CFL sin balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente MUY distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 27 (1350Hz).

5.2.9. Microled y CFL con balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente POCO distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 3 (150Hz).

5.2.10. CFL con y sin balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 25 (1250Hz).

5.2.11. LED, microled y CFL sin balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente MUY distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 17 (850Hz).

5.2.12. LED, microled y CFL con balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 5 (250Hz).

5.2.13. LED y CFL con y sin balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente MUY distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 13 (650Hz).

5.2.14. Microled y CFL con y sin balasto.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente MUY distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 19 (950Hz).

5.2.15. Todas las tecnologías de lámparas.

Superposición de todas las lámparas							
	Tipo de luminaria				Suma	Medida	Incremento(%)
	LED	MICROLED	CFL s.b.	CFL c.b.			
Pi(W)	139,82	59,30	97,49	93,84	390,45	376,81	3,62
Qi(VAr)	-56,22	-26,00	-45,13	-25,65	-153,00	-149,39	2,42
Di(VAd)	29,50	10,37	114,56	16,14	170,57	142,83	19,42

Tabla 54: Comprobación del teorema de Boucherot para todas las tecnologías de lámparas.

- Onda de tensión perfectamente sinusoidal.
- Carga capacitiva.
- Onda de corriente MUY distorsionada.
- Sólo existen armónicos impares.
- Existen armónicos considerables hasta de orden 13 (650Hz).

5.3. Sobretensiones, bajadas de tensión y microcortes.

Conclusiones del ensayo.

Cuando analizamos los posibles transitorios que se pueden presentar en la tensión de alimentación de cualquier instalación eléctrica en el apartado cuatro del capítulo cuatro, lo dividimos en dos, y es que por una parte estudiamos el efecto de sobretensiones y bajadas de tensión, y por otra microcortes creados en distintas posiciones de la onda de tensión. Así pues, a la hora de analizar los resultados obtenidos lo dividiremos también en los dos mismos bloques presentes a continuación.

Decir queda que en este y en los restantes ensayos, se utilizará solamente una lámpara de cada tipo por quedar más que demostrado que todas las lámparas de la misma tecnología proporcionan resultados idénticos.

5.4.1. Análisis del efecto de sobretensiones y bajadas de tensión.

De este subapartado es probable que podamos extraer muchas debido a que no sólo examinaremos que pasa en el instante justo en que se eleva o baja la tensión, sino que además también examinaremos su efecto una vez estabilizada la onda de corriente y comprobaremos así cómo varía la potencia activa, la potencia aparente y el factor de potencia en función de la tensión de alimentación.

Dese cuenta el lector de que con dos magnitudes cualesquiera de las tres mencionadas anteriormente se puede hallar la restante, es necesario analizar las pues si por ejemplo cierto cambio de tensión provoca que aumente la potencia aparente y empeore (disminuya) el factor de potencia, podría darse el caso tanto de que aumente la potencia activa como que disminuya, y en función de esto se produzcan perjuicios a diferentes partes. Y necesitamos hacerlo así para establecer la influencia que tiene el cambio de tensión de alimentación a lámparas de bajo consumo (cargas no lineales) sobre el consumidor (con la potencia activa), sobre la compañía eléctrica (con la potencia aparente) y para el medio ambiente teniendo en cuenta qué porcentaje de energía aprovechamos ($100 \cdot \text{fdp} \%$), y qué porcentaje de esta desperdiciamos ($100 \cdot (1 - \text{fdp}) \%$).

Procedemos ahora a analizar los efectos anteriormente mencionados para cada uno de los cuatro tipos de tecnologías de iluminación utilizadas en base a los resultados mostrados en las figuras que abarcan desde la 64 hasta la 71, y en las tablas que van desde la 33 hasta

la 36.

- LED:
 - Un aumento en la tensión de alimentación provoca un aumento del pico de corriente máximo alcanzado en cada ciclo, además hace que se distorsione aún más la forma de onda por lo que empeora el factor de potencia.
 - Una disminución en la tensión de alimentación provoca una menor presencia de armónicos y por tanto mejora el factor de potencia. Además, se mantienen aproximadamente constantes los valores máximos y mínimos de corriente.
 - Con respecto al consumo:
 - Si aumenta la tensión de alimentación se mantiene constante la potencia aparente pero disminuye la potencia activa.
 - Si disminuye la tensión de alimentación se mantiene constante la potencia activa mientras disminuye la potencia aparente (éste sería el punto óptimo de funcionamiento siempre y cuando el flujo luminoso se mantenga constante).
 - El factor de potencia mejora conforme más baja es la tensión de alimentación.

- Microled:
 - Un aumento en la tensión de alimentación no produce variación alguna apreciable en la forma de onda de corriente.
 - Una disminución en la tensión de alimentación provoca un ligero aumento de la amplitud de la onda de corriente.
 - Con respecto al consumo:
 - Si aumenta la tensión de alimentación, aumenta tanto la potencia activa como la aparente.
 - Si disminuye la tensión de alimentación, disminuye tanto la potencia activa como la aparente.
 - El factor de potencia mejora conforme más baja es la tensión de alimentación.

- CFL con balasto:

- Un aumento en la tensión de alimentación provoca una disminución de la amplitud de la onda de corriente.
- Una disminución en la tensión de alimentación provoca un aumento de la amplitud de la onda de corriente.
- Con respecto al consumo:
 - Si aumenta la tensión de alimentación, aumenta tanto la potencia activa como la aparente.
 - Si disminuye la tensión de alimentación, aumenta la potencia activa aunque disminuye la aparente.
 - El factor de potencia mejora conforme más baja es la tensión de alimentación.
- CFL sin balasto:
 - Un aumento de la tensión de alimentación provoca un ligero aumento de la amplitud de la onda de corriente.
 - Una disminución de la tensión de alimentación provoca una ligera disminución de la amplitud de la onda de corriente.
 - Con respecto al consumo:
 - Si aumenta la tensión de alimentación, aumenta tanto la potencia activa como la aparente.
 - Si disminuye la tensión de alimentación, disminuyen tanto la potencia activa como la aparente.
 - El factor de potencia mejora conforme más baja es la tensión de alimentación, aunque lo hace de forma muy débil y podríamos considerar que prácticamente se mantiene constante.

NOTA: Al contrario que las anteriores, este tipo de lámparas ilumina claramente más contra mayor es la tensión de alimentación.

5.4.2. Análisis de del efecto de microcortes.

Antes de nada, cabe recordar que los análisis y conclusiones expuestas a continuación en este subapartado, corresponden a los resultados mostrados en el subapartado 4.4.2 del capítulo cuatro. Dichos resultados corresponden a un total de $7 \times 4 = 28$ ensayos en los que se ha sometido a una lámpara de cada tipo a un microcorte de duración $t = 3\text{ms}$ (inferior a un cuarto de periodo siendo el tiempo de periodo de la onda $T = 20\text{ms}$ para $f = 50\text{Hz}$ que es la frecuencia de la red). Dicho microcorte se ha producido para diferentes ángulos de fase de la onda de tensión, concretamente para $\varphi = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ y 90° , es decir, se ha sometido al primer cuarto de onda a un microcorte en diferentes fases que van desde 0 hasta 90° con un intervalo de separación de 15° lo que ha dado un total de 7 ensayos diferentes por tecnología de iluminación.

Los resultados de los ensayos citados anteriormente y a los que este subapartado se refiere se encuentran en las figuras que van desde la 72 hasta la 99, las cuales se encuentran entre las páginas 120 y 135. Extraemos a continuación las conclusiones por separado para cada una de las cuatro lámparas correspondientes a diferentes tecnologías de iluminación.

- LED:
 - Para todos los ángulos a los que se ha producido el desfase, la onda de corriente se mantiene sin alteración alguna excepto en los 3ms que dura el microcorte.
 - Tanto en el escalón correspondiente a cuando se inicia el microcorte, como en el escalón correspondiente cuando finaliza el microcorte se produce un pico de corriente en el sentido inicio fin.
 - El pico de corriente de inicio del microcorte suele ser pequeño, pero el pico de corriente del final del microcorte alcanza incluso hasta el $(2,4644/0,1488) \times 100\% = 1656\%$ para $\varphi = 0$ del valor pico nominal de la onda de corriente en régimen estacionario, es decir, 16,6 veces el valor máximo de la corriente en régimen estacionario lo cual deteriora no sólo la vida de la lámpara, sino que también podría provocar la avería de otros aparatos de la misma instalación eléctrica.

- Microled:
 - Para todos los ángulos a los que se ha producido el desfase, la onda de corriente se mantiene sin alteración alguna excepto en los 3ms que dura el microcorte.
 - Tanto en el escalón correspondiente a cuando se inicia el microcorte, como en el escalón correspondiente cuando finaliza el microcorte se produce un pico de corriente en el sentido inicio fin.
 - Se producen picos de corriente importantes tanto al inicio como al final del microcorte que para $\varphi = 0$ alcanza el $(1,1644/0,1542)*100%=755\%$ del valor pico nominal de la onda de corriente en régimen estacionario, es decir, 7,5 veces el valor máximo de corriente en régimen estacionario que como en el caso anterior, es claro que deteriorará la vida de la lámpara y demás electrodomésticos colindantes.
- CFL con balasto:
 - Para todos los ángulos a los que se ha producido el desfase, la onda de corriente se mantiene sin alteración alguna excepto en los 3ms que dura el microcorte.
 - Tanto en el escalón correspondiente a cuando se inicia el microcorte, como en el escalón correspondiente cuando finaliza el microcorte se produce un pico de corriente en el sentido inicio fin.
 - Se producen picos de corriente importantes tanto al inicio como al final del microcorte que para $\varphi = 0$ alcanza el $(2,1069/0,4440)*100%=475\%$ del valor pico nominal de la onda de corriente en régimen estacionario, es decir, 4,7 veces el valor máximo de corriente en régimen estacionario que como en el caso anterior, es claro que deteriorará la vida de la lámpara y demás electrodomésticos colindantes aunque al ser en menor medida se presupone menor el daño.

- CFL sin balasto:
 - Para todos los ángulos a los que se ha producido el desfase, la onda de corriente se mantiene sin alteración alguna excepto en los 3ms que dura el microcorte.
 - Los 3 ms que dura el microcorte la onda de corriente se mantiene prácticamente plana (al igual que en prácticamente la mitad del ciclo funcionando la lámpara en régimen estacionario con tensión de alimentación sinusoidal) excepto en el momento en que termina el microcorte donde se produce un picotazo de tensión que alcanza su valor máximo de 4,9452A para $\varphi=30^\circ$ lo que supone el $(4,9452/0,3953)*100\%=1251\%$ del valor máximo del ciclo con un funcionamiento en régimen estacionario de la lámpara. Dicho efecto, un pico máximo de corriente de 12,5 veces el valor nominal, en los sucesivos ensayos realizados de microcortes ha disminuido notablemente el flujo luminoso entregado por la lámpara, cosa que se nota a simple vista tras los ensayos, y es que esta lámpara carece de protecciones como las demás.

5.4. Armónicos en tensión. Conclusiones del ensayo.

En el apartado 5 del tema 4 se recogen los resultados y se detallan los ensayos a los que estas conclusiones hacen referencia, que son el ensayo de una lámpara de cada tecnología a tres combinaciones distintas de armónicos, y luego poner a funcionar el contador con todas las lámparas encendidas bajo la combinación de armónicos número 1.

Aquí no se dividirán las conclusiones en cinco subapartados, sino que en un primer subapartado se recogerán las conclusiones de los cuatro primeros subapartados del apartado 5 del capítulo 4, y en un segundo apartado lo referente al contador. Se presentará para cada uno de los cuatro primeros casos una tabla donde se compare la alimentación con tensión alterna sinusoidal con los tres casos ensayados de armónicos en tensión, comparando para cada uno de ellos potencias activa y aparente consumidas, $\cos(\phi)$, fdp, valor eficaz de la corriente, pico de corriente máximo y tasa de distorsión armónica en intensidad (THDi).

Para el quinto caso (segundo subapartado), se hará una comparación general del ensayo del contador con los realizados anteriormente, es decir, con el funcionamiento de todas las lámparas con alimentación de tensión alterna sinusoidal (comparando diferentes potencias, consumo total y sobre todo la diferencia entre lo indicado por Matlab y lo medido por el contador) y con otro caso en el que se han puesto a funcionar cinco bombillas convencionales para hacer una comparación general de las diferencias entre el consumo indicado por Matlab y lo medido por el contador en los tres casos.

5.5.1. Armónicos en tensión.

Todas las conclusiones expuestas a continuación serán hechas en base a las tendencias generales de los datos expuestos a continuación, y por tanto quedarán expuestas a algunos resultados inexplicables propios de sistemas no lineales que no conocemos internamente.

- LED:

	Irms(A)	P(W)	S(VA)	I_{max}(A)	cos(φ)	fdp	THDi
U_{sinusoidal}	0,0753	14,33	17,20	0,1488	0,85	0,83	0,23
U_{armónicos1}	0,0724	14,04	16,62	0,2219	0,85	0,84	0,22
U_{armónicos2}	0,0716	13,69	16,46	0,2571	0,84	0,81	0,27
U_{armónicos3}	0,0720	13,51	16,65	0,2978	0,81	0,77	0,36

Tabla 55: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas LED.

- Las potencias activa y aparente disminuyen conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.
- El cos(fi) y el fdp disminuyen conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.
- El valor eficaz de la corriente disminuye conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión, al contrario que el pico de corriente el cual aumenta.
- La THDi aumenta conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.

- Microled:

	Irms(A)	P(W)	S(VA)	I _{max} (A)	cos(φ)	fdp	THDi
U _{sinusoidal}	0,0970	20,07	22,21	0,1542	0,92	0,90	0,16
U _{armónicos1}	0,0932	19,86	21,48	0,1407	0,91	0,91	0,11
U _{armónicos2}	0,0921	19,80	21,40	0,1407	0,90	0,89	0,11
U _{armónicos3}	0,0919	19,84	21,58	0,1515	0,88	0,87	0,15

Tabla 56: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas microled.

- Las potencias activa y aparente disminuyen conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.
- El cos(fi) y el fdp disminuyen conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.
- El valor eficaz de la corriente disminuye conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión. Por otra parte, el pico de corriente nótese como es mayor para tensión sinusoidal y la tercera combinación de armónicos donde la tasa de distorsión armónico es mayor.
- La THDi aumenta disminuye con los armónicos en tensión hasta cierto límite (tercera combinación) donde vuelve a aumentar.

- CFL con balasto:

	Irms(A)	P(W)	S(VA)	I _{max} (A)	cos(φ)	fdp	THDi
U _{sinusoidal}	0,2748	60,37	63,06	0,4497	0,97	0,96	0,14
U _{armónicos1}	0,2853	63,82	65,93	0,4223	0,97	0,96	0,10
U _{armónicos2}	0,2824	63,86	65,87	0,3953	0,96	0,95	0,09
U _{armónicos3}	0,2864	65,46	67,49	0,3817	0,94	0,93	0,09

Tabla 57: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas CFL con balasto.

- Las potencias activa y aparente aumentan conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.
- El cos(fi) y el fdp disminuyen conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.
- El valor eficaz de la corriente aumenta conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión, al contrario que el pico de corriente el cual disminuye.
- La THDi disminuye conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión.

- CFL sin balasto:

	Irms(A)	P(W)	S(VA)	I _{max} (A)	cos(φ)	f _{dp}	THDi
U _{sinusoidal}	0,1371	19,55	31,44	0,3953	0,91	0,62	1,06
U _{armónicos1}	0,1326	20,09	30,52	0,2978	0,89	0,66	0,87
U _{armónicos2}	0,1390	20,20	29,78	0,3709	0,85	0,66	0,78
U _{armónicos3}	0,1418	21,31	33,29	0,5632	0,77	0,58	0,88

Tabla 58: Comparativa de diferentes combinaciones de armónicos para lámparas CFL sin balasto.

- Las potencia activa aumenta conforme lo hace la presencia de armónicos en tensión, no ocurre así con la potencia aparente que tiene un desarrollo irregular.
- El cos(fi) disminuye conforme aumenta la presencia de armónicos en tensión **(por la misma razón que disminuye P en el ensayo del contador con armónicos)**. Al contrario, el factor de potencia tiene un desarrollo irregular, y difícil de explicar pero de la mano que la potencia aparente.
- El valor eficaz de la corriente disminuye con la presencia de armónicos, aunque luego tienda a aumentar de manera considerable conforme éstos aumentan.
- La THDi también sigue un desarrollo irregular, pero de la mano de la potencia aparente y el factor de potencia.

5.5.2. Ensayo del contador con armónicos en tensión.

Antes de nada, he de aclarar que los comentarios expuestos en este subapartado pertenecen a los resultados del subapartado 4.5.5 (caso 2) y su comparación con los del 4.3.4 (caso 1).

Comparando el consumo de energía por unidad de tiempo en ambos casos, vemos que en el caso número 1 la potencia es de 389,08W y en el número 2 de 379,55W, una diferencia del 2,51% que se puede explicar debido a que en el primer caso sólo hay armónicos en corriente, y ninguno en tensión a excepción del fundamental, mientras que en el segundo caso también los hay en tensión, y dado que la potencia activa se calcula según la ecuación 29, es claro que en la situación del caso número 2 existe una contribución de los demás armónicos a la potencia activa bajo la premisa de un desfase mayor de 90 grados de tal forma que su coseno sea negativo.

Por otra parte, nótese cómo la lectura del contador en el caso 2 muestra una diferencia de tan sólo el 0,11% con respecto a la fuente, que comparada con la del caso 1 que es 1,05%, es claro que el contador ha dado una lectura mucho más exacta cuando se ha alimentado con varias componentes de armónicos en tensión. No obstante, esto no nos valdrá para llegar a conclusiones alguno pues habríamos de haber corroborado este resultado con otros contadores, otros tipos de cargas y otras combinaciones de armónicos, aunque podrá dar lugar sin duda lugar a futuras líneas de investigación.

5.5. Resumen general de conclusiones.

A continuación se hará un resumen general de todas las conclusiones recogidas en los apartados anteriores de este capítulo. No se expondrá aquí el porqué de las cosas, ni tampoco se hará referencia a hechos que no puedan ser recogidos como conclusiones generales de lámparas de bajo consumo por no poder asegurar que esto siempre ocurra así ya sea por falta de ensayos o por carecer los resultados de la claridad, tendencia y homogeneidad necesaria que para ellos se requieren.

Para el caso de las lámparas de bajo consumo ensayadas funcionando en régimen estacionario con una tensión de alimentación ideal podemos hacer las siguientes afirmaciones:

- Lámparas de la misma tecnología se comportan siempre de la misma forma.
- No afectan a la forma de onda de la tensión de alimentación en modo alguno.
- Todas son cargas capacitivas.
- Todas generan una forma de onda de corriente que se encuentra distorsionada en mayor o menor medida, y por tanto dista mucho de la forma sinusoidal.
- Sólo existen armónicos impares.
- Si ordenamos la presencia de armónicos en las lámparas de las diferentes tecnologías, y por tanto su mayor o menor distorsión de la onda de corriente, éstas serían de menor a mayor grado de distorsión las que siguen: CFL con balasto, microled, LED y CFL sin balasto (estas últimas son las que más distorsionan con diferencia, mirar tabla 49 para más detalle). Por tanto, las combinaciones más beneficiosas resultan ser aquellas en las que aparecen las lámparas que menos distorsionan, y la mejor sería por tanto CFL con balasto junto con microled, y la peor sería LED y CFL sin balasto (peor aún sería las CFL sin balasto solas pero aquí se habla de sus posibles combinaciones).
- Extrapolando el Teorema de Boucherot para este tipo de cargas, y para sus potencias activa, reactiva y de distorsión, podemos concluir que no se cumple en ningún caso, aunque bien es cierto que en todos los casos nos ha proporcionado una estimación aceptable con un error menor al 6%.

	Grado de distorsión	Armónicos presentes hasta orden x (f Hz)
LED	Medio (2)	9 (450 Hz)
Microled	Bajo (1)	5 (250 Hz)
CFL con balasto	Medio (2)	7 (350 Hz)
CFL sin balasto	Alto (3)	31 (1550 Hz)

Tabla 59: Tabla resumen del grado de distorsión de las distintas lámparas.

Para el caso de las mismas cargas mencionadas anteriormente, pero con una tensión alimentación que contiene diversas combinaciones de armónicos, concluimos que:

- Para lámparas LED y microled, la potencia activa disminuye conforme aumenta la presencia de armónicos, al contrario de lo que pasa con el caso de lámparas CFL ya dispongan o no de balasto electrónico.
- El $\cos(\varphi)$ disminuye para todos los casos conforme aumenta la presencia de armónicos.

En cuanto al efecto de los microcortes se refiere:

- Para todas las tecnologías de lámparas, la onda de corriente se mantiene sin alteración alguna excepto el tiempo que dura el microcorte.
- En todos los casos, se produce un picotazo de corriente de varias veces el valor máximo de corriente del ciclo en el momento en que termina el microcorte, el cual depende de la fase de la onda de tensión en que se produce. Para los ensayos realizados, se ha registrado un valor mínimo de 4,7 veces el valor máximo de corriente en régimen estacionario para las CFL con balasto y un valor máximo de 16,6 veces para las LED (pese a que las que más distorsionan son las CFL sin balasto las cuales han alcanzado un valor de 12,5 veces el pico de corriente máximo por ciclo.

En cuanto a sobretensiones y bajadas de tensión se refiere, la única conclusión general a la que podemos llegar es al hecho de que el factor de potencia mejora conforme más baja es la tensión de alimentación. Por otra parte, podemos resaltar el hecho de que al aumentar o disminuir la tensión de alimentación también podemos afirmar que aumenta o disminuye respectivamente la potencia aparente, excepto para el caso en el que aumenta la tensión

para lámparas LED, caso en el cual la potencia aparente se mantiene constante. Para más detalle de lo que ocurre con las diferentes tecnologías de lámparas, consultar las páginas 166 y 167 del PDF.

Y en cuanto a los resultados de los dos ensayos de medida de energía activa hechos con el contador, tenemos una diferencia del 1,05% para el caso de una tensión de alimentación ideal, y una diferencia del 0,11% para el caso de una tensión de alimentación de 230V de armónico fundamental, 10% del tercero, 5% del quinto y 2% del séptimo. Probado tras esto el correcto funcionamiento del contador y de la fuente contrastándolo con varias pruebas con circuitos en régimen permanente sinusoidal, es curioso el hecho de que en presencia de armónicos en tensión los resultados han sido mejores que sin dichos armónicos. No obstante, por tratarse sólo de dos ensayos no podemos llegar a conclusiones fiables sin más que abrir la puerta para futuras investigaciones.

Capítulo 6. Bibliografía.

- [1] P. Bilik, M. Prauzek, T. Josefova. 10-13 Junio 2013. 22nd *International Conference on Electricity Distribution*, paper 1322.
- [2] M. Arroyo, G. Namh. 1994. *La Sociedad Española de Electricidad y los inicios de la industria eléctrica en Cataluña*, FECSA, pp. 27-29.
- [3] J. Z. Fullmer. 2000. *Young Humphry Davi*, American Philosophical Society, pp. 160-162.
- [4] J. Haydn. 1866. *Haydn's Dictionary of Dates Relating*, Harper & Brothers, pp. 269.
- [5] R. Cameron. 1992. *International Banking 1870-1914*, USSR, pp. 471-480.
- [6] J. Cegarra. 2012. *La tecnología*, Ediciones Díaz de Santos, pp. 24-25.
- [7] J. Pohl. 2011. *Building Science: concepts and application*, John Wiley & Sons, pp. 246-247, 83-95.
- [8] P. Bastian. 2001. *Electrotecnia*, Ediciones AKAL, pp 439-442.
- [9] Directiva Europea 98/11/CE.
- [10] Directiva Europea 2009/125/CE.
- [11] Reglamento (CE) nº244/2009 del 18 de Marzo.
- [12] Reglamento (CE) nº859/2009 del 18 de Septiembre.
- [13] Directiva Europea 2005/32/CE.
- [14] http://ec.europa.eu/energy/lumen/editorial/index_es.htm
- [15] W.H. Hayt, J.E. Kemmerly, S.M. Durbin. 2007. *Análisis de circuitos en ingeniería*, Mc Graw-Hill, pp. 11-17, 22, 39-39.
- [16] J. Fraile. 2012. *Circuitos eléctricos*, Pearson Educación, pp. 1-23, 142-165, 193-227, 241-251.
- [17] J. W. Nilsson, S.A. Riedel. 2005. *Circuitos eléctricos*, Pearson, pp. 398-419.
- [18] F. Aznar, A. Espín, F. Gil. 2005. *Electrotecnia Básica para Ingenieros*, Editorial Universidad de Granada, pp. 21-36, 81-92.
- [19] L. I. Eguíluz. 2001. *Potencia en Régimen No-Sinusoidal*, Editorial Universidad de Cantabria, pp. 15-29.
- [20] E. Marrufo, J. Castillo. 2010. *Instalaciones eléctricas interiores*, Mc Graw-Hill, pp. 175-195.
- [21] J. Chapa. 1990. *Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría*, Editorial Limusa, pp. 13-15, 27-35.
- [22] *User's Guide AC Power Solutions Agilent Models 6811B, 6812B and 6813B*, Agilent Technologies, pp. 13-14, 59-62.
- [23] *Using the Agilent Technologies 6800 Series AC Power Source/Analyzers for*

- Generation and Measurement*, Agilent Technologies, pp. 4-9.
- [24] *Programming Guide AC Power Solutions Agilent Models 6811B, 6812B, 6813B, 6814B, 6834B and 6843B*, Agilent Technologies, pp. 15-112.
 - [25] *Manual Contador ACE 1000*, Actaris.
 - [26] J. Arrillaga, L.I. Eguíluz. 1994. *Armónicos en Sistemas de Potencia*, Editorial Universidad de Cantabria, pp. 17-82
 - [27] J. Fraile. 2003. *Máquinas Eléctricas*, Mc Graw-Hill, pp. 733-742.
 - [28] J. Serret. 1995. *Manual de Estadística Universitaria*, ESIC Editorial, pp. 55.
 - [29] *Orden del Ministerio de Industria 3860/2007 de 28 de Diciembre*.
 - [30] R. Esteve. 2005. *Fundamentos de electrónica digital*, Editorial Universidad Politécnica de Valencia, pp. 103-105.
 - [31] A.V. Oppenheim. 1998. *Señales y sistemas*, Pearson Educación, pp. 5-7.
 - [32] J. Balcells, F. Daura, R. Esparza, R. Pallás. 1992. *Inferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, Marcombo, pp. 284-287.

PORTADA



CONTRAPORTADA



LOMO

