



Universidad Nacional
de Mar del Plata

.....

Departamento de Ingeniería Eléctrica



Facultad
de Ingeniería

Proyecto Trabajo Final

Octubre de 2013

LÁMPARAS BAJO CONSUMO: ANÁLISIS ARMÓNICO Y SU IMPACTO EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

CÓDIGO:

Autor: Jorge Luis Strack
Carrera: Ing. Electromecánica

Tutor: Juan Antonio Suárez
Co-Tutor: Susana Beatriz Jacob

Evaluadores:

Ing. Claudio Dimenna
Ing. Gustavo Bacino
Ing. Rubén Ferreyra

ISBN 978-987-1990-11-5

jlstrack@fi.mdp.edu.ar



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Departamento de Ingeniería Eléctrica



Proyecto Trabajo Final

Octubre de 2013

LÁMPARAS BAJO CONSUMO: ANÁLISIS ARMÓNICO Y SU IMPACTO EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

CÓDIGO:

***Autor: Jorge Luis Strack
Carrera: Ing. Electromecánica***

***Tutor: Juan Antonio Suárez
Co-Tutor: Susana Beatriz Jacob***

Evaluadores:

***Ing. Claudio Dimenna
Ing. Gustavo Bacino
Ing. Rubén Ferreyra***

Strack, Jorge Luis

Lámparas bajo consumo : análisis armónico y su impacto
en los sistemas eléctricos de potencia . - 1a ed. - Mar del
Plata: Ed. Suárez, 2013.

310 p. ; 29x21 cm.

ISBN 978-987-1990-11-5

1. Ingeniería Eléctrica. I. Título
CDD 621.3

© 2013, Ediciones Suárez
Roca 4091. Mar del Plata. Argentina
Tel. (223) 457-2697
info@edicionessuarez.com.ar

Queda hecho el depósito que indica la ley 11.723
ISBN 978-987-1990-05-4

Impreso en Argentina

Reservados todos los derechos. El contenido de esta publicación no puede ser
reproducido, ni en todo ni en parte, ni transmitido ni recuperado por ningún sistema de
información, en ninguna forma ni por ningún medio, sin el permiso previo del editor.

RESUMEN

Es objetivo de este trabajo analizar el impacto que producirá en las redes de distribución eléctrica el reemplazo de lámparas incandescentes por las denominadas de bajo consumo, entre las que se destacan las Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC) y las lámparas con Diodos Emisores de Luz (LED).

Desde el 1 de junio del 2011, Argentina, siguiendo normas implementadas en otros países, puso en vigencia la prohibición de la venta de lámparas incandescentes a partir de los 25 [W].

Se investigará la influencia que tendrá en los índices de la calidad de la energía, el incremento progresivo de lámparas con alto contenido de componentes armónicos que irán reemplazando a las lámparas incandescentes que actúan como cargas lineales puras. Varios tipos de lámparas LFC y LED existentes en el mercado argentino, serán ensayadas, con el propósito de modelarlas en el programa Alternative Transients Program (ATP), junto a otras cargas típicas de usuarios residenciales. Distintos escenarios en el tiempo serán simulados variando la proporción de lámparas incandescentes, fluorescentes, halógenas y LED. Los resultados se compararán con mediciones realizadas en subestaciones transformadoras de media a baja tensión que alimentan usuarios residenciales preferentemente.

Por último se realizará un análisis económico de los reemplazos de lámparas analizados, y se estudiarán los impactos ambientales del ciclo de vida de cada tipo de lámpara analizado.

PALABRAS CLAVES: armónicos, diversidad, atenuación, carga no lineal, simulación, ATP, lámpara fluorescente compacta, lámpara LED.

OBJETIVOS

- 1) Analizar el funcionamiento de cargas no lineales de uso residencial, efectuando mediciones y modelado en software ATP.
- 2) Ensayar las distintas lámparas de bajo consumo existentes en el mercado eléctrico argentino (LFCs y LEDs) con medición de corriente, potencia, factor de potencia verdadero y distorsión armónica total (THDi%). Modelar las mismas.
- 3) Efectuar mediciones en campo en usuarios residenciales.
- 4) Realizar una encuesta energética a usuarios residenciales de nuestra ciudad, con el fin de caracterizar la carga eléctrica de este tipo de usuarios.
- 5) Obtener datos de mediciones en subestaciones transformadoras en redes de distribución.
- 6) Modelar y simular en el ATP una red de distribución real a los efectos de analizar la calidad del producto al incorporar masivamente luminarias con alto contenido armónico, evaluando los niveles de distorsión armónica en corriente y tensión con la normativa vigente.
- 7) Analizar los aspectos económicos y ambientales de las lámparas analizadas en el trabajo.

EXPOSICIÓN SINTÉTICA DE LA LABOR DESARROLLADA

- Búsqueda, lectura comprensiva y análisis de la bibliografía empleada (publicaciones de la IEEE, publicaciones de los integrantes del Proyecto Calidad de la Energía, normativas internacionales y nacionales vigentes sobre límites de distorsión aplicables a equipos eléctricos, y sobre la prohibición de la importación y/o venta de lámparas incandescentes).
- Realización junto a integrantes del Grupo de Investigación L.A.T. de una encuesta energética a usuarios residenciales de nuestra ciudad, con el objetivo de determinar la cantidad de lámparas por usuario y su distribución por tipos (incandescentes, halógenas, fluorescentes, LED, etc), potencias y horas de uso.
- Procesamiento de los datos de la encuesta, a través de planillas de cálculo. Programación de formularios y macros para automatizar la tarea, debido a la gran cantidad de información.
- Búsqueda y análisis de catálogos comerciales de lámparas asequibles en el mercado argentino. Compra y gestión de una donación de lámparas LED y fluorescentes compactas.
- Ensayo de las distintas lámparas de bajo consumo existentes en el mercado eléctrico argentino (LFC y LED), con medición de tensión, corriente, potencia, factor de potencia verdadero y tasa de distorsión armónica total de tensión y corriente (THDu% y THDi%).
- Procesamiento de los datos de los ensayos registrados con los osciloscopios digitales, utilizando planillas de cálculo, programas específicos de procesamiento de señales, y programas de cálculo, como Matlab.
- Mediciones de campo en usuarios residenciales de lámparas y artefactos domésticos.
- Realización de un curso de perfeccionamiento docente sobre aplicaciones de la herramienta computacional ATPDraw a la calidad de la energía, con el objetivo de aprender a modelar y simular cargas no lineales.
- Modelado y simulación de cargas residenciales no lineales, y análisis con modelos reales de una red de distribución, con el programa ATPDraw, con el fin de analizar la calidad del producto al incorporar en forma masiva luminarias con alto contenido armónico, evaluando los niveles de distorsión armónica en corriente y tensión. Para modelar la red de distribución se procesarán los datos de un plano georreferenciado de la Red de Distribución Eléctrica de la ciudad de Balcarce.
- Procesamiento de los datos obtenidos a través de las simulaciones. Comparación con mediciones realizadas en subestaciones transformadoras en redes de distribución. Evaluación de los niveles de distorsión armónica en corriente y tensión con la normativa vigente.

AGRADECIMIENTOS

La obtención de mi título de grado ha sido posible gracias al apoyo de muchas personas que me han ayudado en forma directa e indirecta.

En primer lugar agradezco a mi madre, que me ha apoyado a diario y ha realizado un gran esfuerzo personal para poder llevar adelante mis estudios.

En segundo lugar agradezco a mi tutor, Juan Antonio Suárez, y co-tutor Susana Beatriz Jacob, ambos me abrieron las puertas y me permitieron comenzar un hermoso camino ligado a la docencia y a la investigación, tareas que disfruto mucho y me brindan grandes satisfacciones.

También agradezco la colaboración de docentes y compañeros de la facultad que han aportado su grano de arena en la labor desarrollada y han contribuido a generar un buen clima de trabajo, en especial a los docentes Guillermo Murcia, Julio Branda y Eduardo Garín.

Agradezco a Alan Tesler, director de la empresa ALIC, por haber donado a la Universidad Nacional de Mar del Plata varias lámparas LED de vital importancia para el desarrollo de éste trabajo y a los docentes Ing. Rubén Ferreyra e Ing. Oscar Noguera, quienes me facilitaron luminarias de alumbrado público para realizar ensayos de calidad de la energía y caracterizarlas.

Por último agradezco a la sociedad argentina, ya que gracias a sus impuestos, permiten el funcionamiento de la universidad pública nacional, mérito de pocos países del mundo, y el financiamiento de becas universitarias, que en mi caso, han sido de gran ayuda, y me han permitido adquirir conocimientos en esta casa de altos estudios, lo cual me enorgullece.

CAPÍTULOS

1. Introducción	1
2. Lámparas de uso residencial	5
2.1. Lámparas incandescentes	7
2.1.1. Breve historia	7
2.1.2. Principio de funcionamiento	8
2.1.3. Elementos que componen la lámpara incandescente	8
2.1.4. Características de funcionamiento	11
2.1.5. Lámparas incandescentes halógenas	13
2.1.6. Obsolescencia de esta tecnología	14
2.2. Lámparas fluorescentes	14
2.2.1. Principio de funcionamiento	14
2.2.2. Elementos que componen la lámpara fluorescente	15
2.2.3. Características de funcionamiento	18
2.2.4. Equipo auxiliar	19
2.2.5. Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC)	21
2.3. Lámparas de estado sólido (LED)	23
2.3.1. Principio de funcionamiento de los LED	24
2.3.2. Materiales y colores de luz	25
2.3.3. LED de alta luminosidad	26
2.3.4. Lámparas con tecnología LED	29
2.3.5. Evolución y expectativas sobre la tecnología LED	29
3. Introducción al análisis de armónicos en calidad de la energía	33
3.1. Definición de distorsión armónica	35
3.2. Definición del espectro de frecuencias de una señal	36

3.3. Índices de evaluación	38
3.3.1. Índice de distorsión armónica total (THD)	38
3.3.2. Factor diversidad (FD)	39
3.3.3. Factor de atenuación (FA)	39
3.4. Causas que originan la distorsión armónica	40
3.5. Efectos producidos por los armónicos	41
3.5.1. Efecto en los cables y conductores	42
3.5.2. Efecto en transformadores	42
3.5.3. Efecto en interruptores (circuit breakers)	45
3.5.4. Efecto en las barras de neutros	45
3.5.5. Efecto en los bancos de capacitores	46
3.5.6. Efecto en los motores de inducción	49
3.5.7. Efecto en otros equipos	50
3.6. Métodos para disminuir el efecto de los armónicos	51
3.6.1. Filtros Pasivos	52
3.6.2. Filtros Activos	57
4. Legislación	63
4.1. Resumen	65
4.2. Norma IEC 61000-3-2	66
4.3. Norma IEC 61000-3-6	70
4.4. Norma IEEE 519-1992	72
4.5. Normativa del ENRE (Resolución 0099/1997. Boletín Oficial nº 28583)	74
4.6. Normativa del ENRE (Resolución 0184/2000. Boletín Oficial nº 29373)	77
5. Ensayo y modelado de lámparas y cargas residenciales	81
5.1. Metodología Experimental	83

5.1.1. Mediciones Individuales	83
5.1.2. Mediciones combinadas	95
6. Encuesta energética a usuarios residenciales	99
6.1. Metodología	101
6.2. Contenido	101
6.3. Resultados principales	101
6.3.1. Iluminación	101
6.3.2. Artefactos domésticos	104
7. Modelado y simulación de cargas residenciales y redes de distribución	109
7.1. Modelado de cargas residenciales	111
7.1.1. Determinación de la carga de equipos y aparatos domésticos	111
7.1.2. Determinación de la carga de iluminación en los tres escenarios	112
7.2. Simulación de cargas residenciales	114
7.3. Modelado de redes de distribución	118
7.3.1. Transformadores	121
7.3.2. Líneas de distribución	122
7.3.3. Cargas	124
7.3.4. Circuito unifilar, medidores de tensión y corriente	125
7.4. Simulación de redes de distribución	127
7.4.1. Resultados de las simulaciones	131
7.4.2. Comparación de los resultados obtenidos con mediciones reales en subestaciones	153
8. Aspectos Económicos	155
8.1. Introducción	157
8.1.1. Cálculo del Periodo Simple de Repago (PSR)	157

8.1.2. Cálculo del Costo Anualizado Total (CAT)	158
8.2. Análisis Económico	159
9. Aspectos Ambientales	165
9.1. Introducción	167
9.2. Impacto ambiental de las lámparas LFC	169
9.3. Consumo de energía durante el ciclo de vida de lámparas incandescentes, LFC y LED	176
9.3.1. Análisis de inventario del ciclo de vida	181
9.3.2. Producción de lámparas LED, incandescentes y LFC	182
9.3.2.1. Análisis de la lámpara LED	183
9.3.2.2. Análisis de la lámpara incandescente	187
9.3.2.3. Análisis de la lámpara LFC	188
9.3.3. Indicadores de evaluación del impacto del ciclo de vida	191
9.3.4. Resultados de la Evaluación del Ciclo de Vida	196
10. Conclusiones	203
REFERENCIAS	209
Anexo 1 – Instrumentos utilizados	215
Anexo 2 – Datos de los ensayos realizados	219
Anexo 3 – Encuesta Energética	287

CAPÍTULO 1

Introducción

En los últimos años, desde finales de 2006, al menos 37 países, la Unión Europea, Argentina, Canadá, Cuba, Australia, Rusia, Colombia entre otros, han fijado políticas tendientes a la prohibición, producción, importación y venta de lámparas incandescentes, y muchos más están considerando su adopción. Los países que ya están comprometidos con la eliminación de las lámparas incandescentes representan casi todas las economías de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), y representan más de un tercio de la demanda mundial de lámparas incandescentes. Otras economías importantes, sobre todo China, también están considerando la adopción de políticas para la eliminación de las lámparas incandescentes y es probable que ponga en marcha medidas en los próximos años [1].

En la Argentina, a partir del 1 de junio del 2011, se ha implementado la Ley N° 26.473, que establece esa restricción, quedando excluidas, las de filamento de tungsteno cuya potencia sea menor a 25 W, las de tensión nominal igual o menor a 50 V y las que ingresen al país en carácter de importación temporaria y en tránsito [2], [3].

Estas medidas implican que en el mediano plazo, la iluminación en los usuarios residenciales será provista fundamentalmente por lámparas LFC y LED y por estas últimas, muy probablemente en modo excluyente, en un futuro no tan lejano.

Como primer reemplazante de la lámpara incandescente se posiciona la fluorescente compacta, que con una menor potencia activa es capaz de proveer aproximadamente el mismo flujo lumínico. Esta ventaja sin embargo, se contrapone con el nivel de armónicos que estas lámparas inyectan a la red, de modo que una alta concentración de ellas en un punto de la red, pueden ocasionar una deformación de la onda de tensión más allá de los límites impuestos por las normas.

La iluminación residencial ha sufrido un importante cambio en los últimos 10 años, debido principalmente a la irrupción de nuevas tecnologías que han ido modificando las particularidades de uso en el sector. Entre ellas, se destacan las LFC, originalmente diseñadas para ser intercambiadas con las lámparas incandescentes de 25 W y 100 W, y que si bien están en el mercado desde hace varios años, actualmente aparecen con una variedad creciente de modelos, potencias y calidades que la hacen óptima para el reemplazo de las incandescentes.

En el mercado argentino, las distintas opciones disponibles de lámparas fluorescentes se han incrementado en los últimos tiempos, con potencias crecientes y con diversos formatos, que prácticamente hace reemplazable cualquier lámpara incandescente independiente de su tamaño o potencia.

En los últimos años han tenido su difusión las LED, que buscan establecerse en el mercado como una opción más. Este lugar será conquistado, muy posiblemente, en pocos años más, gracias a una eficacia luminosa en [lm/W] similar a las LFC y que

viene en constante aumento gracias a nuevas tecnologías aplicadas. Si bien cuenta como desventaja el elevado costo, se compensa con la ventaja de poseer una larga vida útil. Estas lámparas además son “dimerizables” y abarcan una amplia gama de colores, que las hace muy atractivas para realzar efectos decorativos.

Si bien este tipo de lámparas como las LFC tienen como ventajas un menor consumo para igual eficiencia luminosa y mayor vida útil en horas, acarrear el problema de un mayor contenido de armónicos, alcanzando en algunos tipos de LFC índices de distorsión armónica superiores al 100%.

¿Cuántas lámparas incandescentes hay en usuarios residenciales? ¿Cuántas halógenas? ¿Cuántas de bajo consumo? No existen demasiados antecedentes para dar respuestas a estos interrogantes, solo se cita en publicaciones especializadas alguna encuesta, que ya lleva unos años, en un número muy limitado de hogares, realizada por alumnos de la UBA, como parte de un proyecto final [4].

El impacto que provocará en las redes de distribución, fundamentalmente en los índices de distorsión armónica de la tensión, (THDU%), el reemplazo progresivo de lámparas que poseen características lineales puras por otras con alto contenido de armónicos es un tema que preocupa a investigadores del Área “Power Quality” (Calidad de la Energía) [5]- [16].

CAPÍTULO 2

Lámparas de uso residencial

2.1. Lámparas incandescentes

La lámpara incandescente fue, hasta hace unos años, la fuente luminosa más utilizada en diversas aplicaciones en el mundo y en particular en América Latina. Su penetración en el mercado y popularidad, en particular entre los habitantes de menores ingresos, se explica por la simpleza del montaje, reducido tamaño, funcionamiento simple y especialmente costo mucho menor que cualquiera de otras lámparas que pudieran ofrecerse como alternativa. Además es la que menos desechos contaminantes genera [17]. Fue muy aceptada por los usuarios puesto que permite percibir los colores fielmente y emite un color de luz cálido. Al igual que la luz solar, el espectro irradiado es continuo, y abarca todas las longitudes de onda del espectro visible y del infrarrojo.

2.1.1. Breve historia

El inventor de la primera lámpara eléctrica incandescente fue el ingeniero británico Robert Grove, en 1840. Contrariamente a la creencia popular, Edison no fue el inventor de este artefacto, sino que fue el primer empresario que comprendió sus posibilidades, la fabricó en serie y la comercializó de modo masivo, proveyendo toda la infraestructura necesaria para la generalización de su uso. Es razonable pensar que la lámpara eléctrica fue una consecuencia del tendido de redes eléctricas, pero no sucedió así. Edison hizo de la innovación tecnológica un objetivo explícito y permanente, fabricó en serie y vendió a pérdida, cientos de lámparas, para promover sus empresas de generación y distribución de electricidad [18].

En 1846 Farthing desarrolló la máquina automática de soplado de vidrio que permitió fabricar de modo económico las ampollitas de vidrio que aíslan el filamento del aire. La primera lámpara práctica fue construida por Goebel usando filamentos de carbón. El dispositivo alcanzó su forma final gracias a los aportes concurrentes de Edison y de Swan, el último de los cuales desarrolló un método para moldear filamentos de nitrocelulosa. En 1881 la fábrica de Edison de Menlo Park, con 133 operarios, producía 1000 lamparitas diarias a un razonable costo de 1,21 dólares cada una. Edison las vendía a solamente 80 centavos, a fin de crear un mercado para este innovador producto. El éxito pronto compensó su iniciativa y esfuerzo; en 1882 inauguró los sistemas de iluminación eléctrica pública de Londres, primero, y Nueva York, después. Pronto siguieron otras ciudades norteamericanas y europeas. Se produjo entonces un crecimiento explosivo de los sistemas de generación y distribución de electricidad, y de la tecnología asociada, la Electrotecnia.

Superando un siglo de existencia, la lámpara eléctrica de filamento incandescente ha llegado a nuestros días con una sola modificación de importancia: el reemplazo del

frágil filamento de carbón o nitrocelulosa por el de tungsteno. Esto fue posible gracias al desarrollo de un método de fabricación creado por el inventor estadounidense Coolidge, en 1908. El tungsteno funde a 3380 [°C] y tiene una gran resistencia mecánica, lo que permite aumentar su temperatura de funcionamiento y obtener luz más blanca y lámparas más resistentes al maltrato.

2.1.2. Principio de funcionamiento

La circulación de una corriente eléctrica por un filamento metálico en determinadas condiciones ambientales que dependen del vacío o gas de relleno del bulbo, lo lleva a la incandescencia. En esas circunstancias, el filamento emite energía radiante en un espectro continuo desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Solo una parte muy reducida de la energía radiante emitida es luz visible, el resto es energía radiante no visible, y calor emitido por conducción a través de los electrodos metálicos y el casquillo, y por conducción y convección a través del gas de relleno y el bulbo en contacto con el aire respectivamente. Esto no ocurre si el filamento está en vacío.

Éste balance energético depende de varios factores, tales como la temperatura del gas, presión de vapor del gas, tipo de gas utilizado, longitud y geometría del filamento y diámetro de los soportes; y determina fundamentalmente las características de eficiencia y vida útil de la lámpara.

2.1.3. Elementos que componen la lámpara incandescente

En la figura 2.1.3.1 se observan los elementos principales de una lámpara incandescente convencional:

Bulbo:

Es el cristal de vidrio que determina la forma de la lámpara, contiene una atmósfera de gases o de vacío que permite que el filamento no se oxide al ponerse incandescente. Existía en el mercado una gran variedad de lámparas en cuanto a la forma y color del bulbo. En general, están construidos con sodocalcio o vidrio blando, y en ciertos casos, en los que se deben soportar temperaturas extremas, se utiliza sílice o sílice puro fundido (cuarzo). En muchos casos se aplica también una capa interior de polvo de sílice blanda o una capa exterior coloreada, que producen una leve difusión de la luz emitida por el filamento (reducción del 2 al 35% de la misma), es por esto que las lámparas de color tienen aún un rendimiento lumínico menor que las lámparas claras debido al fenómeno de absorción. [19]

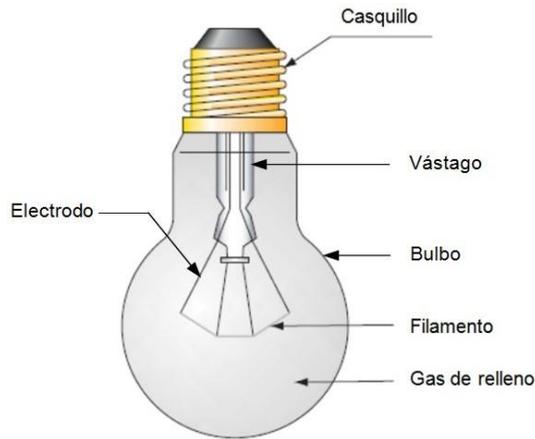


Figura 2.1.3.1. Elementos principales de una lámpara incandescente

Casquillo:

Es la base de la lámpara que permite vincularla mecánica y eléctricamente a un portalámparas. Hay dos tipos de casquillos, de rosca o EDISON y de bayoneta o SWAN, ambos están estandarizados. En general el del tipo bayoneta se utiliza cuando se necesita una posición determinada con relación a sus componentes ópticos, como en el caso de un proyector, o cuando el conjunto lámpara- luminaria va a estar sometido a vibraciones, las cuáles aflojarían un casquillo de rosca. La gran mayoría de las lámparas incandescentes utilizadas en instalaciones residenciales poseen casquillo de rosca.

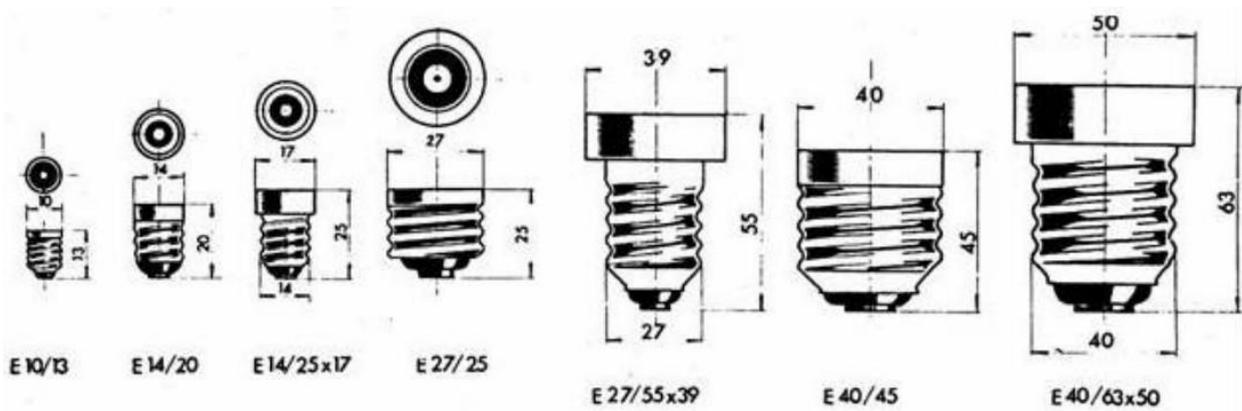


Figura 2.1.3.2. Casquillos de rosca más utilizados y su denominación normalizada

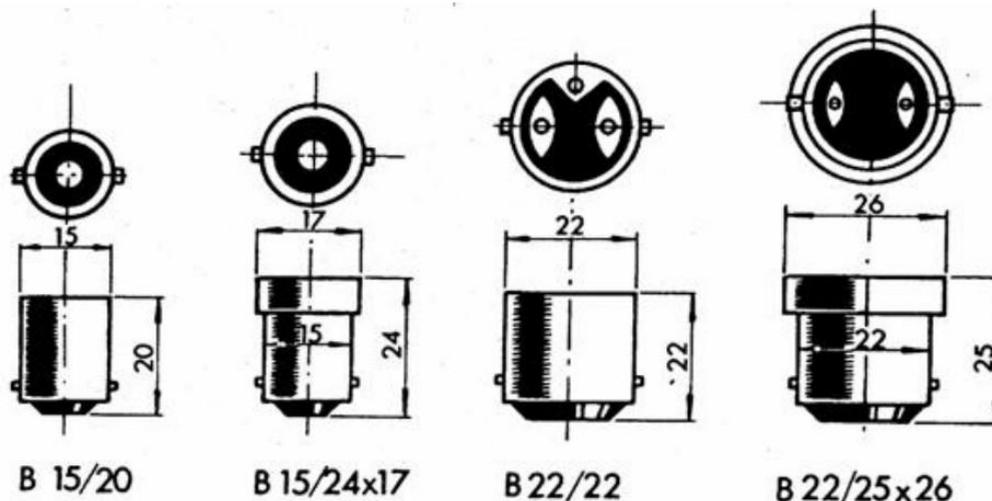


Figura 2.1.3.3. Casquillos de bayoneta más utilizados y su denominación normalizada

Filamento:

La temperatura del filamento es una variable clave en la eficiencia de este tipo de lámparas. A mayor temperatura, mayor es la proporción de energía radiada dentro del espectro visible, como se aprecia en la figura 2.1.3.4.

Por lo mencionado, el material elegido debe tener un alto punto de fusión, baja presión de vapor, alta ductilidad, emisividad selectiva y adecuada resistencia eléctrica. El tungsteno tiene estas propiedades, su punto de fusión es de 3382 [°C]. Cuanto más cercana es la temperatura del filamento a la temperatura de fusión, más alta es la proporción de energía visible radiada, y por lo tanto es mayor su eficiencia lumínica. Por otro lado, mayor es la velocidad de evaporación del filamento en vacío, por lo que su vida es menor, es decir, existe un compromiso entre la eficiencia lumínica y la vida útil para una potencia dada de la lámpara.

Al evaporarse el material del filamento, éste se transfiere a las partes adyacentes del mismo y/o al soporte de la estructura, o puede difundirse a través del gas y transportarse por corrientes convectivas. Este se condensa, en especial sobre la superficie del bulbo, formando una capa metálica que se incrementa a través de la vida y absorbe cada vez más la radiación emitida, reduciendo su eficiencia.

Ésta mejora notablemente con el uso de filamentos doblemente enrollados junto a un gas inerte, debido a que la pérdida de energía a través del gas que lo rodea es proporcional a la longitud del filamento e inversamente proporcional al diámetro.

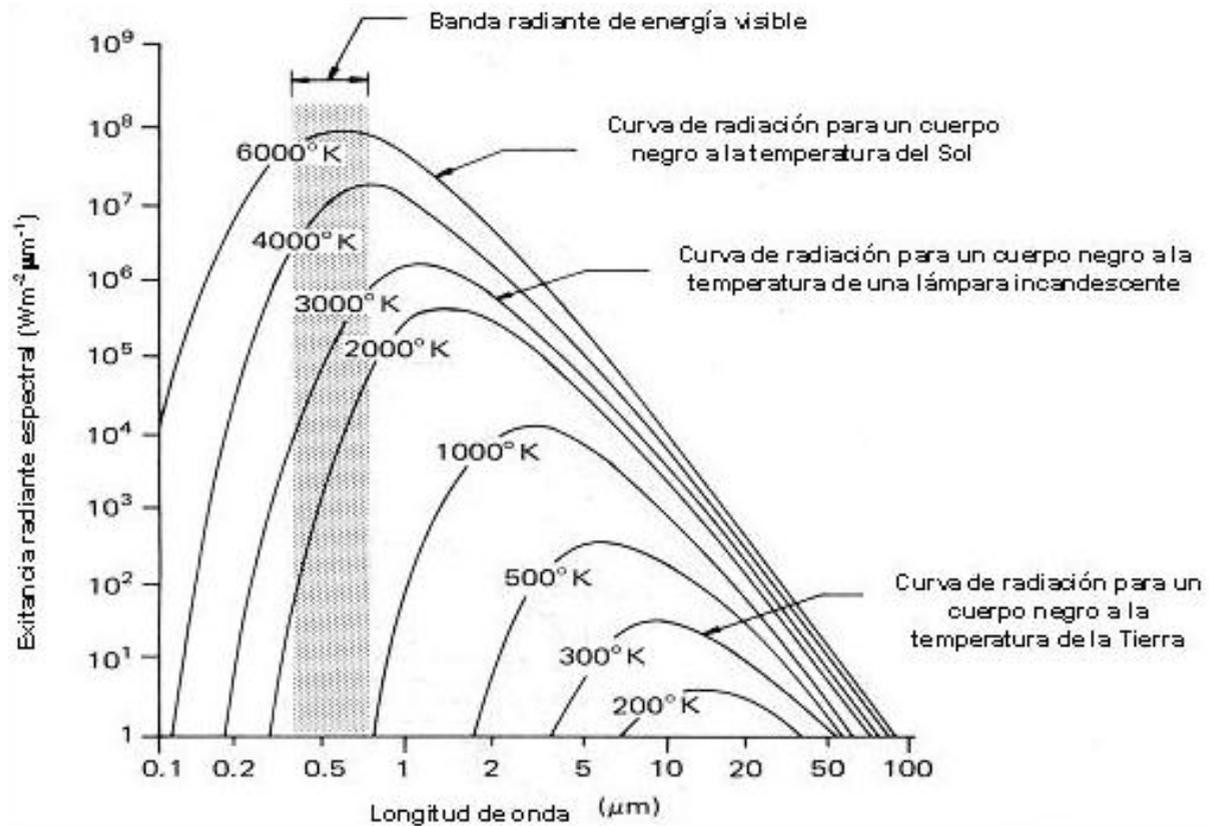


Figura 2.1.3.4. Curva de radiación de un cuerpo negro para temperaturas entre 200 y 6000 K

Gas de relleno

Si bien las lámparas de potencia menor a 40 [W] son lámparas de vacío, la mayoría de las lámparas incandescentes tienen un gas de relleno; normalmente consiste en una mezcla de argón y nitrógeno, cuya proporción depende de la aplicación a que se destina y de la tensión de la lámpara. Esta mezcla es un gas no reactivo y de baja conductividad de calor que reduce la velocidad de evaporación, y por lo tanto, el ennegrecimiento del bulbo, lo que mejora la vida útil y la eficiencia de la lámpara.

2.1.4. Características de funcionamiento

En cuanto a las características cromáticas, como ya se mencionó, el espectro emitido por una lámpara incandescente es continuo, figura 2.1.4.1. Por definición el índice de reproducción de color es de 100.

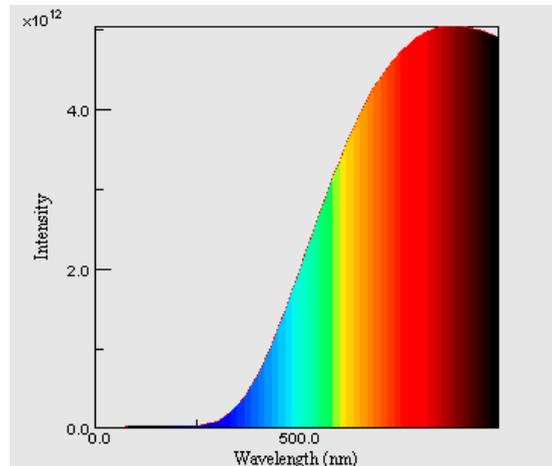


Figura 2.1.4.1. Espectro de emisión visible de una lámpara incandescente

La eficiencia de una lámpara incandescente convencional es de 12 a 15 [lm/W]. La vida útil es de alrededor de 1000 horas, y está determinada por la rotura del filamento. Algunas lámparas experimentan un deterioro rápido por disipación térmica, según la posición de funcionamiento tales como las incandescentes halógenas de cuarzo lineales, pues una parte del filamento trabaja a mayor temperatura que el resto.

Es importante mencionar que la temperatura del filamento está determinada por la tensión aplicada, ya que la corriente, la potencia y el flujo luminoso son variables dependientes de la misma. Por esta razón la vida útil de las lámparas incandescentes es muy sensible a la tensión aplicada, a medida que la tensión aumenta la vida disminuye exponencialmente. Por ejemplo, una variación del 5% por encima de la tensión nominal reduce la vida a la mitad, mientras que una reducción del 5% por debajo de la tensión nominal duplica la vida útil de la misma, y la eficiencia lumínica solo se reduce en un 10% (figura 2.1.4.2).

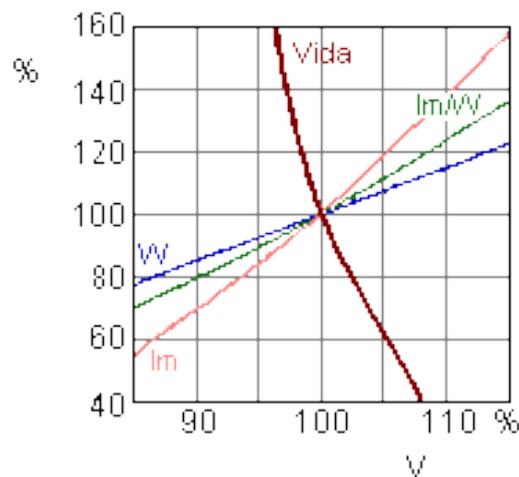


Figura 2.1.4.2. Variación porcentual de la potencia P (curva azul), vida útil (curva bordó), eficiencia lumínica (curva verde) y flujo Φ (curva rosa), en función de la variación porcentual de la tensión aplicada.

2.1.5. Lámparas incandescentes halógenas

Como se ha mencionado, las lámparas incandescentes convencionales pierden parte de su flujo lumínico con el tiempo debido a que el tungsteno del filamento se evapora depositándose en forma de capa oscura en el interior de la ampolla.

Este problema se disminuye añadiendo halógenos al gas de relleno. Los halógenos son el flúor, el cloro, el bromo y el yodo. Estas sustancias se combinan con el tungsteno evaporado formando una molécula. Cuando esta molécula se calienta cerca del filamento incandescente, se descompone, el tungsteno vuelve a depositarse sobre el filamento y la halógena se libera al gas. Esto se conoce como ciclo de halógeno, el cual permite que parte del tungsteno evaporado se recupere, extendiendo la vida de la lámpara manteniendo su flujo luminoso durante más tiempo.

Para mantener el tungsteno cerca del filamento, la ampolla se ubica cerca del mismo (figura 2.1.5.1). Para resistir las altas temperaturas, la ampolla debe ser construida de “cuarzo- yodo”, siendo el yodo uno de los halógenos utilizados [20].



Figura 2.1.5.1. Diferencia entre una lámpara incandescente convencional (izquierda) y una incandescente halógena (derecha). Se observa en esta última la ampolla interna al bulbo muy cerca del filamento de tungsteno

Estas lámparas generan mayor cantidad de emisión ultravioleta (UV) que las incandescentes convencionales, debido a la mayor temperatura del filamento. La cantidad de radiación UV emitida está determinada por el material del bulbo, como es el caso del cuarzo. Por tanto, en aplicaciones donde es crítica esta radiación se debe usar filtros UV, tal es el caso de iluminación de obras de arte.

2.1.6. Obsolescencia de esta tecnología

Una tecnología se hace obsoleta cuando se inventa otra que cumple la misma función con menor costo de fabricación o de operación (o sea, que tiene mayor eficiencia), o con funciones útiles adicionales a un costo similar. El problema de la lámpara incandescente no fue su costo de fabricación, que en grandes cantidades resultó ser muy bajo, sino su bajo rendimiento. La mayor parte de la energía consumida por una lámpara de filamento incandescente (más del 80%) solo produce calor, no luz. Por esta razón la lámpara incandescente está siendo reemplazada por otras mucho más eficientes: la lámpara fluorescente y la lámpara led. Si bien en los últimos años se ha mejorado la tecnología obteniendo lámparas incandescentes halógenas que consumen un 30 % menos de energía eléctrica para igual flujo lumínico emitido, se puede decir que la lámpara incandescente común es hoy el símbolo de la iluminación ineficiente.

2.2. Lámparas fluorescentes

La lámpara fluorescente es una lámpara de descarga eléctrica en atmósfera de vapor de mercurio a baja presión, y un gas inerte para el arranque y regulación del arco, cuyo efecto luminoso se basa en el fenómeno de la fluorescencia. La superficie interna de la ampolla está cubierta por una sustancia luminiscente (polvo fluorescente o fósforo) cuya composición determina la cantidad de luz emitida y la temperatura de color de la lámpara. [21]

Sus ventajosas características, tales como la gran variedad de formas y tamaños disponibles, la flexibilidad en sus propiedades de reproducción de color, el buen desempeño en términos de conversión de potencia eléctrica en luz y la emisión de luz difusa, hacen de esta lámpara una fuente de luz adecuada para numerosas aplicaciones.

2.2.1. Principio de funcionamiento

En las lámparas incandescentes, la corriente eléctrica recorre el filamento produciendo la incandescencia. En una lámpara de descarga, como la fluorescente, la corriente debe atravesar un gas o vapor metálico. Éstas se basan en el fenómeno de la luminiscencia.

En los extremos del tubo de una lámpara fluorescente se dispone de electrodos conectados a una fuente de tensión alterna, y en su interior hay vapor de mercurio. En un semiciclo, el electrodo unido al polo positivo se llama ánodo, y cátodo al unido al polo negativo. En el semiciclo siguiente la polaridad se invierte. Los electrones libres

del interior del tubo son atraídos por el electrodo positivo o ánodo. En su recorrido, los electrones chocan con los átomos del gas produciendo el fenómeno de luminiscencia.

Luminiscencia

Cuando un electrón es acelerado por un campo eléctrico adquiere velocidad elevada. Cuando choca en estas condiciones contra un átomo es capaz de excitarlo, haciendo pasar alguno de sus electrones a un nivel de energía superior. Los electrones que han ganado energía en el átomo excitado retornan rápidamente a su posición inicial, devolviendo la energía que habían adquirido en forma de radiaciones electromagnéticas.

Algunos electrones son tan veloces que, al chocar con un átomo, este desprende electrones de su capa externa (se ioniza el átomo), con lo cual el número de electrones acelerados aumenta y el proceso no se detiene.

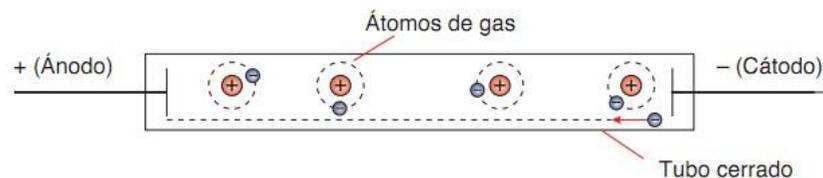


Figura 2.2.1.1. Efecto de luminiscencia

Los primeros electrones libres se obtienen de los propios electrodos, pues van recubiertos de sustancias que los emiten fácilmente, como el bario o el cesio, bien a temperatura ambiente (lámparas de cátodo frío) o bien calentándolos (lámparas de cátodo caliente). Estos últimos se basan en el efecto termoiónico.

A diferencia de la lámpara incandescente, las lámparas de descarga como la fluorescente necesitan incorporar un elemento regulador de la intensidad. Además estas últimas emiten radiaciones de una determinada longitud de onda, mientras que las incandescentes producen un espectro luminoso continuo [22].

2.2.2. Elementos que componen la lámpara fluorescente

Las partes principales de la lámpara fluorescente son la ampolla o tubo de descarga, que está en contacto con el medio ambiente, la capa fluorescente, los electrodos, el gas de relleno y los casquillos (Figura 2.2.2.1).

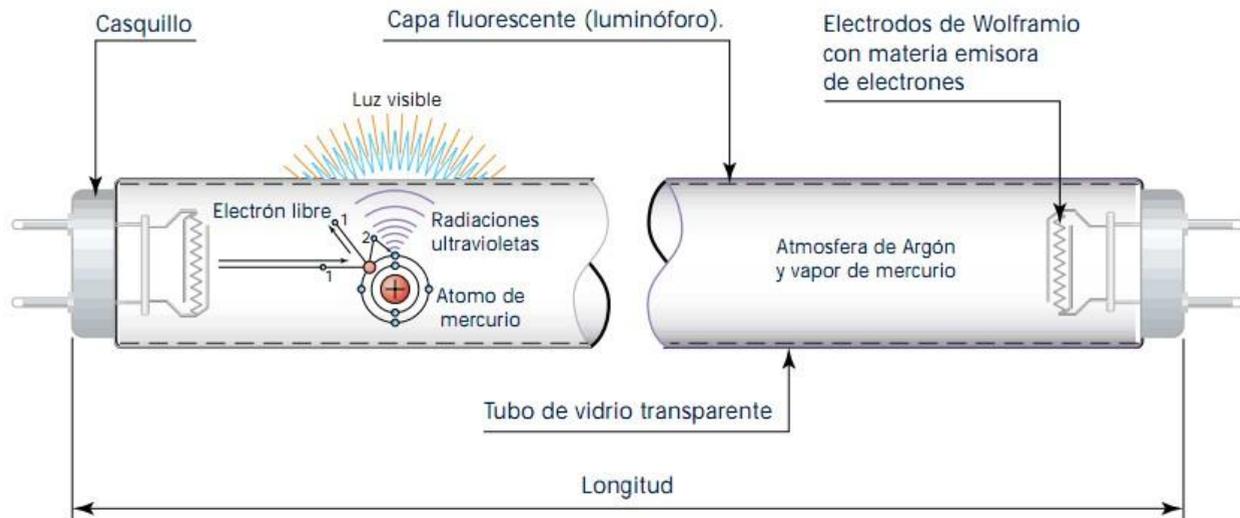


Figura 2.2.2.1. Elementos principales de una lámpara fluorescente tubular

Ampolla o tubo de descarga:

La ampolla de una lámpara fluorescente normal está hecha de vidrio cal-soda suavizado con óxido de hierro para controlar la transmisión ultravioleta de onda corta.

Los diámetros más normales son de 16, 26 y 38 [mm], mientras que las longitudes más comunes para los tubos rectos son de 590, 1200 y 1500 [mm], que corresponden a los tubos estándares de 20, 40 y 65 [W], para los tubos de 38 [mm] de diámetro, y 18, 36 y 58 [W] para los de 26 [mm] de diámetro. En el mercado hay una amplia gama de tubos para infinidad de aplicaciones.

Casquillo de conexión:

Los tubos fluorescentes disponen de dos casquillos de conexión, uno en cada extremo, provistos de un par de clavijas, y unidos eléctricamente por electrodos. Estas están separadas del cuerpo del casquillo por medio de una pieza aislante, que puede ser baquelita, plástico, etc.

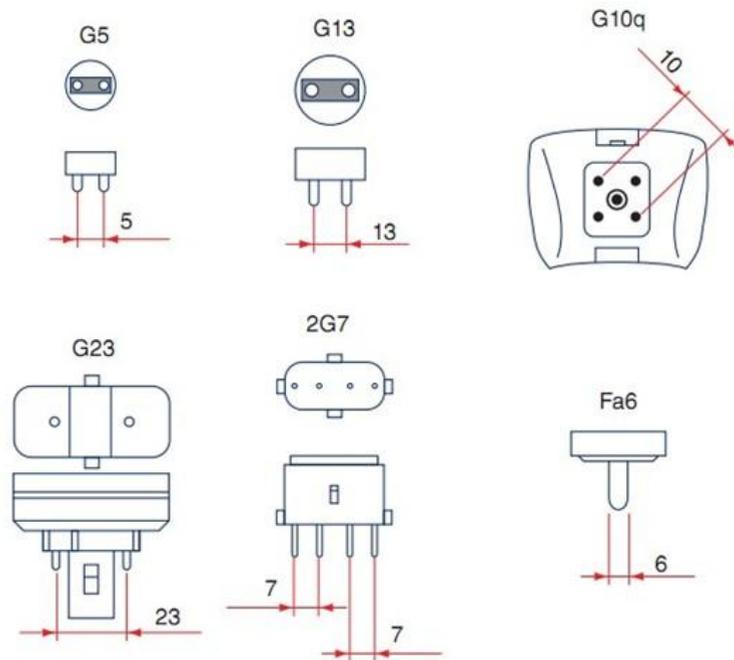


Figura 2.2.2.2. Casquillos normalizados de lámparas fluorescentes

Revestimientos fluorescentes:

Son los que transforman las radiaciones ultravioletas producidas en la descarga en luz visible. El 90% de la luz emitida por los tubos se debe a su acción.

El factor más importante para determinar las características de la luz de una lámpara fluorescente es el tipo y composición del polvo fluorescente (o fósforo) utilizado. Éste fija la temperatura de color (y como consecuencia la apariencia de color), el índice de reproducción del color (IRC) y, en gran parte, la eficiencia lumínica de la lámpara.

Tres grupos de fósforos se utilizan para producir las diferentes series de lámparas con diferentes calidades de color (fósforos estándar, trifósforos y multifósforos).

Electrodos:

Los electrodos o filamentos de la lámpara, son de hilo de tungsteno, arrollados en doble o triple espiral, sirven para conducir la energía eléctrica a la lámpara y proporcionan los electrones necesarios para mantener la descarga. Están recubiertos por sustancias que emiten gran cantidad de electrones, por lo general bario o cesio.

Cuando se les aplica una tensión eléctrica, el paso de la corriente eléctrica a través de ellos provoca su caldeo y, en consecuencia, la emisión de electrones por el efecto termoiónico. El propio calor generado por la descarga los mantiene a la temperatura adecuada.

Gas de relleno:

El gas de relleno de una lámpara fluorescente consiste en una mezcla de vapor de mercurio saturado y un gas inerte fácilmente ionizable (argón y kriptón o neón).

Mientras el tubo no funciona, la pequeña cantidad de mercurio permanece en estado líquido. Como el argón es muy ionizable, la primera descarga tiene lugar a través de él, de modo que genera una temperatura suficiente para vaporizar las gotas de mercurio. Posteriormente se produce la descarga como si en el interior solo hubiese vapor de mercurio.

2.2.3. Características de funcionamiento

En las lámparas fluorescentes, la temperatura de color está comprendida entre 2.700 [K] y 6.500 [K], con una curva de distribución espectral discontinua que reproduce colores según la composición de la sustancia fluorescente que recubre la pared interior del tubo.

Puesto que la curva de sensibilidad del sistema visual humano indica que su máxima sensibilidad se encuentra en 555 [nm], una mayor eficiencia se lograría si los fósforos convirtieran la radiación UV en este rango. Sin embargo esta luz sería de un color muy verde e inaceptable para iluminación. La presencia de tres colores primarios – rojo, verde y azul – en proporciones correctas es esencial para alcanzar una luz blanca con buenas propiedades de reproducción de color por lo que existe un compromiso entre esta y la eficacia luminosa.

Cada radiación luminosa total resultante es la suma de la radiación del espectro discontinuo más la de una distribución espectral continua, cada vez más eficaz con el empleo de fósforos especiales (figura 2.2.3.1).

De esta forma se fabrican tubos fluorescentes con varias tonalidades de luz e índices de reproducción cromáticos clasificados, según las normas C.I.E. en tres grandes grupos:

- Luz blanca día: $TC > 5.000\text{ K}$
- Blanco neutro: $5.000\text{ K} \geq TC \geq 3.000\text{ K}$
- Blanco cálido: $TC < 3.000\text{ K}$

En cada grupo existen varios tonos con una amplia variedad de temperaturas de color e índices de reproducción cromática, según cada fabricante, que cubren las necesidades de una amplia gama de aplicaciones.

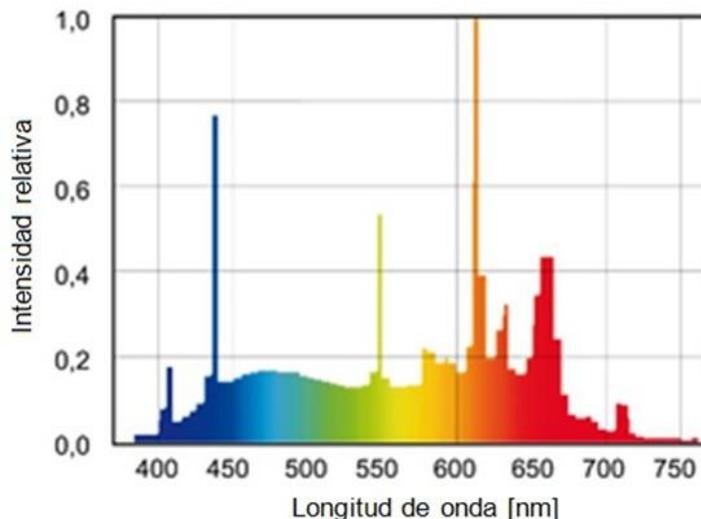


Figura 2.2.3.1. Distribución espectral de una lámpara fluorescente

Estas lámparas precisan un equipo auxiliar formado por un balasto e ignitor (cebador), además de un condensador de compensación para mejorar el factor de potencia.

Los valores nominales de funcionamiento se alcanzan al cabo de cinco minutos. Cuando se apaga la lámpara, debido a la gran presión en el quemador, necesita enfriarse entre cuatro y quince minutos para encenderse nuevamente.

La vida útil de una lámpara fluorescente depende del número de encendidos y apagados. Estas lámparas necesitan un periodo de calentamiento hasta alcanzar su flujo luminoso normal. Por esto, no es aconsejable utilizarlas en lugares que requieran encendidos y apagados con relativa frecuencia, como baños, pasillos y escaleras.

2.2.4. Equipo auxiliar

Para que una lámpara fluorescente funcione, se requiere de un equipo auxiliar que brinde la tensión necesaria durante el arranque y que limite la corriente del arco durante el funcionamiento de la misma.

Existen varios sistemas de arranque o encendido de las lámparas fluorescentes:

- **Con cebador:** Convencional o electrónico. Provoca el calentamiento de los electrodos. Es el más utilizado. En este caso el equipo complementario del tubo fluorescente está compuesto por:
 - Reactancia o balasto electromagnético
 - Cebador o arrancador
 - Zócalos para el tubo
 - Zócalos para el arrancador



Fig. 2.2.4.1. Cebadores, zócalos y balasto de lámparas fluorescentes.

- **Con cebador electrónico:** en lugar de uno convencional, se podría utilizar un cebador electrónico, el cuál proporciona rapidez y seguridad al equipo, ya que reduce a la mitad el tiempo de encendido.
- **Rápido:** La pequeña tensión proporcionada por una reactancia caliente los electrodos del tubo. En este sistema de encendido se elimina el arrancador.
- **Instantáneo:** Un autotransformador proporciona una tensión suficiente para provocar el arco entre los electrodos de forma instantánea y sin necesidad de precalentamiento, por este motivo se denomina lámpara de cátodo frío. Estas lámparas se distinguen de las demás en que solo llevan un contacto de espiga en cada casquillo. No lleva reactancia ni arrancador.
- **Con reactancia electrónica:** No es necesario el cebador, y se mejora el sistema de arranque, sin parpadeos y más rápido que los sistemas convencionales, con lo que además se alarga la vida de las lámparas. Algunas permiten regular el nivel de iluminación de forma manual o automática mediante un dispositivo de control incorporado que favorece el ahorro energético. Existe una amplia gama de reactancias adaptadas a las distintas posibilidades de montaje y tipo de lámparas.



Figura 2.2.4.2. Reactancia electrónica para lámparas fluorescentes.

2.2.5. Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC)

Las comúnmente conocidas como lámparas bajo consumo denominadas LFC son una variante mejorada de las lámparas fluorescentes tubulares, que fueron presentadas por primera vez al público en la Feria Mundial de New York efectuada en el año 1939. Desde aquel momento, estas últimas se utilizan ampliamente en iluminación, debido a su mayor rendimiento, y en consecuencia, menor consumo de energía, y calor disipado al ambiente prácticamente despreciable frente al de las lámparas incandescentes.

Debido al peso, volumen, y necesidad de instalar zócalos especiales, los tubos fluorescentes no se utilizaban ampliamente en instalaciones residenciales. En 1976 el ingeniero Edward Hammer, de la empresa norteamericana G. E., creó una lámpara fluorescente compuesta por un tubo de vidrio alargado y de reducido diámetro, que dobló en forma de espiral para reducir sus dimensiones al tamaño aproximado de una lámpara incandescente común, cuyas prestaciones lumínicas eran en cierta forma similares, pero con un consumo mucho menor y poca disipación de calor al medio ambiente.

Aunque las perspectivas de explotación eran buenas, el proyecto de producirlas masivamente quedó frustrado, dado que la tecnología existente en aquel momento no permitía la producción en serie de una espiral de vidrio tan frágil como la que requería por entonces ese tipo de lámpara.

En la década de los 80', otros fabricantes apostaron por la nueva tecnología y se arriesgaron a lanzarla al mercado, pero a un precio de venta muy elevado. Sin embargo, los grandes pedidos que hizo en aquellos momentos el gobierno latinoamericano a los fabricantes y su posterior subvención por el ahorro de energía eléctrica que representaban, permitieron ir reduciendo de a poco su precio, hasta acercarlo al costo de producción.

La posterior aceptación obtenida por parte de los usuarios, estimuló a los fabricantes a realizar las inversiones necesarias, emprender la producción masiva y bajar mucho más el precio de venta al público.

En cuanto a su constitución, a pesar de su reducido tamaño, y zócalos que se adaptan a los utilizados en lámparas incandescentes, las LFC son similares a las lámparas fluorescentes tubulares, solo que son de encendido rápido, por lo tanto no requieren arrancador o cebador para encender el filamento, sino que emplean un balasto electrónico de dimensiones reducidas alojado en la base que se interpone entre el zócalo y el tubo de la lámpara. Este balasto se compone de un circuito rectificador de onda completa y un oscilador, encargado de elevar la frecuencia de trabajo de la lámpara entre 20000 y 60000 [Hz], en lugar de los 50 – 60 [Hz] con los que operan los balastos electromagnéticos convencionales de los tubos fluorescentes. Dicho balasto suministra la tensión necesaria para encender el tubo y regula posteriormente la intensidad de corriente que circula por el interior del mismo una vez encendido. [23]



Figura 2.2.5.1. Lámparas fluorescentes lineales, circulares y compactas, de diferentes potencias y tipos de casquillos.

El funcionamiento de una LFC es el mismo que el de un tubo fluorescente común, excepto que es mucho más pequeña y manuable, es compatible con los portalámparas de las incandescentes, no requieren equipo auxiliar para funcionar, y están disponibles

en tonalidades de luz día o fría y luz blanca o cálida, con una excelente reproducción de los colores. Encienden de inmediato, pero con una luz débil durante unos minutos antes de que alcancen su máxima intensidad de iluminación.

Comparadas con las incandescentes tienen un precio de venta mayor, pero este se compensa luego con el ahorro que se obtiene en el consumo de energía eléctrica (en promedio un 80%) y por el tiempo de vida útil más prolongado, de alrededor de 8000 horas, en comparación con las 1000 y 2000 horas que ofrecen las lámparas incandescentes convencionales y halógenas respectivamente. (Ver capítulo 10).

Por sus diversas formas y zócalos similares a los utilizados por las incandescentes, disponibilidad de modelos con distinta temperatura de color, y altos índices de reproducción cromática, son muy utilizadas en el hogar, comercio e industria. Se recomiendan en interiores de uso prolongado, y/o de difícil acceso para el reemplazo de la lámpara, excepto en aquellos lugares con alta frecuencia de encendido, con baja temperatura, ni en plafones completamente cerrados que no aseguren una mínima ventilación.

2.3. Lámparas de estado sólido (LED)

Las lámparas de estado sólido emplean diodos LED (Light Emitting Diode: Diodo Emisor de Luz) de alta luminosidad. El LED es un dispositivo semiconductor que emite luz incoherente, es decir formada por la superposición de ondas de distinta frecuencia, de espectro reducido cuando se polariza de forma directa, y es atravesado por la corriente eléctrica de ánodo a cátodo.

Las diferentes características fundamentales del LED, como su potencia, color, emisión luminosa, etc., son variables que se obtienen modificando las propiedades del material semiconductor (composición, estructura, combinación de materiales, etc.) y de otros componentes que lo rodean y forman parte del LED.

Estos dispositivos semiconductores pueden obtener mayor luz visible y menos calor de la energía eléctrica, es decir tiene mayor eficiencia en la conversión de energía. Por ser de estado sólido tienen mayor resistencia mecánica y fiabilidad ante condiciones críticas de operación, como golpes y vibraciones.

La iluminación con lámparas LED o de estado sólido, constituye el avance más significativo en el campo de la iluminación desde la invención de la luz eléctrica incandescente desde hace más de un siglo puesto que ofrece un considerable ahorro de energía frente a las lámparas incandescentes, beneficios medioambientales con respecto a las lámparas fluorescentes compactas y una vida útil superior a ambas tecnologías.

2.3.1. Principio de funcionamiento de los LED

El LED tiene una estructura simple y sólida, consiste en un pequeño microchip semiconductor incrustado en un sencillo circuito eléctrico. A diferencia de la lámpara incandescente, no tiene un filamento, sino que se enciende por el movimiento de electrones en un material semiconductor. Los principales componentes de un LED son:

- El diodo: un microchip constituido por dos capas semiconductoras, tipo P y N.
- Dos electrodos: Un cátodo (-) y un ánodo (+).
- Una lente epoxi: La cual protege al diodo y determina el brillo y dirección de la luz.

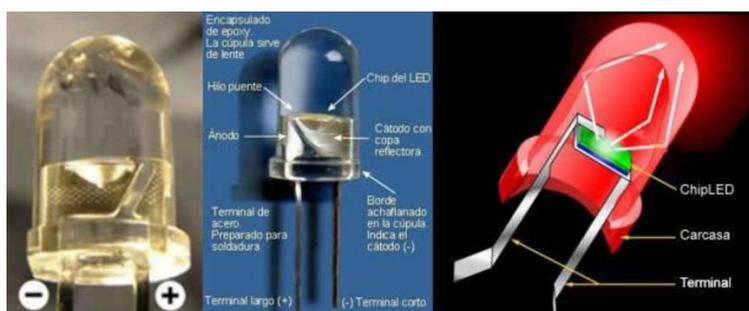


Figura 2.3.1.1. Elementos constitutivos de un LED.

En los materiales semiconductores, al pasar un electrón de la banda de conducción a la de valencia, este pierde energía. Esta energía perdida se puede manifestar en forma de un fotón desprendido con una amplitud, dirección y fase aleatorias.

Al polarizar directamente un diodo LED se consigue que por la unión PN sean inyectados huecos en el material tipo N y electrones en el material tipo P, es decir, los huecos de la zona P se mueven hacia la zona N, y los electrones de la zona N se mueven hacia la zona P, produciéndose por consiguiente una inyección de portadores minoritarios, como se muestra en la figura 2.3.1.2.

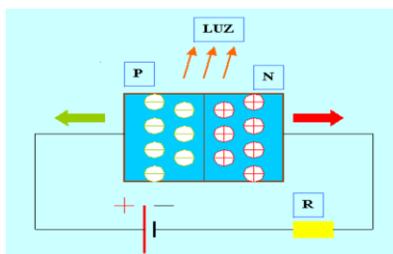


Figura 2.3.1.2. Funcionamiento de un LED.

Ambos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula por el diodo. Si los electrones y los huecos están en la misma región, pueden recombinarse de manera tal que los electrones puedan ocupar los huecos, pasando de un nivel energético superior a otro inferior más estable, liberando una cantidad de energía proporcional al

salto de banda de energía del material semiconductor. Una parte de esta energía se libera en forma de luz y otra parte en forma de calor en una proporción determinada por la mezcla de los procesos de recombinación que se producen.

La energía contenida en un fotón de luz es proporcional a su frecuencia, es decir, a su color. Cuanto mayor sea el salto de banda de energía del material semiconductor que forma el LED, más elevada será la frecuencia de luz emitida.

2.3.2. Materiales y colores de luz

En la Tabla 2.3.2.1 se detallan las frecuencias de emisión típicas de los LED convencionales disponibles comercialmente y sus materiales correspondientes. Los datos fueron obtenidos de distintos fabricantes.

Estos LED convencionales no emiten luz blanca y el flujo lumínico que emiten es escaso, por lo cual se utilizan para señalización.

Tabla 2.3.2.1. Materiales y Frecuencias de emisión típicas de los LED.

Frecuencia (nm)	Color	Material
940	Infrarrojo	GaAs
890	Infrarrojo	GaAlAs
700	Rojo profundo	GaP
660	Rojo profundo	GaAlAs
640	Rojo	AlInGaP
630	Rojo	GaAsP/GaP
626	Rojo	AlInGaP
615	Rojo – Naranja	AlInGaP
610	Naranja	GaAsP/GaP
590	Amarillo	GaAsP/GaP
590	Amarillo	AlInGaP
565	Verde	GaP
555	Verde	GaP
525	Verde	InGaN
525	Verde	GaN
505	Verde turquesa	InGaN/Zafiro
498	Verde turquesa	InGaN/Zafiro
480	Azul	SiC
450	Azul	InGaN/Zafiro
430	Azul	GaN
425	Azul	InGaN/Zafiro
370	Ultravioleta	GaN

2.3.3. LED de alta luminosidad

Las aplicaciones con LED dieron un vuelco total con la introducción de los LED de alta luminosidad. Los primeros que se fabricaron eran de nitruro de galio, el cual posibilitó la obtención de luz blanca procedente de un semiconductor. Mientras que un LED convencional es relativamente sencillo y económico, los de alta luminosidad son complejos y requieren para su fabricación una serie de procesos de elevada complejidad técnica y gran costo.

Estos LED están compuestos por múltiples capas cuánticas crecidas entre P y N dopadas de nitruro de galio (GaN), que emiten en longitudes de onda azules, verdes y rojas, y combinadas pueden formar la luz blanca.

Mientras que un LED convencional puede emitir de 3 a 5 lúmenes, el de alta intensidad puede generar 25 lúmenes o más con una superficie de 1 [mm²] y un consumo de 1 [W].

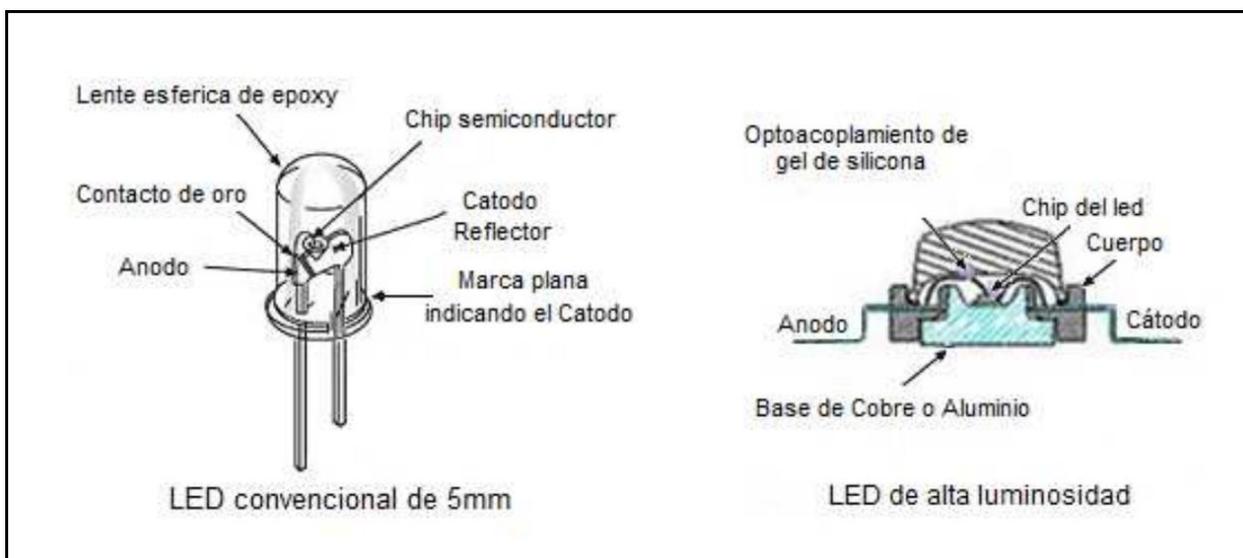


Figura 2.3.3.1. Comparación de la arquitectura de un LED convencional y un LED de alta luminosidad.

Los LED de alta luminosidad se caracterizan porque su encapsulado es transparente o levemente teñido de amarillo. Se los puede encontrar en varias formas y tamaños con una amplia gama de colores además del blanco. Entre los más utilizados se encuentran los siguientes:

- **LED de alto brillo de 5 mm:** son ampliamente utilizados por su gran versatilidad, bajo costo, práctico tamaño y reducida generación. Se utilizan para letreros dinámicos, semáforos, matrices de LED, etc. Se muestran en la Figura 2.3.3.2.

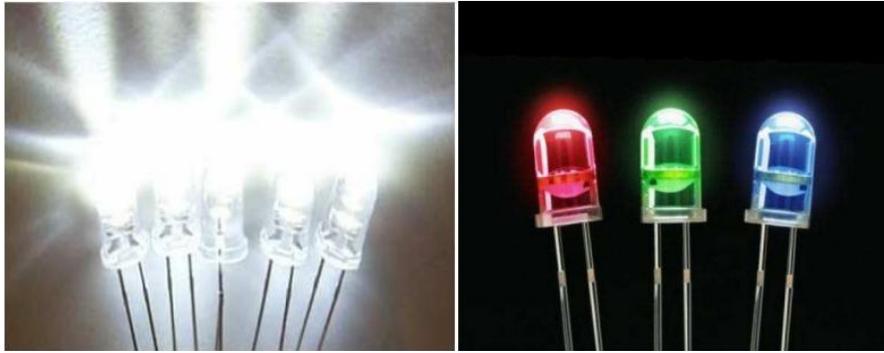


Figura 2.3.3.2. LED de alto brillo de 5 mm.

- **LED Super Flux o Tipo araña** (Figura 2.3.3.3): poseen buena disipación de calor, lo que se traduce en una gran vida útil de hasta 125.000 horas, resisten a la perfección golpes y vibraciones. Están disponibles con diferentes tipos de lentes que permiten obtener ángulos de visión desde 75° hasta 135° y una luminosidad útil de hasta 3 [cd].



Figura 2.3.3.3. LED Super Flux o Tipo Araña.

- **LED ovals:** poseen características especiales, puesto que emiten el haz de luz de manera ovalada y no circular, lo que permite incrementar el ángulo de proyección sobre el eje horizontal sin variar el ángulo de proyección sobre el eje vertical. Por este motivo son excelentes para diseñar pantallas de LED. Además, como se observa en la Figura 2.3.3.4, al poseer una lente epoxi de color difuso permiten un mayor ángulo de visibilidad.

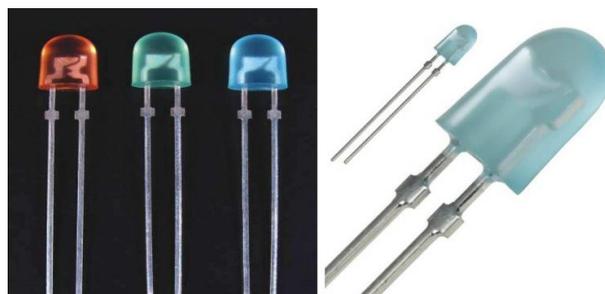


Figura 2.3.3.4. LED ovals.

- **LED de alta potencia:** Son la opción más versátil si se busca mayor intensidad lumínica por vatio de consumo. Permiten diseñar luminarias de alto brillo con una menor cantidad de LED. Los LED más utilizados son los de potencias de 1 [W], aunque actualmente existen avanzados diseños en potencias de 3, 5, 10, 12 y 30 [W]. Tienen la capacidad de disipar muy bien el calor ya que son de montaje superficial sobre disipador o heatsink como se observa en la Figura 2.3.3.5. Por este motivo pueden durar hasta 100.000 horas. También son muy resistentes a los golpes, ofrecen amplias posibilidades creativas de diseño y efectos de color, e incluyen diversas alternativas de ópticas de control del flujo luminoso.



Figura 2.3.3.5. LED de alta potencia.

- **LED RGB:** Conocido con este nombre por sus siglas en inglés, Red, Green, Blue. Es un tipo de diodo que tiene cuatro pines como se observa en la Figura 2.3.3.6, los cuáles al ser polarizados, pueden generar diferentes colores en el espectro visible. Una característica principal es que con un arreglo de diodos LED RGB se pueden generar más de dieciséis millones de colores en el espectro visible.

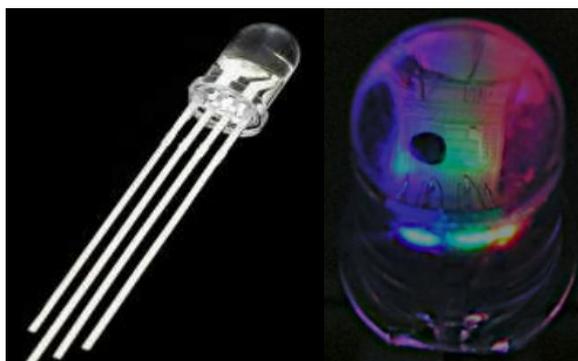


Figura 2.3.3.6. LED de alta potencia.

2.3.4. Lámparas con tecnología LED

En la actualidad se fabrican numerosos modelos de lámparas cuyo emisor es uno o varios LED. Estas se construyen de diversas potencias que varían desde 1 [W] hasta 30 [W] para uso residencial y potencias mayores para uso comercial, industrial y alumbrado público; tonalidades blanco frío, blanco cálido, y de diversos colores; ángulos de apertura del haz luminoso, concentrados para el reemplazo de lámparas dicróicas o de mayor apertura para reemplazar a las lámparas incandescentes; y diversos zócalos que permiten reemplazar a lámparas incandescentes, lámparas LFC, lámparas dicróicas, bipin, PAR 30, PAR 38, etc.

Cabe destacar que en el mercado hay disponibles lámparas LED de bajo rendimiento lumínico y bajo costo, compuestas por muchos LED de 5 [mm] de alto brillo, los cuáles consumen poca potencia (en el orden de 1 o 2 [W]), pero también brindan un flujo luminoso muy escaso; y lámparas LED de alto rendimiento lumínico, compuestas por pocos LED de alta potencia (mayores a 1[W]) y alto flujo luminoso. Estas últimas utilizan una carcasa metálica, en general de aluminio aletado, que sirve para disipar el calor generado por los LED de alta potencia, y mantener una temperatura de trabajo que asegure la vida útil de los mismos, ya que son muy sensibles a las altas temperaturas. Ambos tipos de lámparas vienen para conectar a una fuente de baja tensión alterna o continua, ó para conectar a la red alterna de 220 [V], para esto traen incorporado en su base alojado un circuito electrónico conocido como driver que acondiciona la señal alterna de entrada.



Figura 2.3.4.1. Lámparas LED de alta potencia de diversos formatos, zócalos y potencias.

2.3.5. Evolución y expectativas sobre la tecnología LED

Los primeros LED visibles comerciales se desarrollaron en 1968, y desde entonces, la tecnología ha experimentado una serie de saltos en el rendimiento y la capacidad muy importantes. Durante los primeros 25 años posteriores a la comercialización del LED, los materiales semiconductores compuestos, principalmente GaP y GaAsP, que se utilizaban permitían la fabricación de LED limitados a aplicaciones de bajos niveles de

iluminación, como lámparas indicadoras y pantallas alfanuméricas. Por otra parte los colores de emisión se limitaban a amarillo, verde, naranja y rojo.

Esta situación comenzó a cambiar a principios y mediados de 1990, cuando se desarrolló una nueva generación de materiales, lo que permitió la creación de dispositivos de alto brillo (HB-LED) que operaban en todo el espectro visible, incluidos los dispositivos de color azul y blanco.

Esta nueva tecnología, basada en InGaAlP y semiconductores compuestos InGaN, rápidamente abrió nuevos mercados para los grandes indicadores LED. Entre 1995 y 2005 el mercado de HB-LED creció a una notable tasa media anual del 42%. La mayor parte de este crecimiento del mercado se vio impulsado por la adopción de HB-LED en tres grandes áreas de aplicación: señalización, indicación con letreros y pantallas.

A medida que la tecnología mejora aún más, Figura 2.3.5.1, el rendimiento de estos dispositivos continua aumentando, Figura 2.3.5.2 [24], mientras los precios descienden. La poderosa combinación de ambos factores implica que los fabricantes se están preparando para hacer frente a su próxima gran oportunidad de mercado, el mercado de la iluminación general.

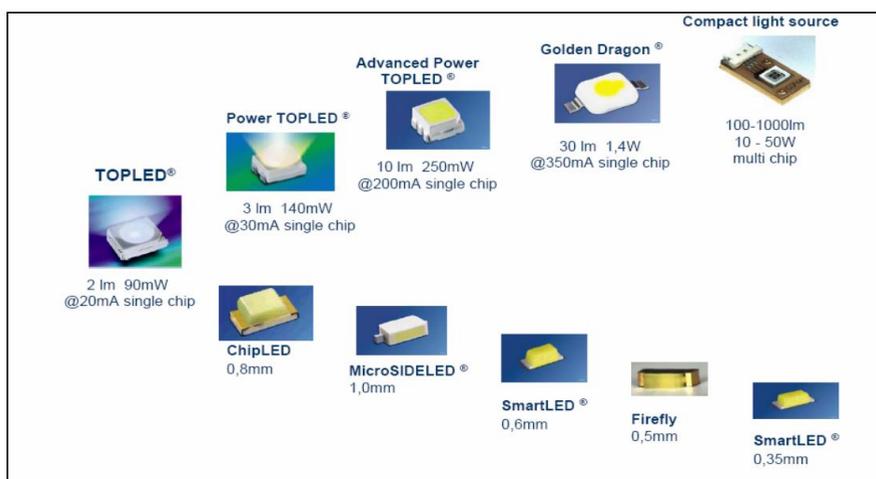


Figura 2.3.5.1. Desarrollo de la tecnología LED desde un LED estándar en dirección a aplicaciones que requieren potencia y aplicaciones que requieren miniaturización.

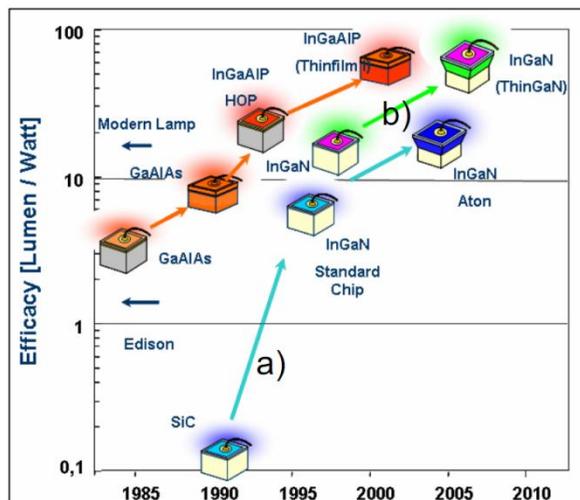


Figura 2.3.5.2. Evolución de la eficiencia lumínica [lm/W] de los chips LED InGaAlP e InGaN en los últimos 25 años.

Desde el año 2000 ha surgido un incipiente mercado de iluminación LED que aprovecha muchas ventajas de esta tecnología tales como la eficiencia energética, la gran vida útil, la gran resistencia mecánica, la versatilidad de colores, flexibilidad de diseño, ausencia de sustancias tóxicas como el mercurio, entre otras. Más recientemente los LED blancos han comenzado a aplicarse a pantallas e iluminación residencial, comercial, industrial y pública.

Afortunadamente, esta tecnología ofrece muchas ventajas con respecto a las lámparas incandescentes y fluorescentes compactas, sin embargo su implementación por parte de los consumidores residenciales en forma masiva todavía es reducida, debido fundamentalmente al elevado costo de las mismas en comparación con las recién mencionadas.

Hoy, los dos principales inconvenientes que los LED blancos tienen que superar para alcanzar adopción a gran escala, en el mercado de la iluminación general, son su gran costo en comparación con las tecnologías convencionales y la baja emisión luminosa por emisor, es decir por lámpara, puesto que a pesar de su excelente eficiencia energética, las lámparas LED de uso residencial actuales no tienen potencias suficientes para realizar todos los reemplazos en forma individual, manteniendo el mismo nivel de iluminancia. En algunos casos, para que esto suceda, se debe reemplazar una unidad convencional por dos o tres unidades LED.

Ambos problemas están siendo dirigidos por la industria del LED, y el progreso sustancial se está llevando adelante. Históricamente, el precio de la luz generada por los LED por lumen de luz emitido se ha reducido en un factor de 10 por década, mientras que la salida de luz de un único dispositivo se ha incrementado en un factor

de 20 por década. Esta tendencia se conoce como Ley Haitz¹, Figura 2.3.5.3, y se puede considerar como una analogía de la Ley de Moore, que traza el aumento de velocidad y disminución de tamaño de la microelectrónica de silicio [25].

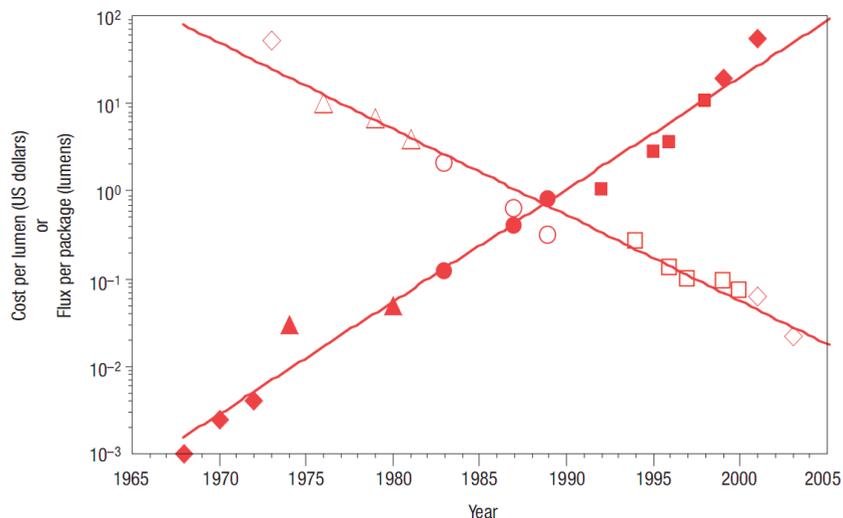


Figura 2.3.5.3. Ley Haitz. Los símbolos sin relleno denotan el costo por lumen medido en dólares, y los símbolos con relleno denotan el flujo por dispositivo LED medido en lúmenes.

A pesar de los progresos que se han dado hasta la actualidad, aún se necesitan más progresos antes de que los LED puedan ingresar en el mercado de iluminación general a gran escala.

De todos modos, a pesar de su elevado costo, por su gran eficiencia energética y larga vida útil, los LED blancos pueden tener un costo durante su ciclo de vida menor al de las tecnologías actuales, en especial en aquellas regiones como Estados Unidos y países de Europa, que tienen elevados costos de electricidad.

En general, las perspectivas para el uso de LED en iluminación son muy prometedoras, puesto que la eficiencia continua mejorando, los precios continúan descendiendo, y cientos de compañías de todo el mundo, pequeñas y grandes, desarrollan sistemas de iluminación basados en esta tecnología para hacer frente a una amplia variedad de aplicaciones.

¹ Llamada así en honor a su creador Roland Haitz, científico de Agilent Technologies que analizó este comportamiento.

CAPÍTULO 3

Introducción al análisis de armónicos en calidad de la energía

3.1. Definición de distorsión armónica

Se dice que existe distorsión armónica cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que generan las centrales eléctricas sufre deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios (Figura 3.1.1).

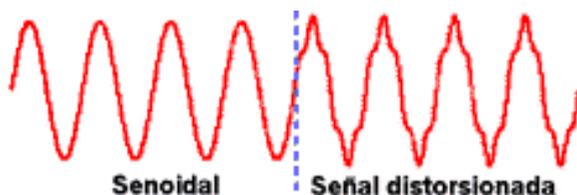


Figura 3.1.1. Deformación de la onda sinusoidal.

Para cuantificar el grado de deformación de una onda de tensión o de corriente que no es sinusoidal pura, aunque sí periódica, se recurre a su análisis en el dominio de la frecuencia. Este se lleva a cabo normalmente mediante la transformada rápida de Fourier, algoritmo de cálculo que proporciona las amplitudes y fases de los componentes armónicos de la onda deformada (Figura 3.1.2).

Teniendo en cuenta que de acuerdo a la Serie de Fourier, la onda deformada se puede descomponer en:

- La componente fundamental de la onda (50 Hz de frecuencia en nuestro país).
- Las componentes de frecuencias armónicas (múltiplos de 50 Hz), que reciben la denominación de armónicos de tensión o de corriente. Su presencia debe limitarse.

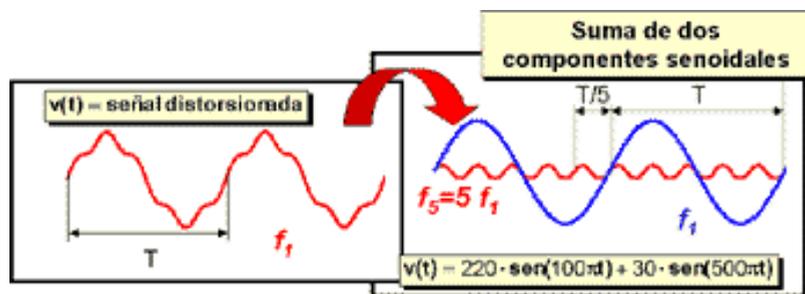


Figura 3.1.2. Descomposición por serie de Fourier.

Los componentes armónicos se definen habitualmente con tres magnitudes características:

- **Orden:** hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (50 Hz.), es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia fundamental f_1 (50 Hz.).

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (3.1.1)$$

- **Amplitud:** hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.
- **Ángulo de fase:** hace referencia al ángulo, para el cual la tensión o intensidad del armónico pasa por cero o es máxima en $t=0$, dependiendo si la función matemática que representa la señal es un seno o coseno respectivamente.

La representación de la serie de Fourier es:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} (\sin n\omega t - \varphi_n) \quad (3.1.2)$$

Donde:

Y_0 = es la componente de corriente directa, la cual es generalmente cero en sistemas eléctricos de distribución.

Y_n = valor eficaz (rms) de la componente armónica n .

φ_n = ángulo de fase de la componente armónica n cuando $t = 0$.

3.2. Definición del espectro de frecuencias de una señal

El espectro de frecuencias de una señal es una representación que permite conocer las amplitudes y ángulos de desfases relativos de cada una de las componentes sinusoidales que integran a la señal distorsionada. Se obtiene mediante la Transformada de Fourier o su aplicación digital denominada FFT ("Fast Fourier Transform"). Esta transformación se puede asimilar de forma muy simplificada a una proyección sobre un plano *amplitud - frecuencia* de las amplitudes de las distintas componentes sinusoidales que integran la señal (Figura 3.2.1).

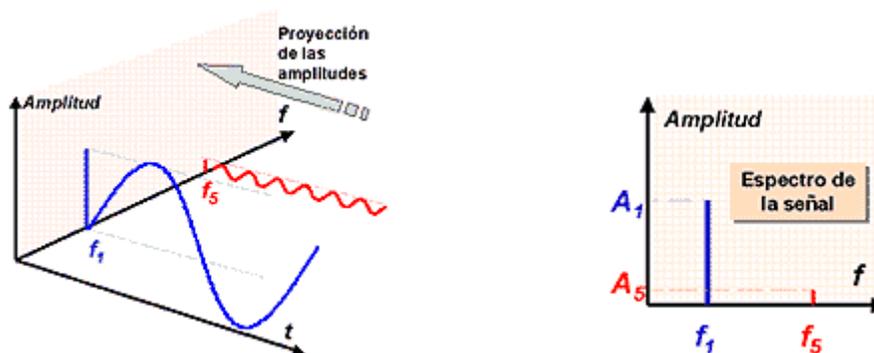


Figura 3.2.1. Espectro de frecuencias.

Un ejemplo se muestra en la Figura 3.2.2, donde se observa la forma de onda de una señal de corriente correspondiente a una lámpara LED, debajo el espectro de frecuencias para las amplitudes, y por último, el espectro de frecuencias para los ángulos de fase.

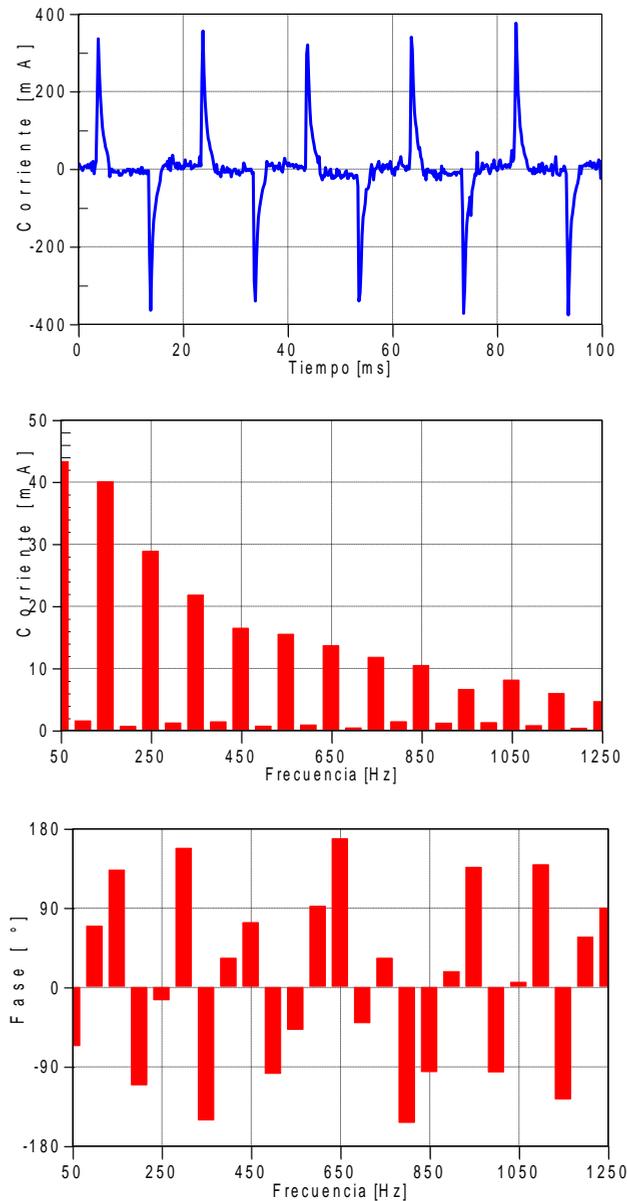


Figura 3.2.2. Ejemplo de espectro de frecuencias de amplitud y ángulo de fase para una señal distorsionada.

La cantidad de armónicos es generalmente expresada en términos de su valor eficaz (rms), dado que el efecto calorífico depende de este valor de la onda distorsionada.

Para una onda sinusoidal el valor eficaz es el máximo valor dividido por la raíz de dos. Para una onda distorsionada, bajo condiciones de estado estable, la energía disipada

por efecto Joule es la suma de las energías disipadas por cada una de las componentes armónicas:

$$RI^2t = RI_1^2t + RI_2^2t + \dots + RI_n^2t \quad (3.2.1)$$

Donde:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2 \quad (\text{Suponiendo R constante}) \quad (3.2.2)$$

3.3. Índices de evaluación

A continuación se detallan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica.

3.3.1. Índice de distorsión armónica total (THD)

Uno de los índices utilizados en la denominada distorsión armónica total citada en la literatura anglosajona es el THD (*Total Harmonic Distortion*), y es aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. El THD es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental, pero en ciertas ocasiones se expresa como porcentaje del valor eficaz total. Así para la onda de corriente será:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3.3.1.1)$$

Donde:

n = número de armónica.

I_n = valor eficaz de la armónica n .

I_1 = valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

El THD_I puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100%, como ocurre en las fuentes de potencia conmutadas y en la mayoría de las lámparas LED y LFC's.

Aunque las amplitudes de los armónicos de corriente de frecuencias elevadas pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos.

De forma similar se expresa la distorsión en la tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.3.1.2)$$

3.3.2. Factor diversidad (FD)

Las dispersiones en el ángulo de fase de los armónicos de carga individuales provocan una disminución de la corriente armónica en la red. Este efecto conocido como diversidad, se debe principalmente a la diferencia en los parámetros del sistema de distribución y a los de la propia carga.

El factor de diversidad de corriente (FD_n) se define para cualquier armónico n y un conjunto de m cargas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de la red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales, para el mismo orden de armónico.

$$FD_n = \frac{\left| \sum_{i=1}^m \vec{I}_{n(i)} \right|}{\sum_{i=1}^m I_{n(i)}} \quad (3.3.2.1)$$

Este factor varía entre 0 y 1. Un bajo valor de este índice implicará una cancelación importante para el armónico bajo análisis.

3.3.3. Factor de atenuación (FA)

La atenuación es provocada por la propia impedancia del sistema de potencia y por la correspondiente distorsión de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producida por cargas no lineales.

El factor de atenuación (FA_n) para el armónico n está definido como la magnitud de la corriente total del armónico n , cuando m cargas idénticas están conectadas en paralelo, dividida por m veces la magnitud de la corriente de una única carga:

$$FA_n = \frac{I_{n(m)}}{m \times I_{n(1)}} \quad (3.3.3.1)$$

Donde:

$I_{n(m)}$ = corriente para el armónico n con m cargas conectadas en paralelo.

$I_{n(1)}$ = corriente para el armónico n con una sola carga conectada.

3.4. Causas que originan la distorsión armónica

Se puede considerar que, en su mayor parte, los equipos y elementos que componen los sistemas de distribución de energía eléctrica son lineales. En otras palabras, que su característica de intensidad/tensión se mantiene constante.

No obstante, hay algunos equipos que tienen características no lineales, es decir, cuya intensidad demandada no es sinusoidal pura y por tanto generan una onda deformada.

Estos equipos emiten armónicos a la red general de alimentación eléctrica en el punto de conexión común (PCC) (Figura 3.4.1).

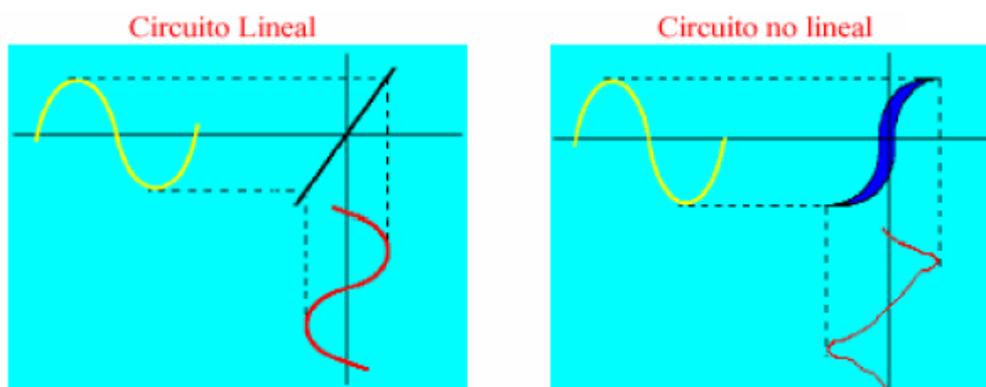


Figura 3.4.1. Cargas lineales y no lineales.

Las principales fuentes de intensidades armónicas son:

- **Receptores de uso industrial**

Entre los que se destacan:

- Los rectificadores: equipos mediante los cuales se efectúa el proceso básico de conversión de la energía eléctrica, de corriente alterna a corriente continua.
- Los hornos de inducción y los hornos de arco: las alteraciones de la onda de tensión más características de estos receptores son, además de la distorsión armónica, las fluctuaciones de tensión que, en general, producen “flicker”.

- **Receptores de uso doméstico**

No poseen una potencia unitaria elevada, pero son en conjunto una importante fuente de armónicos, ya que gran número de ellos suelen ser utilizados simultáneamente durante largos períodos de tiempo. Se destacan:

- Los receptores de televisión.
- Las computadoras personales y monitores.
- Las lámparas fluorescentes compactas.
- Las lámparas de descarga.
- Las lámparas LED.
- Todos aquellos aparatos controlados mediante elementos electrónicos.

- **Elementos de instalaciones eléctricas**

Se pueden citar:

- Los dispositivos electrónicos de control y mando que regulan la intensidad absorbida. Estos aparatos interrumpen el paso de ésta en ciertos momentos, produciendo componentes armónicas en el sistema de alimentación.
- Los equipos que poseen núcleos magnéticos. Cuando funcionan en condiciones de saturación, originan armónicos de tensión. Se encuentran, entre ellos, los transformadores de potencia, que sufren situaciones de saturación cuando las tensiones que se aplican son superiores a la nominal.

Cabe subrayar que los armónicos de tensión de una red pueden ser amplificados, incluso en puntos alejados de la carga perturbadora que los origina, si se dan condiciones de resonancia. Estas pueden aparecer en un punto determinado de la red, cuando son conectados en él condensadores para la corrección del factor de potencia.

3.5. Efectos producidos por los armónicos

Los efectos producidos por los armónicos en los componentes de los sistemas eléctricos han sido analizados tanto para circuitos particulares como para toda una red interconectada, no obstante en algunos casos es muy difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores. A continuación se presenta una explicación más detallada de los mismos.

3.5.1. Efecto en los cables y conductores

Al circular corriente continua a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, $I^2 \cdot R$, donde R es la resistencia en corriente continua del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable (manteniendo su valor eficaz (rms) igual al valor de corriente continua) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento de la resistencia efectiva del conductor, este efecto se lo conoce como efecto piel “Skin” o también como efecto pelicular (Figura 3.5.1.1).



Figura 3.5.1.1. Densidad de corriente en un conductor sometido a corriente continua o directa y a corriente alterna.

Por lo tanto, la resistencia en corriente alterna de un conductor es mayor que su valor en corriente continua y aumenta con la frecuencia, y en consecuencia, también aumentan las pérdidas por calentamiento.

A frecuencias de 50 Hz, este efecto se puede despreciar, no por que no exista, sino porque este factor se considera en la manufactura de los conductores. Sin embargo con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente.

3.5.2. Efecto en transformadores

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse y sin deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin cargas o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas $I^2 R$, pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores u otras partes de hierro. De manera individual, el efecto de las armónicas en estas pérdidas se explica a continuación:

- **Pérdidas sin carga o de núcleo:** producidas por la tensión de excitación en el núcleo. La forma de onda de tensión en el primario es considerada sinusoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de cargas no sinusoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimas.
- **Pérdidas I^2R :** si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto Skin.
- **Pérdidas por corrientes parásitas:** las corrientes parásitas son corrientes eléctricas circulantes inducidas por un campo magnético alterno en un conductor aislado. También se le conocen como corrientes de Eddy o corrientes de Foucault. Estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no sinusoidal (y por lo tanto también en su temperatura).

Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (3.5.2.1)$$

Donde:

h = orden de armónico.

I_h = corriente del armónico h , en [A].

I_R = corriente nominal en [A].

$P_{e,R}$ = pérdidas por corrientes parásitas a corriente y frecuencia nominal.

- **Pérdidas adicionales:** estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia, como se muestra en la siguiente expresión:

$$P_{AD} = P_{AD,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h \quad (3.5.2.2)$$

Donde:

$P_{AD,R}$ = pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal.

Asociado a estas pérdidas, algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente continua en la corriente de carga. Si éste es el caso, esta componente aumentará las pérdidas de núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible, por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

En el caso de transformadores conectados en triangulo-estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las componentes armónicas impares múltiplos de tres circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, y aparecerán corrientes internas que circularán dentro del triángulo que no distorsionarán la tensión primaria (caso balaceado), pero producirán sobrecalentamiento de los devanados. Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal, puesto que es posible que se sobrecalienten en forma excesiva aun cuando la potencia de la carga es menor a la nominal.

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran energía a este tipo de cargas. Además, en el caso de transformadores que operará bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a uno. Estos transformadores son aprobados por UL (Underwriter's Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no sinusoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales se pueden mencionar:

- 1) El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las componentes de tercer armónicas circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro secundario.
- 2) Se diseña el núcleo magnético con una densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado.
- 3) Se utilizan conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto Skin.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación que lo define es:

$$factorK = \sum_{h=1}^{h=h \max} (I_{h(pu)}^2) h^2 \quad (3.5.2.3)$$

Donde:

h = armónica.

$I_{h(pu)}$ = corriente armónica en **p.u.** tomando como base la corriente **I_{rms}** .

Con el valor del factor **K** de la corriente de carga, se puede escoger el transformador adecuado.

3.5.3. Efecto en interruptores (circuit breakers)

Los fusibles e interruptores térmicos operan por el calentamiento producido por el valor eficaz de la corriente, por lo que protegen de manera efectiva a los conductores de fase y al equipo contra sobrecargas por corrientes armónicas.

Los fusibles de protección pueden sufrir asimismo procesos de calentamiento o, incluso, fusión en situaciones de intensidad normal.

Los interruptores térmicos, en ocasiones, pueden actuar de manera intempestiva, es decir, sin que exista falla, como consecuencia del valor de cresta de la onda resultante o de su desfase respecto al paso por cero.

3.5.4. Efecto en las barras de neutros

Dado que este es el primer punto de unión de las cargas monofásicas, en el caso balanceado, las corrientes (fundamental y armónicas) de secuencia directa e inversa se cancelan aquí. Estas barras pueden llegar a sobrecargarse por el efecto de cancelación de las componentes armónicas de secuencia directa e inversa entre los conductores neutros de las diferentes cargas.

En el caso de corrientes armónicas de secuencia cero, componentes de frecuencia múltiplo de tres, estas no se cancelarán en el neutro aun en condiciones balanceadas, por lo que estas barras se pueden sobrecargar por el flujo de estas corrientes. En la realidad, las barras de neutros transportan corrientes de secuencia directa e inversa producidas por el desbalance de cargas más las armónicas de secuencia cero generadas por éstas. Por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales.

En el caso de que se estén alimentando cargas no lineales, es recomendable que las barras de neutros tengan una capacidad de corriente igual al doble de la de las fases. Lo mismo se recomienda para los conductores de neutro.

3.5.5. Efecto en los bancos de capacitores

El principal problema que se puede tener al instalar un banco de capacitores en circuitos que alimentan cargas no lineales, es la resonancia tanto serie como paralelo, como se muestra en la Figura 3.5.5.1. A medida que aumenta la frecuencia, la reactancia inductiva del circuito equivalente del sistema de distribución aumenta, en tanto que la reactancia capacitiva de un banco de capacitores disminuye. Existirá entonces al menos una frecuencia en las que las reactancias sean iguales, provocando la resonancia.

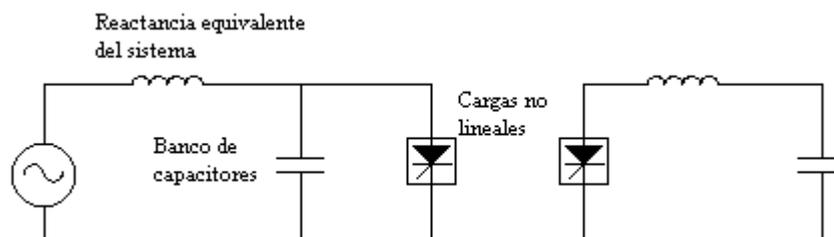
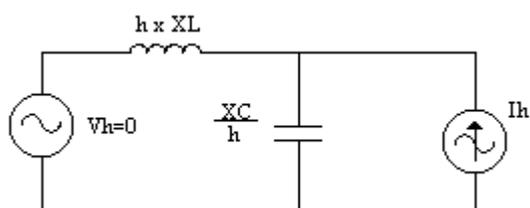


Figura 3.5.5.1. (a) Resonancia paralelo. (b) Resonancia serie.

Resonancia en paralelo

La figura 3.5.5.1. (a) muestra el circuito equivalente para el análisis de la resonancia paralelo en un sistema eléctrico. La carga no lineal inyecta al sistema corrientes armónicas, por lo que el efecto de dichas corrientes se puede analizar empleando el principio de superposición. De esta manera, el circuito equivalente a distintas frecuencias se puede representar como se muestra en la Figura 3.5.5.2.



X_L = reactancia inductiva a frecuencia fundamental.

X_C = reactancia capacitiva a frecuencia fundamental.

Figura 3.5.5.2– Circuito equivalente para el análisis del sistema a frecuencias armónicas.

En general la fuente de tensión V_h vale cero (cortocircuito), puesto que solo presenta tensión a frecuencia fundamental. Entonces a frecuencias armónicas, el circuito equivalente visto por la carga (fuente de corrientes armónicas) será una inductancia y capacitancia en paralelo. (Figura 3.5.5.2).

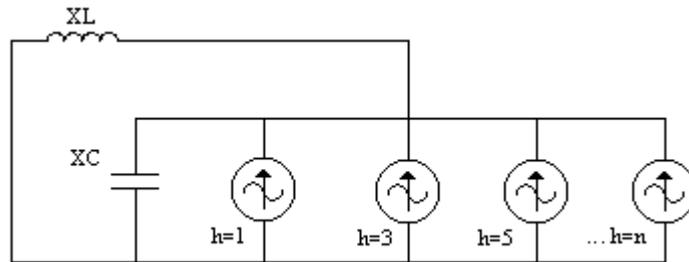


Figura 3.5.5.3- Circuito equivalente con inyección de corrientes armónicas.

La frecuencia de resonancia es:

$$f = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.5.5.1}$$

Donde:

f_1 = frecuencia fundamental.

Por ende, a una frecuencia determinada, el valor de la impedancia inductiva del sistema se hace muy elevado. La representación de la impedancia en función de la frecuencia para un sistema que presenta resonancia paralelo se muestra en la Figura 3.5.5.4., donde también se indica la impedancia del sistema sin compensar.

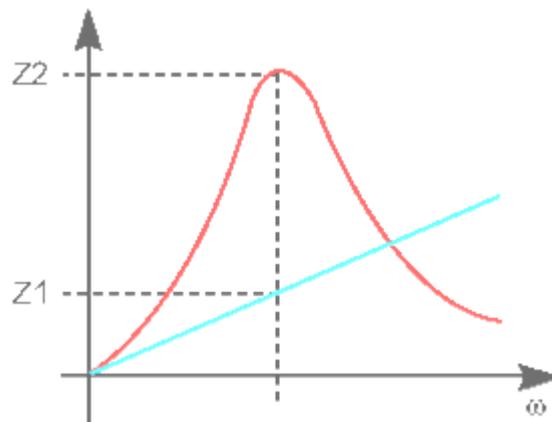


Figura 3.5.5.4. Resonancia paralelo y factor de amplificación.

Donde:

Z_1 = impedancia del sistema sin compensar.

Z_2 = impedancia del sistema con los bancos de capacitores.

La diferencia entre estos dos valores de impedancia es el factor de amplificación. La presencia de un banco de capacitores en una instalación, inclusive la propia

capacitancia a tierra de un sistema de distribución no genera armónicos, sin embargo, pueden amplificar los armónicos existentes agravando el problema.

Por otro lado, el condensador es uno de los elementos más sensibles a los armónicos ya que presenta una baja impedancia a frecuencias elevadas y adsorbe las intensidades armónicas más fácilmente que otras cargas, reduciendo considerablemente la vida de los condensadores.

Para comprobar de una forma rápida si en una red puede existir un riesgo importante de que se presente el fenómeno de la amplificación, se debe analizar lo siguiente:

- Que haya armónicos que puedan ser amplificados, es decir, que la frecuencia de resonancia paralelo del sistema coincida con un rango próximo al de los armónicos presentes en la instalación.
- La frecuencia de resonancia también se puede calcular estimativamente con la siguiente expresión:

$$f_{rp} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \quad (3.5.5.2)$$

Donde:

f_{rp} = frecuencia de resonancia paralelo.

S_{cc} = potencia de cortocircuito en el punto de conexión de los capacitores.

Q = potencia de los capacitores.

- Que el factor de amplificación tenga un valor importante.

$$FA = \frac{\sqrt{Q \times P_{cc}}}{P} \quad (3.5.5.3.)$$

Donde:

FA = factor de amplificación.

P_{cc} = potencia de cortocircuito en el punto de conexión de los bancos.

Q = potencia de los capacitores (kVAr).

P = potencia activa de la instalación (kW).

Resonancia serie

La resonancia serie aparece con la conexión serie de una reactancia inductiva y una capacitiva como se muestra en la figura 3.5.5.1. (b). Existirá una determinada frecuencia que hará cero la impedancia del conjunto L-C serie.

Bajo condiciones de resonancia en serie, el sistema ofrece una impedancia muy baja a tensiones armónicas de frecuencia igual a la de resonancia. Por tanto, tensiones armónicas pequeñas en el sistema pueden originar corrientes armónicas elevadas en los equipos.

Este fenómeno es utilizado para filtrar armónicos en una instalación.

3.5.6. Efecto en los motores de inducción

Fundamentalmente, las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna: un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado. A continuación se mostrará un estudio simplificado de estos efectos:

- 1) **Pérdidas en los motores de inducción:** si la tensión que se aplica a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces se incrementan sus pérdidas I^2R en el rotor y el estator, las pérdidas en el hierro (histéresis y Foucault) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas de fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas.
 - **Pérdidas I^2R en el estator:** las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia en corriente continua de la máquina, corregida a la temperatura de trabajo. Al operar la máquina de inducción con tensión distorsionada, no solo aumentarán estas pérdidas por el efecto Skin que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R .
 - **Pérdidas I^2R en el rotor:** éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción, que se basa en el aprovechamiento del efecto Skin para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.
 - **Pérdidas en el hierro:** estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Éstas aumentan con excitación de tensión no sinusoidal puesto que se tiene densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente y son más difíciles de cuantificar.

- **Pérdidas adicionales:** son muy difíciles de cuantificar aún bajo condiciones de tensión sinusoidal. Al aplicar tensiones no sinusoidales, éstas aumentan en forma particular para cada máquina.

2) Torque en el motor de inducción: las armónicas de secuencia directa producen en el motor de inducción un torque en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de secuencia inversa tiene el efecto opuesto. En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las componentes de tercer armónico es igual a cero. Dependiendo del contenido armónico de tensión aplicado, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente, sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia inversa se cancela con el efecto de las de secuencia directa, por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resultan torques pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto cuando las cargas de los motores son sensibles a estas variaciones. Estos torques pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica, lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar fatiga en el eje y otras partes mecánicas conectadas. Aunque por lo general la magnitud de estos torques es generalmente pequeña y su valor promedio es prácticamente cero.

3.5.7. Efecto en otros equipos

Equipos electrónicos sensibles son susceptibles a operación incorrecta a causa de las armónicas. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero de la tensión u otros aspectos de la forma de onda de la misma, por lo que condiciones de distorsión puede afectar su operación adecuada.

En lo que respecta a equipos de medición e instrumentación, estos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tiene condiciones de resonancia que causen altas tensiones armónicas en los circuitos, o si el factor de cresta es elevado, ya que los picos de tensión o corriente pueden saturar los núcleos magnéticos de ciertos instrumentos. Para el caso de medidores se puede tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

3.6. Métodos para disminuir el efecto de los armónicos

Usualmente la solución al problema de armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, los aparatos que crean armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga, eliminar su uso no es posible, modificar esos equipos para que no causen armónicos a veces no es factible. Una opción es reducir los síntomas ya sea incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, atrapar, o atenuar los armónicos con filtros. Por supuesto hay excepciones. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, similarmente un aparato o equipo particular que produce un alto nivel de armónicos debe ser modificado o reemplazado.

El primer paso que se recomienda en cualquier investigación sobre el problema de armónicas es inspeccionar el equipo y el circuito eléctrico. Estos problemas son causados o empeorados por cargas desbalanceadas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor neutro, por problemas con equipo o por uso inapropiado. Esto puede ser identificado con una inspección cuidadosa con equipo apropiado.

Desde el punto de vista de sobretensiones transitorias y armónicas, disminuyendo la impedancia a tierra e incrementando la capacidad del neutro con frecuencia se resuelven problemas de calidad de la energía (incluyendo armónicas). Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% de los problemas relacionados con la calidad de energía.

A continuación se hace referencia a algunos aspectos importantes relacionados con la utilización de los filtros.

Filtros

Los filtros se utilizan para bloquear o atenuar la energía de los armónicos de tal manera que no fluyan por los equipos o que no ingresen al sistema.

Cualquier combinación de elementos pasivos (R, L y C) diseñados para dejar pasar una serie de frecuencias se denominan un filtro. Los filtros son usados para dejar pasar solamente las frecuencias que pudieran resultar ser de alguna utilidad y eliminar cualquier tipo de interferencia o ruido ajeno a ellas.

Existen dos tipos de filtros:

- **Filtros Pasivos:** son aquellos tipos de filtros formados por combinaciones serie o paralelo de elementos R, L o C.
- **Filtros Activos:** son aquellos que emplean dispositivos activos, por ejemplo transistores o amplificadores operacionales, junto con elementos R L C.

3.6.1. Filtros Pasivos

Los filtros pasivos son los más simples, más económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicos. Son elementos puramente pasivos, usados como circuitos en paralelo en la entrada de los servicios con problemas de generación de armónicos, evitando de esta manera, que entren al sistema de distribución. También los filtros pueden instalarse directamente en un equipo particular donde existe un grave problema de generación de armónicos, evitando por consiguiente, que circulen en la propia instalación eléctrica del usuario.

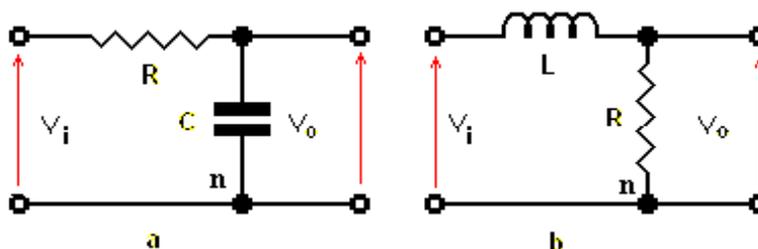
Los filtros pasivos son sensibles a la impedancia del sistema para los cuales fueron ajustados, y la impedancia del sistema puede cambiar a lo largo del tiempo, siendo necesario ajustarlos. Los filtros pasivos, si bien en algunos casos pueden brindar resultados favorables, no siempre proporcionan un comportamiento satisfactorio, y bajo ciertas circunstancias pueden causar problemas de resonancia sobre el sistema donde están conectados.

En general se tienen los siguientes tipos de filtros:

- 1) Filtros pasa bajos
- 2) Filtros pasa altos.
- 3) Filtros pasa banda.
- 4) Filtros eliminadores de banda.

1) Filtro pasa bajos

Su funcionamiento es a base de un capacitor y resistencia, este filtro tiene la siguiente configuración (Figuras 3.6.1.1-a y -b).



Figuras 3.6.1.1-a y -b. Filtros pasa bajos.

El capacitor se comporta como una resistencia dependiente de la frecuencia por la relación:

$$X_c = \frac{1}{C(2\pi)f} \quad (3.6.1.1)$$

La impedancia del capacitor Z_c es grande para bajas frecuencias, entonces V_i pasa hacia V_o con poca atenuación. Por el contrario, Z_c es pequeña para frecuencias altas, así las frecuencias altas son efectivamente bloqueadas en la salida. Lo que ocurre es que la señal de alta frecuencia es cortocircuitada a tierra (el punto n) por el capacitor. (La división entre dominios de alta y baja frecuencia ocurre aproximadamente alrededor de $\omega = 1/RC$).

Para cualquier frecuencia se puede determinar la salida:

$$V_o = \frac{Z_c}{Z_R + Z_c} \times V_i \Rightarrow V_o = \frac{X_c \angle -90^\circ}{R - jX_c} \times V_i \quad (3.6.1.2)$$

O para expresarlo en magnitud y en fase:

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{X_c \angle -90^\circ}{R - jX_c} \quad (3.6.1.3)$$

Separando en magnitud y fase:

$$H = \frac{X_c \angle -90^\circ}{\sqrt{R^2 + X_c^2} \angle -\tan^{-1}(X_c/R)} \quad (3.6.1.4)$$

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} (\angle -90^\circ + \tan^{-1}(X_c/R)) \quad (3.6.1.5)$$

Entonces la magnitud queda expresada como:

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad (3.6.1.6)$$

A un ángulo de fase:

$$\theta = \angle(-90^\circ + \tan^{-1}(X_c/R)) = -\tan^{-1}(X_c/R) \quad (3.6.1.7)$$

La frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{RC2\pi} \quad (3.6.1.8)$$

La representación gráfica de la transferencia del sistema en función de la frecuencia queda representada en la Figura 19.

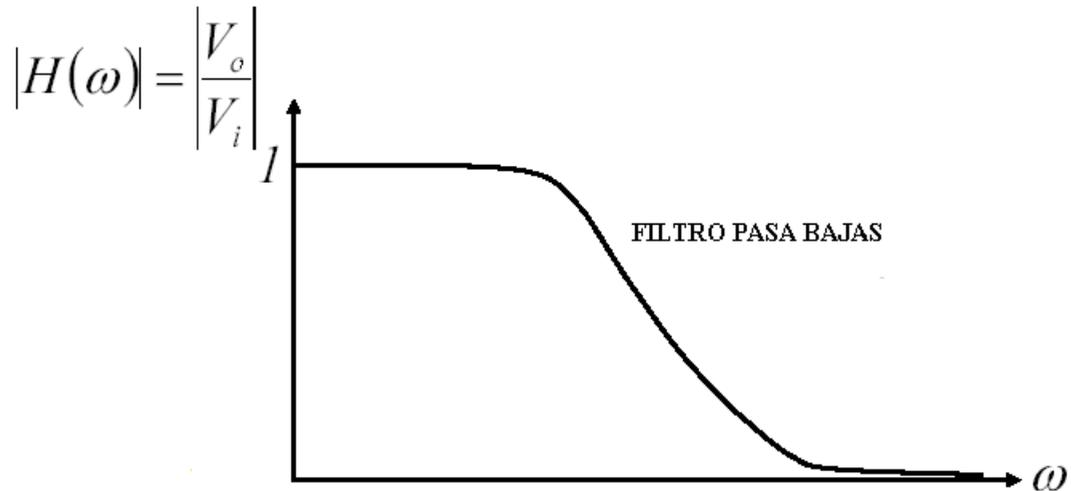
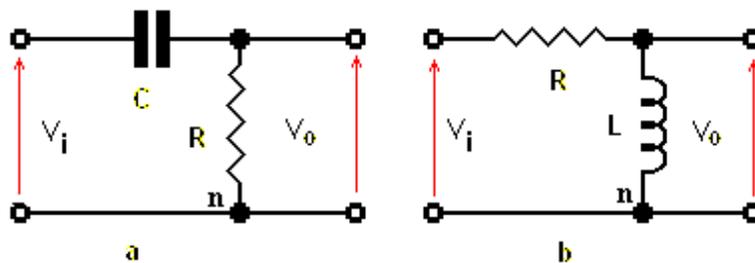


Figura 3.6.1.2. Transferencia del sistema en función de la frecuencia.

2) Filtro pasa altos

Este es el segundo de los filtros pasivos, el único cambio que presenta es la conexión de la salida, la cual en lugar de tomarse del capacitor se toma de la resistencia (Figura 3.6.1.3-a y -b) lo cual provoca que en lugar de dejar “pasar” las frecuencias bajas pasen las frecuencias altas.



Figuras 3.6.1.3-a y -b. Filtros pasa altos.

Cuando la frecuencia es demasiado baja, la impedancia del capacitor Z_c es muy grande, produciendo que V_i caiga casi en su totalidad en el capacitor, por lo que en la salida prácticamente no se tiene tensión. Cuando la frecuencia aplicada aumenta, provoca que el valor de la impedancia que representa al capacitor Z_c disminuya, lo cual no genera una caída de tensión en la misma y por lo tanto $V_i \approx V_o$.

Estos dos filtros tienen un valor llamado frecuencia de corte, valor de la frecuencia a partir del cual se considera que filtra las señales. Esta frecuencia está determinada como la frecuencia en la que el valor de la salida con respecto a la entrada tiene una atenuación de -3dB. Dependiendo de los valores elegidos de resistencia y capacitancia

será el valor de la frecuencia de corte, pero para una resistencia fija, el valor de la frecuencia de corte depende del valor del capacitor.

Siguiendo un procedimiento similar al anterior obtenemos que para el filtro pasa altos:

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \tag{3.6.1.9}$$

$$f_c = \frac{1}{RC2\pi} \tag{3.6.1.10}$$

La representación gráfica de la transferencia del sistema en función de la frecuencia se muestra en la Figura 3.6.1.4.

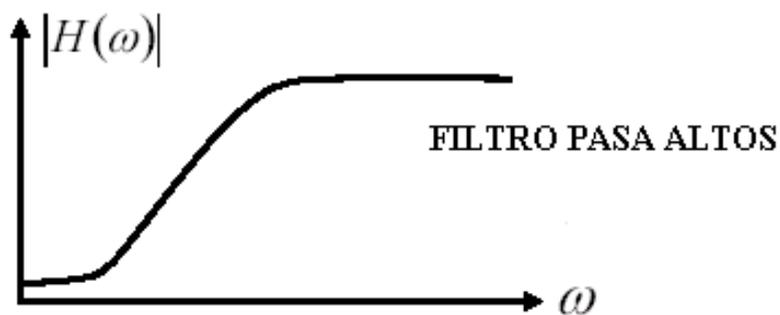
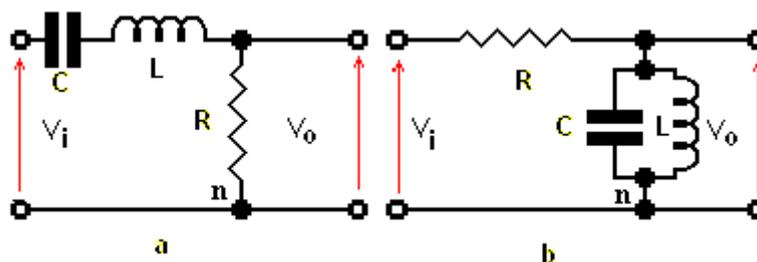


Figura 3.6.1.4. Transferencia del sistema en función de la frecuencia.

3) Filtro pasa banda

Este es un filtro que se compone de un filtro pasa bajos y uno pasa altos conectados en cascada (Figura 3.6.1.5-a y -b), permitiendo el paso de un rango determinado de frecuencias y no permitiendo el paso de frecuencias superiores o inferiores a dicho rango.

Los componentes se deben seleccionar para que la frecuencia de corte del filtro pasa altos sea menor que la del filtro pasa bajos.



Figuras 3.6.1.5 –a y –b. Filtro pasa banda.

Las frecuencias de corte se pueden calcular con las ecuaciones anteriores.

La salida queda determinada como:

$$V_o = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C + Z_L} \times V_i \quad (3.6.1.11)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega RC}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \quad (3.6.1.12)$$

Entonces:

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{\omega RC}{\sqrt{(-\omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} \quad (3.6.1.13)$$

La característica más importante de este circuito es el ancho de banda que permite pasar, siendo este igual a la resta de las frecuencias de corte de ambos filtros.

La representación gráfica de la transferencia del sistema en función de la frecuencia se muestra en la Figura 4.6.1.6.

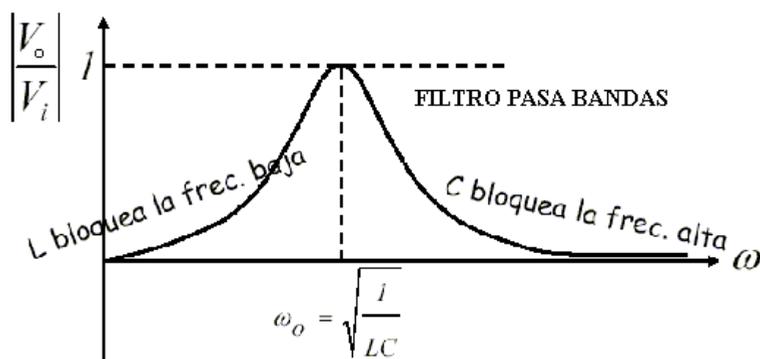
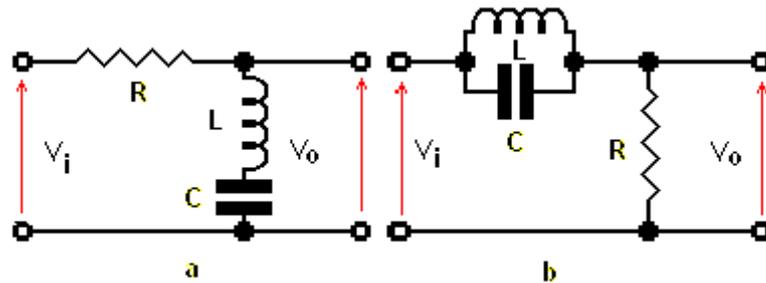


Figura 3.6.1.6. Transferencia del sistema en función de la frecuencia.

4) Filtro eliminador de banda

Por último, en las Figuras 3.6.1.7 –a y -b se muestran los ejemplos de filtros eliminadores de banda, denominados también rechazadores de banda, atrapa banda, trampas de banda, recortadores de banda o bien, filtros supresores de banda. Estos se encargan de atenuar un rango determinado de frecuencias, permitiendo el paso de frecuencias más altas o más bajas (función contraria al filtro pasa banda).



Figuras 3.6.1.7 –a y –b. Filtros eliminadores de bandas.

La salida queda determinada como:

$$V_o = \frac{Z_C + Z_L}{Z_R + Z_C + Z_L} \times V_i \tag{3.6.1.14}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{1 - \omega^2 LC}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \Rightarrow \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1 - \omega^2 LC}{\sqrt{(-\omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} \tag{3.6.1.15}$$

La representación gráfica de la transferencia del sistema en función de la frecuencia se muestra en la Figura 3.6.1.8.

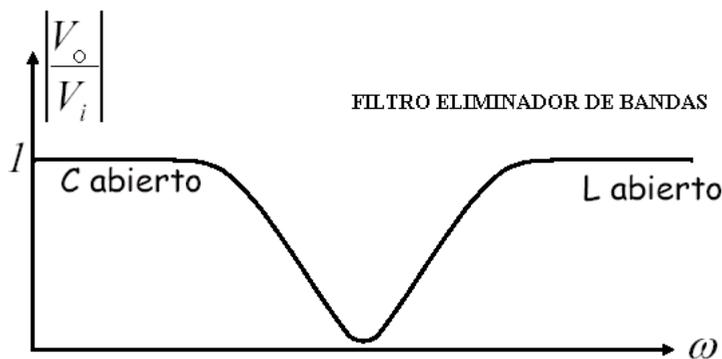


Figura 3.6.1.8. Transferencia del sistema en función de la frecuencia.

3.6.2. Filtros Activos

Una desventaja de los filtros pasivos es que los componentes que los forman consumen o absorben parte de la energía de la señal que deben de dejar pasar. Con filtros activos de potencia (FAP), esta desventaja se corrige.

Dichos filtros trabajan conectados en paralelo para producir corrientes armónicas iguales a las que se encuentran en la corriente de carga. Mediante los algoritmos de control apropiados, actúan como fuentes de corriente o de tensión, cancelando de forma instantánea los armónicos de ambos tipos, y evitando que estos ingresen al sistema de distribución (Figura 3.6.2.1). La reducción de las armónicas depende solo de la medición armónica correcta que se está generando en la carga y no es función de la impedancia del sistema. Estos filtros han tenido una mayor aplicación, aunque tienen la desventaja de ser más caros y de que consumen potencia en cantidades significativas, creando en algunos casos, niveles altos de interferencia electromagnética.

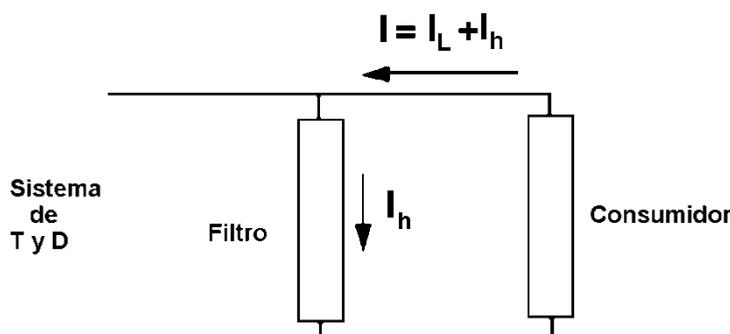


Figura 3.6.2.1. Conexión del filtro activo.

Ambos filtros (activos y pasivos) desvían las corrientes armónicas I_h por una trayectoria para eliminarlas del sistema, con esto se deja que solo la corriente de carga fluya al sistema. Los filtros pasivos proporcionan una impedancia muy baja en la trayectoria en paralelo, mientras que los activos originan que la corriente armónica fluya con una corriente que ellos mismos generan, esencialmente forzándola por su trayectoria.

Los FAP además de la función de eliminación de armónicos, también se les dota de otras funciones, como son la compensación total o parcial de energía reactiva, el equilibrado de corrientes de fases y la cancelación de la corriente de neutro.

Una posible clasificación de los FAP, según su topología y modo de inserción en la red eléctrica, es la siguiente:

- 1) Conexión paralelo o shunt.
- 2) Conexión serie.
- 3) Conexión serie paralelo.
- 4) Filtrado híbrido.

1) Conexión paralelo o shunt

Es la estructura más conocida y permite además de la cancelación de armónicos, hacer corrección del factor de potencia, equilibrar las corrientes de línea en el caso de conexión de cargas desequilibradas y cancelar la corriente de neutro de la red, en los casos de redes con neutro.

El FAP se sitúa en paralelo con la carga generadora de armónicos en el punto de conexión común de la carga (PCC) como muestra la Figura 3.6.2.2. El principio de funcionamiento consiste en inyectar a la red, en este punto, las corrientes armónicas generadas en la carga en oposición de fase, de modo que queden absolutamente anuladas por suma de corrientes en el nudo formado.

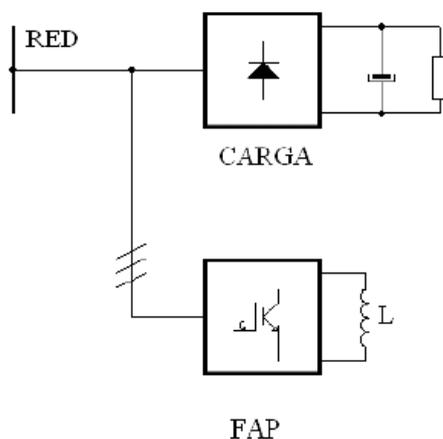


Figura 3.6.2.2. Filtrado activo paralelo con fuente de corriente.

Pero la estructura más utilizada es la basada en un convertidor de tensión, que trabaja en modo de control por corriente, en donde la energía se almacena en un condensador situado en el lado de c.c. del convertidor (Figura 3.6.2.3).

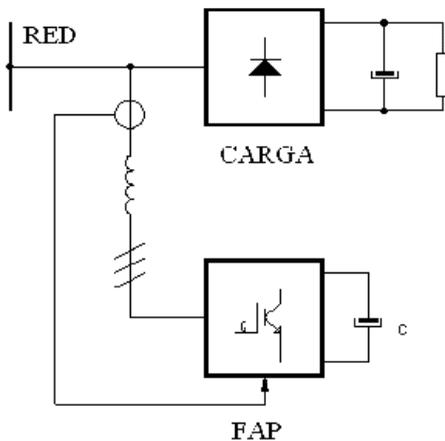


Figura 3.6.2.3 Filtrado activo paralelo con fuente de tensión.

La filosofía de la cancelación sigue siendo la de inyección de corriente en paralelo y en contrafase con los armónicos presentes en la carga, por lo tanto, el método es conceptualmente idéntico al anterior.

2) Conexión serie

El filtro activo (Figura 3.6.2.4) se sitúa en serie entre la red y la carga, aportando la tensión necesaria para que la corriente por la línea esté desprovista de armónicos. En realidad el sistema actúa como una impedancia variable, cuyo valor es idealmente nulo para la componente fundamental de corriente e infinita para todas las demás componentes.

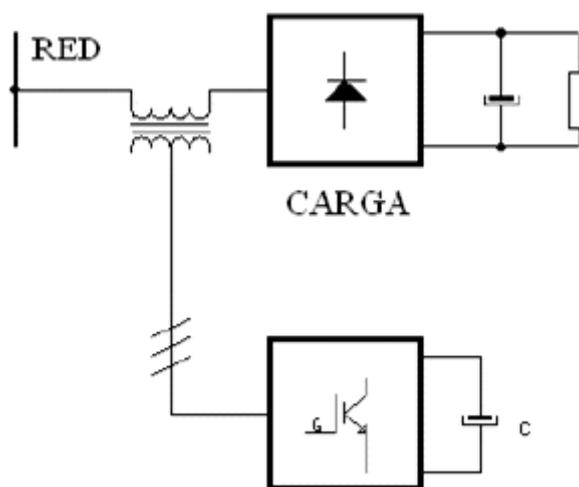


Figura 3.6.2.4. Filtro activo serie.

Se debe destacar que el convertidor está actuando como fuente de tensión, aportando el valor necesario para conseguir la impedancia deseada según el contenido de armónicos de la carga.

Esta topología no es la más utilizada, y en todo caso se acompaña normalmente de un sistema de filtrado pasivo complementario.

3) Conexión serie paralelo

Esta topología (Figura 3.6.2.5) es una combinación de los dos filtros anteriores, en donde el filtro paralelo cancela los armónicos de corriente y puede hacer compensación de energía reactiva, mientras que el serie hace la función de desacople respecto a la red y puede realizar otras funciones, como regulación de tensión, compensación de flicker y equilibrado de fases en el punto de conexión a la red.

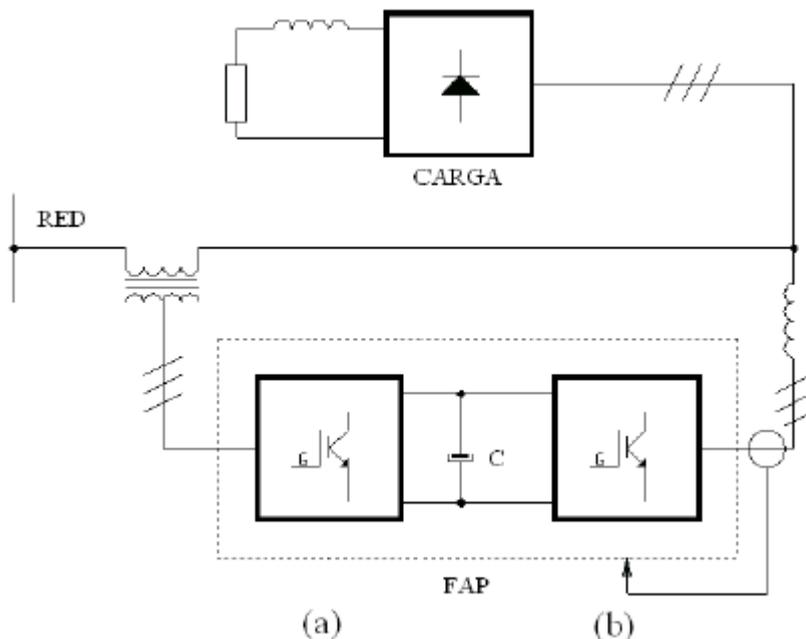


Figura 3.6.2.6. Filtro activo serie-paralelo.

4) Filtrado híbrido

El filtrado híbrido consta de un sistema de filtrado pasivo convencional apoyado por un activo situado en diferentes posiciones en relación al primero. Esta combinación optimiza el sistema de cancelación pasiva, evita los problemas de resonancias entre los componentes del filtro pasivo y la impedancia de línea, y permite potencias de filtrado elevadas a un costo inferior al del filtrado activo puro.

El conexionado del filtro híbrido se ilustra en la siguiente figura 3.6.2.7:

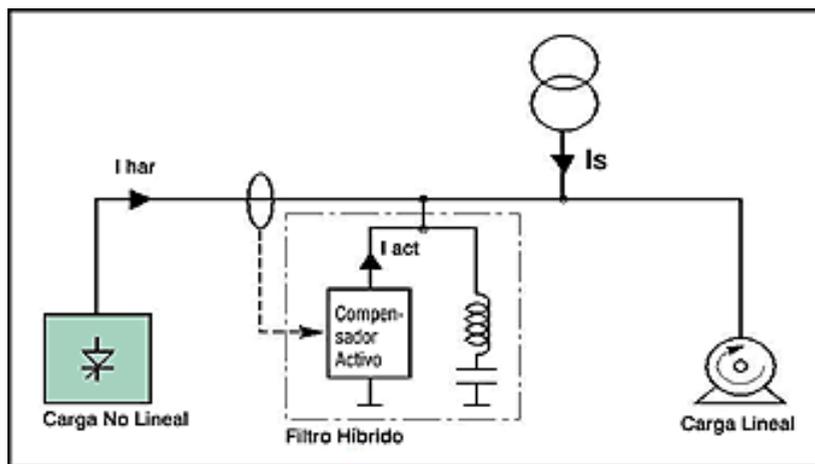


Figura 3.6.2.7. Conexionado del filtro híbrido.

CAPÍTULO 4

Legislación

4.1. Resumen

En el presente capítulo se presenta una revisión de las normas y regulaciones en aspectos eléctricos y electromagnéticos, publicadas por distintos organismos internacionales y adaptadas a nuestro país por el ente nacional.

A continuación se listan las normas vigentes en la actualidad y se desarrolla su contenido en las siguientes secciones del presente capítulo:

- **Normas IEC**

Son normas europeas creadas por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), más conocida por su sigla en inglés International Electrotechnical Commission (IEC).

Para el análisis de cargas residenciales realizado en este trabajo se destaca la Norma **IEC 61000-3-2**, Compatibilidad Electromagnética (CEM)- Parte 3: Límites- Sección 6: “Límites para emisiones de corrientes armónicas de equipos con corriente nominal de entrada menor o igual a 16 [A] por fase”, la cual establece límites de emisión a 230 [V] – 50 [Hz] para diversos equipos clasificados por clase, entre los que se incluyen los equipos trifásicos equilibrados, equipos portátiles, equipos de iluminación, computadoras, monitores y televisores; y la Norma **IEC 61000-3-6**, Compatibilidad Electromagnética (CEM)- Parte 3: Límites- Sección 6: “Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión”, la cual establece límites de distorsión armónica en redes de MT y AT.

La Norma IEC fue aprobada por el Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica (CENELEC) como Norma Europea EN 61000-3-2.

- **Normas ANSI/IEEE**

Son normas estadounidenses creadas por el Instituto Nacional Americano de Normas, más conocido por sus siglas en inglés American National Standards Institute (ANSI), y por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) que no especifican ningún límite de emisión para equipos. La Norma **IEEE 519-1992** “Prácticas y Requerimientos Recomendados para Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia” solo provee las pautas para inyecciones permisibles de corrientes armónicas de usuarios individuales en los sistemas de potencia.

- **Normas nacionales**

En nuestro país, el marco legal está conformado por la Ley de Energía Eléctrica 24065/92, el Decreto Reglamentario 1398/92 y las Resoluciones del Ente Nacional Regulador de la Electricidad (**ENRE**) 99/97 y 184/00.

Los límites de emisión establecidos en varios países de América Latina, incluido el nuestro, para consumidores conectados en baja tensión o con demandas de potencia menores a 10 [kW], parecen ser el producto de una adaptación de la Norma 61000-3-2. [26]

4.2. Norma IEC 61000-3-2

La marca Comisión Europea (CE) incluye entre otros, la homologación de equipos con las normas de la Directiva Europea de Compatibilidad Electromagnética (CEM). Desde el año 2001 todo el equipamiento eléctrico y electrónico cuya corriente nominal de entrada sea igual o menor a 16 [A] por fase que esté conectado a redes públicas de distribución de baja tensión debe cumplir con la Norma IEC/EN 61000-3-2, la cual especifica niveles límites de emisión de corrientes armónicas para equipos individuales. El objetivo de los niveles de emisión de corrientes armónicas es cumplir con los niveles de compatibilidad y planificación asociados a la tensión armónica. La última versión de esta norma es del año 2006.

Según esta norma se denomina red pública de distribución de baja tensión a aquella en la que más de un consumidor independiente puede tomar energía de esta.

Esta Norma no se aplica a (y no tiene límites para):

- Redes no públicas.
- Equipamiento que no sea de iluminación cuya potencia nominal sea menor o igual a 75 [W].
- Equipamiento para tensiones nominales alternas menores de 230 [V].
- Equipamiento de soldadura por arco destinado a uso profesional.
- Equipamiento profesional (no destinado a público en general) con potencia nominal mayor a 1 [Kw].
- Elementos de calefacción con métodos de control simétricos y potencia de entrada menor o igual a 200 [W].
- Atenuadores independientes (dimmers) para lámparas incandescentes con potencia nominal menor o igual a 1 [kW].

Clasificación y límites

Esta norma clasifica a los diferentes equipos en cuatro clases (Figura 4.2.1) que tienen valores límites diferentes. Estos límites son para armónicos individuales de corriente, y no se especifica una distorsión armónica total THDi%.

- **Clase A:**
 - Equipamiento trifásico balanceado.
 - Electrodomésticos excluidos del equipamiento identificado como clase D.
 - Herramientas.
 - Herramientas portátiles excluidas.
 - Atenuadores (dimmers) para lámparas incandescentes de potencia mayor a 1[kW].
 - Equipamiento de audio.
 - Todo otro equipamiento, excepto aquellos declarados en una de las siguientes clases.

- **Clase B:**
 - Herramientas portátiles.
 - Equipamiento de soldadura por arco que no sea equipamiento profesional.

- **Clase C:**
 - Equipamiento de iluminación.

- **Clase D:**
 - Computadoras Personales (PCs), monitores de PCs, radios o receptores de TV cuya potencia sea inferior o igual a 600 [W].

Los límites para equipamiento clase A se muestran en la Tabla 4.2.1.

Para equipamiento Clase B se deben multiplicar los límites de la Tabla 1 por un factor de 1.5. La Tabla 4.2.1 hace referencia a valores fijos para corrientes armónicas de orden 2 a 40.

Para equipamiento Clase C que tiene una potencia activa superior a 25 [W] los límites están dados en la Tabla 4.2.2. Las corrientes armónicas máximas permisibles están dadas como porcentaje de la corriente fundamental.

Para equipamiento Clase C con una potencia activa menor o igual a 25 [W] se aplica la columna 2 de la Tabla 4.2.3 o la tercera armónica no excederá el 86% y la quinta armónica no excederá el 61% de la corriente fundamental.

Para equipamiento Clase D los límites se muestran en la Tabla 4.2.3 como una relación de corriente por unidad de potencia con un valor máximo permisible igual al de la Tabla 4.2.1, dado en la tercera columna.

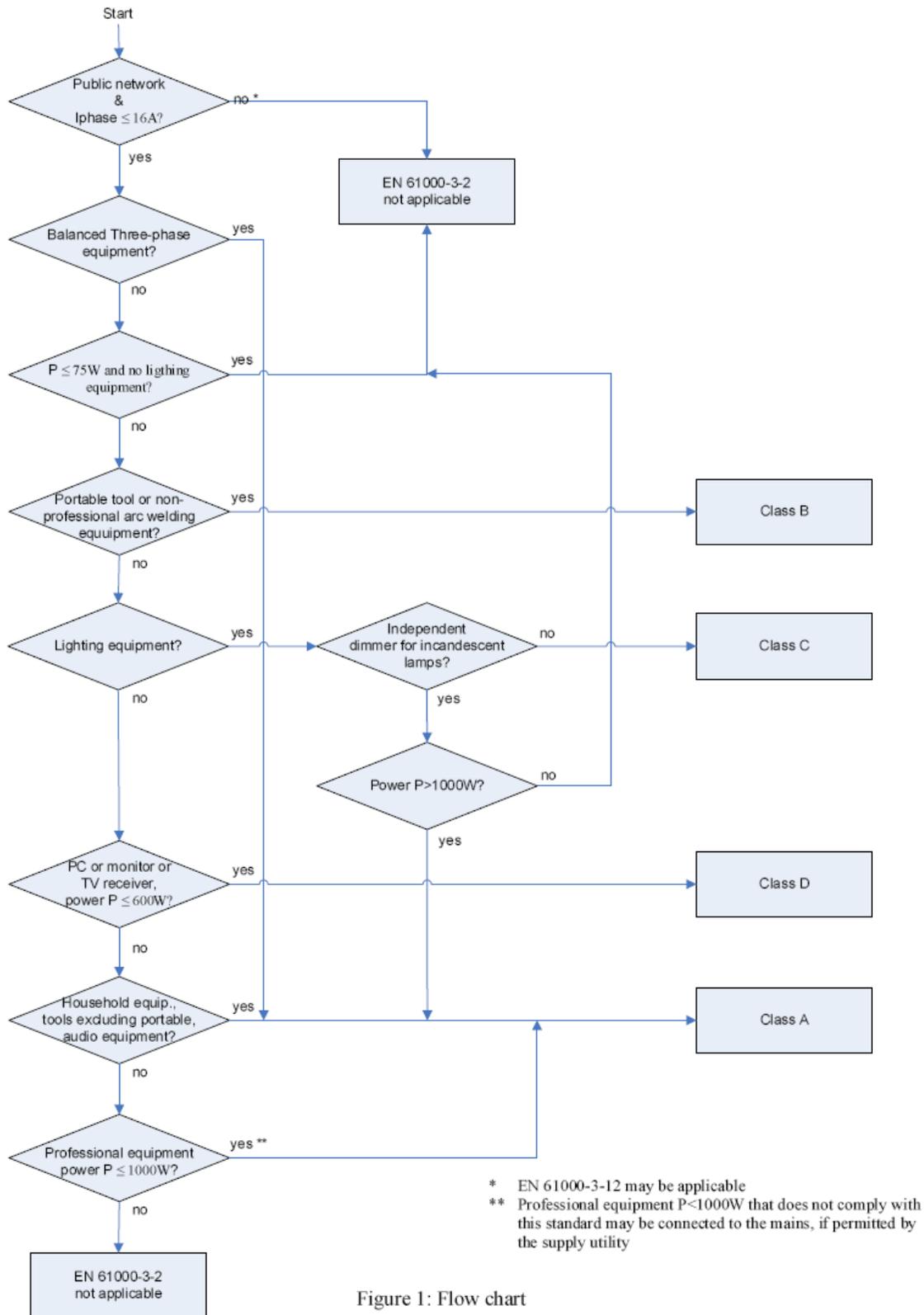


Figure 1: Flow chart

Figura 4.2.1. Diagrama de flujo utilizado para clasificar los tipos de equipos de acuerdo a la Norma IEC 61000-3-2.

Tabla 4.2.1. Límites para equipamiento Clase A.

Orden de armónico N	Corriente armónica máxima permisible [A]
Armónicos impares	
3	2.3
5	1.4
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 * 8/n$
Armónicos pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.22 * 8/n$

Tabla 4.2.2. Límites para equipamiento Clase C.

Orden de armónico N	Corriente armónica máxima permisible expresada como porcentaje de la corriente fundamental %
2	2
3	$30 * \lambda *$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3
* λ es el factor de potencia del circuito	

Tabla 4.2.3. Límites para equipamiento Clase D.

Orden de armónico n	Corriente armónica máxima permisible por watt [mA/W]	Corriente armónica máxima permisible [A]
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
$13 \leq n \leq 39$ (solo armónicos impares)	$3.85/n$	Ver Tabla 4.2.1

4.3. Norma IEC 61000-3-6

Esta norma especifica niveles de compatibilidad electromagnética de tensión armónica. Para la tensión del sistema utiliza los siguientes términos:

- Baja Tensión (BT) se refiere a $V_n \leq 1$ [kV]
- Media Tensión (MT) se refiere a 1 [kV] $< V_n \leq 35$ [kV]
- Alta Tensión (AT) se refiere a 35 [kV] $< V_n \leq 230$ [kV]
- Extra Alta Tensión (EAT) se refiere a $230 < V_n$

Los Niveles de Compatibilidad son valores de referencia para coordinar la emisión e inmunidad del equipo que es parte de, o alimentado por, una red de suministro, con el propósito de garantizar la CEM del sistema completo (incluyendo la red y los equipos conectados). Los niveles de compatibilidad generalmente están basados en niveles de probabilidad del 95% de sistemas completos con un periodo mínimo de evaluación de una semana.

Los Niveles de Planificación son utilizados en la evaluación del impacto de las cargas de todos los consumidores sobre el sistema de suministro. Estos niveles son especificados por las distribuidoras para todos los niveles de tensión del sistema y se pueden considerar como objetivos internos de calidad.

En la Tabla 4.3.1 se muestran los límites de compatibilidad electromagnética para los cuatro niveles de tensión armónica.

La Tabla 4.3.2 representa el único caso de límites específicos de emisión de corrientes armónicas que aparece en la Norma IEC 61000-3-6. Esta tabla da un ejemplo de límites apropiados. Se aplica a un cliente con potencia contratada $S_i < 1$ [MVA] y relación de cortocircuito $r_{SC} > 100$. Para sistemas de potencia en MT y AT, en esta norma solo se establece que los niveles de emisión de corrientes armónicas de los consumidores deben ser compatibles con los niveles de compatibilidad y/o planificación. A excepción de la tabla 4.3.2. esta norma no establece niveles específicos de corriente.

Tabla 4.3.1. Niveles de Compatibilidad IEC 61000-3-6 para tensión armónica (en porcentaje de la componente fundamental) en BT, MT, AT y EAT.

Orden de la armónica (n)	BAJA TENSIÓN Y MEDIA TENSIÓN		ALTA TENSIÓN-EXTRA ALTA TENSIÓN
	Niveles de compatibilidad	Valores Indicativos de Niveles de planificación	Valores Indicativos de Niveles de planificación
5	6.0	5	2
7	5.0	4	2
11	3.5	3	1.5
13	3.0	2.5	1.5
17	2.0	1.6	1
19	1.5	1.2	1
23	1.5	1.2	0.7
25	1.5	1.2	0.7
>25	$0.2 + 1.3 \times 25/n$	$0.2 + 0.5 \times 25/n$	$0.2 + 0.5 \times 25/n$
3	5.0	4.0	2
9	1.5	1.2	1
15	0.3	0.3	0.3
21	0.2	0.2	0.2
>21	0.2	0.2	0.2
2	2.0	1.6	1.5
4	1.0	1.0	1
6	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.4	0.4
10	0.5	0.4	0.4
12	0.2	0.2	0.2
>12	0.2	0.2	0.2
Distorsión Armónica Total (THD)	8.0	6.5	3.0

Tabla 4.3.2. Valores indicativos para algunos límites de emisión de corriente armónica de orden impar no múltiplos de tres relativos al tamaño de una instalación. (Si < 1 [MVA] y $r_{SC} > 100$).

Orden armónico n	5	7	11	13	>13
Límites de Emisión de corriente armónica $E_{I_{hi}} = I_{hi}/I_i$ (%)	5	5	3	3	$500/h^2$

Dónde:

$E_{I_{hi}}$ es el límite de emisión de corriente armónica de orden h para el cliente i .

I_{hi} es la corriente armónica de orden h causada por la instalación perturbadora del cliente i .

I_i es la corriente fundamental a su potencia contratada.

4.4. Norma IEEE 519-1992

En Estados Unidos la norma **IEEE 519** “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia” define entre sus puntos los límites de emisividad para cada armónico de corriente y los valores máximos de distorsión permisible.

El respeto estricto a estas recomendaciones no siempre evitaría problemas, particularmente cuando son aproximados a los límites. Es razonable considerar que el sistema cambia a menudo, justificando una nueva reexaminación. Mediciones de armónicas deberían ser ejecutadas periódicamente, para determinar el comportamiento del sistema y el rendimiento de los equipos. El cliente debería confirmar:

- Que los condensadores para corregir el factor de potencia o filtros de armónicas no sean sobrecargados por un exceso de armónicas.
- Que las perjudiciales resonancias series o paralelas, no están presentes.
- Que el nivel de armónicas en el PCC (Punto de Conexión Común) y en los puntos de utilización no sea excesivo.

Los límites mostrados en las tablas de distorsión de corriente deben ser usados como valores extremos para operaciones normales (condiciones válidas por más de 1 hora). Para períodos cortos, durante partidas o condiciones inusuales, los límites pueden ser excedidos en un 50 %.

Límites de distorsión de corriente

Las Tablas 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3 son aplicables para rectificadores de 6 pulsos y situaciones generales de distorsión. Sin embargo, cuando se usan convertidores con número de pulsos (q) mayor a 6, los límites para las armónicas características son incrementados por un factor equivalente a:

$$\frac{\bar{q}}{6} \quad (4.4.1)$$

Tal que las amplitudes de las armónicas no-características sean menores que el 25 % de los límites especificados en las siguientes tablas.

Los valores límites para cada intervalo de componentes armónicos están dados como porcentaje de la corriente fundamental.

Tabla 4.4.1. Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general
($120[V] < V_n \leq 69[KV]$).

Armónicas individuales (impares)						
Isc/Im	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	THDi%
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	5
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Tabla 4.4.2. Límites de distorsión de corriente para sistemas de subtransmisión general
($69 [kV] < V_n \leq 161 [KV]$).

Armónicas individuales (impares)						
Isc/Im	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	THDi%
<20	2	3.5	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	2.75	1.25	0.5	0.25	4
50-100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100-1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

Tabla 4.4.3. Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión general
($161 [KV] < V_n$).

Armónicas individuales (impares)						
Isc/Im	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	THDi%
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
>=50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Las siguientes observaciones rigen para las tablas mostradas anteriormente:

- Las armónicas pares están limitadas al 25% de los valores para armónicas impares mostrados en las tablas anteriores.
- No son admisibles distorsiones de corriente que generen corriente continua.
- **Isc**: Máxima corriente de cortocircuito en el PCC, el punto de conexión común y corresponde al lugar en que se interconectan el convertidor (carga no lineal) con los otros consumidores.
- **Im**: Máxima corriente demandada por la carga en el PCC (componente de frecuencia fundamental).

Límites de distorsión de tensión en distribuidores

Los límites de distorsión de tensión para distribuidores se muestran en la siguiente Tabla 4.4.4.

Tabla 4.4.4. Límites de distorsión de tensión en distribuidores.

Tensión de barra en PCC	Distorsión individual de tensión %	Distorsión total de tensión %
Menores de 69 [KV] inc.	3	5
De 69 [KV] a 161 [KV]	1.5	2.5
Más de 161 [KV]	1	1.5

Punto de medición del nivel de armónicas

Los límites establecidos en la norma **IEEE 519-1992** deben aplicarse en la acometida, es decir en el punto donde el suministrador entrega la energía al usuario en cuestión y a partir de ahí puede alimentar a otro usuario (Figura 4.4.1).

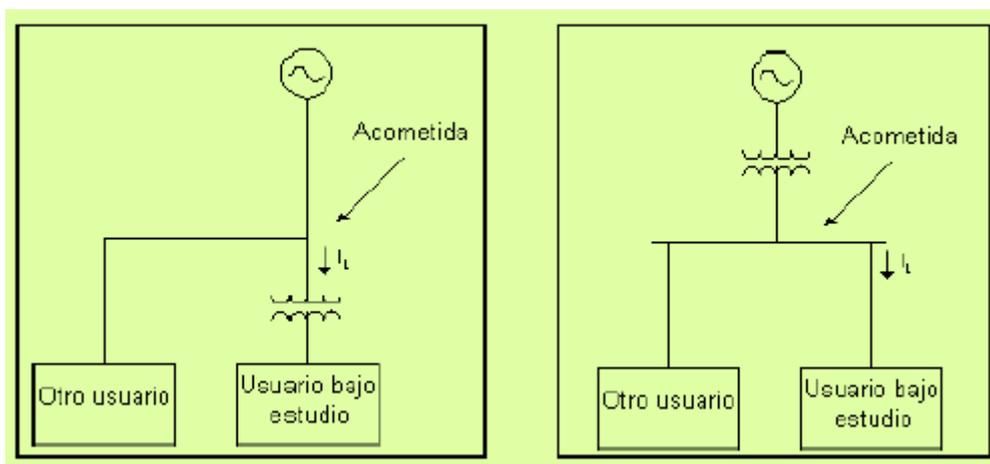


Figura 4.4.1. Acometida para aplicación de límites establecidos.

La norma puede aplicarse usando el mismo procedimiento por los usuarios para evaluar otros puntos dentro de su instalación, pero se debe tener en cuenta que si en un punto dado los límites se exceden, la interacción de diversas cargas puede producir cancelaciones parciales de armónicas que arrojen valores dentro de los límites en la acometida. Esto se debe al efecto diversidad de las cargas.

4.5. Normativa del ENRE (Resolución 0099/1997. Boletín Oficial nº 28583)

El Límite de emisión individual asignado a un usuario conectado a una red se obtiene para cada intensidad armónica y se determina en función de su potencia contratada, y el nivel de tensión (BT, MT o AT).

- T1 ($P < 10$ kW).
- T2 ($10 \text{ kW} \leq P < 50$ kW).
- T3 ($P \geq 50$ kW).

En la Tabla 4.5.1 se fijan las intensidades armónicas como valores en unidad de corriente [A] para usuarios con tarifa T1. Para usuarios en tarifas T2 y T3, se fijan como valores porcentuales respecto de la intensidad de carga contratada por el usuario (para cada banda horaria según corresponda). Lo dicho es para T1, T2 conectados en BT y T3 conectados en BT ($U \leq 1$ kV), MT ($1 \text{ kV} < U < 66$ kV) o AT ($66 \text{ kV} \leq U \leq 220$ kV).

Tabla 4.5.1. Límites de emisión individuales de intensidades armónicas para usuarios tarifas T1, T2 y T3.

Orden de la Armónica (n)	Usuario T1	Usuarios T2 Y T3 en BT y MT	Usuarios T3 en AT
	Intensidad armónica máxima [A]	Intensidad armónica máxima, como % de la corriente de carga contratada	Intensidad armónica máxima, como % de la corriente de carga contratada
IMPARES NO MULTIPLoS DE 3			
5	2.28	12	6
7	1.54	8.5	5.1
11	0.66	4.3	2.9
13	0.42	3	2.2
17	0.26	2.7	1.8
19	0.24	1.9	1.7
23	0.2	1.6	1.1
25	0.18	1.6	1.1
>25	4.5/n	$0.2+0.8*25/n$	0.4
IMPARES MULTIPLoS DE 3			
3	4.6	16	7.5
9	0.8	2.2	2.2
15	0.3	0.6	0.8
21	0.21	0.4	0.4
>21	4.5/n	0.3	0.4
PARES			
2	2.16	10	10
4	0.86	2.5	3.8
6	0.6	1	1.5
8	0.46	0.8	0.5
10	0.37	0.8	0.5
12	0.31	0.4	0.5
>12	3.68/n	0.3	0.5
TDTI(%)		20	12

Cálculo de la Distorsión Penalizable Individual de Armónicas para un usuario

Se define como Distorsión Penalizable de Armónicas (DPIA) a la distorsión armónica detectada en cada intervalo de medida, por encima de los límites de emisión individuales establecidos, según la siguiente expresión:

$$DPIA_k = \text{Max} \left[0, \frac{TDTI(k) - TDTI}{TDTI} \right] + \frac{1}{3} \sum_{n=2}^{40} \text{Max} \left[0, \frac{In(k) - In}{In} \right] \quad (4.5.1)$$

Donde:

- **TDTI (k)** es la tasa de distorsión total de corriente registrada en el intervalo de medición k (10 minutos), referida a la corriente contratada por el usuario.

$$TDTI(K) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{In(k)}{Ic} \right)^2} \quad (4.5.2)$$

- **TDTI:** es el límite de emisión de corriente para la distorsión total definido en la Tabla 4.5.1 para el caso de usuarios encuadrados en tarifas T2 y T3. Para usuarios en tarifa T1, no se considera la tasa de distorsión total a los fines de la determinación de la distorsión penalizable de armónicas (**DPIA**).

- **In (k):** es el valor de la intensidad armónica n en el intervalo de medición k que inyecta el usuario en la red. El límite y las intensidades medidas deben ser expresados en valores absolutos de corrientes o en valores porcentuales con respecto a la intensidad de carga correspondiente con la potencia contratada por el usuario, según la categoría tarifaria.

- **In:** es el límite de emisión individual de la intensidad armónica n.

El **DPIAk** se calcula para cada intervalo k del período de medición, registrándose la energía consumida por el usuario E (k) durante cada intervalo k.

A efectos del cálculo de **TDTI (k)** e **In (k)** para la evaluación de la **DPIA**, solo se considerarán los valores de **In (k)** registrados con flujo de potencia activa desde el usuario hacia la red de alimentación, que es cuando las instalaciones del usuario están emitiendo la perturbación de dicha armónica.

Hay penalización en un punto de medición, si durante más del 5 % del tiempo de medida se ha superado alguno de los límites de emisión individuales asignados al usuario.

4.6. Normativa del ENRE (Resolución 0184/2000. Boletín Oficial nº 29373)

Niveles de Referencia para Tensiones Armónicas

Los niveles de Tensiones Armónicas presentes en los puntos de suministro (Tasas de distorsión individual y total de las tensiones Armónicas medidas en valor eficaz cada 10 minutos), no deberán sobrepasar los Niveles de Referencia indicados en la Tabla 4.6.1 para puntos de suministro en MT ($1\text{kV} < U < 66\text{kV}$) y AT ($U \geq 66\text{kV}$) y en la Tabla 4.6.2 para puntos de suministro en BT ($U \leq 1\text{kV}$), durante más de un 5 % del tiempo total del período de medición.

Los Niveles de Referencia de las Tablas 4.6.1 y 4.6.2 son obligatorios para las Armónicas hasta el orden 40 (inclusive). La Tasa de Distorsión Total se define así como:

$$TDT = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} \left(\frac{U_i}{U_1} \right)^2} \quad (4.6.1)$$

Donde,

- U_i amplitud de la tensión de la armónica de orden i ;
- U_1 amplitud de la tensión fundamental.

Para redes de EAT ($U > 220\text{ kV}$) se considerarán como Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión, valores mitad de los indicados en la Tabla 4.6.1 para redes de AT ($66\text{kV} \leq U \leq 220\text{kV}$).

Los Niveles de Referencia indicados en las Tablas 4.6.1 y 4.6.2 garantizan la compatibilidad entre equipos y redes de suministro en lo referente a los efectos térmicos, caracterizados por su variación lenta considerando los efectos de largo plazo de las Armónicas.

Para efectos transitorios caracterizados por el valor eficaz de cada armónica en intervalos efectivos de medición de 3 segundos, serán considerados como niveles de referencia orientativos los mismos valores de las Tablas 2 y 3 multiplicados por 1,5 veces.

Tabla 4.6.1. Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión en MT y AT, que no deben ser superados durante más del 5 % del período de medición.

Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	
	MT (1 kV<U<66 kV)	AT 66 kV≤U≤220 kV
(impares no múltiplos de 3)		
5	6,0	2,0
7	5,0	2,0
11	3,5	1,5
13	3,0	1,5
17	2,0	1,0
19	1,5	1,0
23	1,5	0,7
25	1,5	0,7
>25	0,2 + 5/n	0,1 + 2/5n
(impares múltiplos de 3)		
3	5,0	1,5
9	1,5	1,0
15	0,3	0,3
21	0,2	0,2
>21	0,2	0,2
(pares)		
2	2,0	1,5
4	1,0	1,0
6	0,5	0,5
8	0,5	0,2
10	0,5	0,2
12	0,2	0,2
>12	0,2	0,2
Tasa de Distorsión Total:	TDT 8 %	TDT 3 %

Tabla 4.6.2. Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión en BT (U ≤ 1kV), que no deben ser superados durante más del 5 % del período de medición.

Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamenta)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamenta)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+0,5x25/n				
Tasa de Distorsión Total: TDT 8%					

Cálculo de la Distorsión Penalizable de Armónicas

Se define como Distorsión Penalizable de Armónicas (**DPA**) a la distorsión armónica encontrada en cada intervalo de medida, por encima de los niveles de referencia y normalizada por estos mismos, según la siguiente expresión:

$$DPA_k = \text{Max} \left[0, \frac{TDT(k) - TDT}{TDT} \right] + \frac{1}{3} \sum_{n=2}^{40} \text{Max} \left[0, \frac{U_i(k) - U_i}{U_i} \right] \quad (4.6.2)$$

Donde:

- **TDT(k)** es la tasa de distorsión total registrada en el intervalo de medición k (10 minutos).
- **TDT** es el nivel de distorsión total de referencia definido en las Tablas 4.6.1 y 4.6.2 (ecuación 4.6.1).
- **U_i (k)** es el valor de la tensión armónica i en el intervalo de medición k.
- **U_i** es el Nivel de Referencia de la tensión armónica i definido en las Tablas 4.6.1 y 4.6.2.
- **DPA_k** se calcula para cada intervalo k del periodo de medición, registrándose la energía suministrada E(k) durante cada intervalo k.

Existirá penalización en un punto de medida, si una o más Tensiones Armónicas en forma individual o la tasa de distorsión total superan sus Niveles de Referencia correspondientes indicados en las Tablas 4.6.1 y 4.6.2, en más del 5 % del periodo de medición.

CAPÍTULO 5

Ensayo y modelado de lámparas y cargas residenciales

Para analizar el impacto de las lámparas fluorescentes compactas (LFC) y las lámparas de estado sólido (LED) en los sistemas eléctricos de potencia, se realizaron mediciones de calidad de la energía a fin de caracterizar estas cargas no lineales para luego modelarlas y simularlas.

Adicionalmente se registraron las ondas de tensión y corriente de distintos electrodomésticos y aparatos electrónicos, que usualmente podemos encontrar en una vivienda típica residencial, para modelarlos y simularlos junto con las cargas de iluminación, puesto que, ambas constituyen la carga eléctrica de un usuario residencial.

5.1. Metodología Experimental

5.1.1. Mediciones Individuales

Utilizando los osciloscopios digitales Fluke 97 y Fluke 123, se realizaron ensayos de laboratorio de distintas lámparas LFC y LED, y aparatos domésticos, asequibles en el mercado actual y en el país. Las ondas de tensión y corrientes capturadas fueron procesadas con herramientas informáticas para obtener los espectros de amplitud y fase, las potencias, y las tasas de distorsión total (THD).

- **Lámparas fluorescentes compactas (LFC)**

En la Tabla 5.1.1.1 se resumen los datos medidos de corriente, potencia activa, tasa de distorsión total de corriente (THDi%) y factor de potencia verdadero (λ), de las 59 lámparas fluorescentes compactas ensayadas.

Tabla 5.1.1.1. Características de las lámparas LFC ensayadas.

Lámparas	Identificación	I[mA]	THDi[%]	P[W]	FP(λ)
LFC-11W Espiral blanco frío 1	LFC 1	61	91	9.5	0.71
LFC-11W Espiral blanco frío 2	LFC 2	67	90	10.3	0.71
LFC-11W 3U blanco frío 1	LFC 3	76	86	11.8	0.72
LFC-11W 3U blanco frío 2	LFC 4	68	87	10.8	0.72
LFC-18W 3U blanco frío 1	LFC 5	116	86	18.2	0.72
LFC-18W 3U blanco frío 2	LFC 6	117	89	18.3	0.71
LFC-18W Espiral blanco cálido 1	LFC 7	117	92	17.6	0.70
LFC-18W Espiral blanco cálido 2	LFC 8	111	94	16.8	0.69
LFC-11W 2U blanco frío 1	LFC A1	64	99	9.6	0.68
LFC-11W 2U blanco frío 2	LFC A2	64	96	9.6	0.69
LFC-11W 3U blanco frío 1	LFC A3	68	103	9.9	0.66
LFC-11W 3U blanco frío 2	LFC A4	70	102	10.3	0.67
LFC-11W Espiral blanco frío 1	LFC A5	70	93	10.6	0.69
LFC-11W Espiral blanco frío 2	LFC A6	69	95	10.4	0.69
LFC-11W Gota blanco frío 1	LFC A7	68	102	9.9	0.67
LFC-11W Gota blanco frío 2	LFC A8	65	102	9.5	0.67

Lámparas	Identificación	I[mA]	THDi[%]	P[W]	FP(λ)
LFC-11W AR111 blanco frío 1	LFC A9	58	98	8.7	0.68
LFC-11W AR111 blanco frío 2	LFC A10	60	98	8.9	0.68
LFC-15W Espiral mini blanco frío 1	LFC A11	90	103	12.8	0.65
LFC-15W Espiral mini blanco frío 2	LFC A12	91	100	13.3	0.67
LFC-15W Espiral mini blanco frío 3	LFC A13	90	99	13.1	0.66
LFC-18W Mini 4U blanco frío 1	LFC A14	103	100	15.2	0.67
LFC-18W Mini 4U blanco frío 2	LFC A15	109	99	16.3	0.68
LFC-20W Std. 3U blanco frío 1	LFC A16	122	98	18.3	0.68
LFC-20W Std. 3U blanco frío 2	LFC A17	119	104	17.3	0.66
LFC-20W Std. 3U blanco frío 3	LFC A18	130	99	19.3	0.68
LFC-20W Std. 3U blanco frío 4	LFC A19	135	101	20.1	0.67
LFC-20W Std. 3U blanco frío 5	LFC A20	129	102	18.9	0.67
LFC-20W Std. 3U blanco frío 6	LFC A21	132	100	19.7	0.67
LFC-20W Std. 3U blanco frío 7	LFC A22	131	101	19.4	0.67
LFC-20W Std. 3U blanco frío 8	LFC A23	130	102	19.0	0.67
LFC-20W Std. 3U blanco frío 9	LFC A24	132	99	19.6	0.68
LFC-20W Std. 3U blanco frío 10	LFC A25	135	98	20.2	0.68
LFC-20W Mini 4U blanco frío 1	LFC A26	142	103	20.2	0.65
LFC-20W Mini 4U blanco frío 2	LFC A27	147	103	20.9	0.65
LFC-20W Espiral blanco frío 1	LFC A28	127	91	19.4	0.70
LFC-20W Espiral blanco frío 2	LFC A29	122	90	18.8	0.70
LFC-24W Globo blanco frío 1	LFC A30	125	130	16.3	0.59
LFC-24W Globo blanco frío 2	LFC A31	127	126	16.8	0.60
LFC-24W PAR 38 blanco frío 1	LFC A32	145	104	21.2	0.66
LFC-24W PAR 38 blanco frío 2	LFC A33	154	99	22.7	0.67
LFC-26W Std. 3U blanco frío 1	LFC A34	160	100	23.7	0.67
LFC-26W Std. 3U blanco frío 2	LFC A35	167	97	25.0	0.68
LFC-36W Std. 4U blanco frío 1	LFC A36	233	111	32.2	0.63
LFC-22W 3U blanco frío 1	LFC J1	55	64	9.0	0.75
LFC-22W 3U blanco frío 2	LFC J2	58	61	9.5	0.75
LFC-22W 3U blanco frío 3	LFC J3	54	68	8.8	0.74
LFC-20W 3U blanco cálido 1	LFC E1	71	88	10.8	0.70
LFC-13W 2U blanco cálido 1	LFC AL1	78	86	12.0	0.70
LFC-13W 2U blanco frío 1	LFC AL2	53	87	8.1	0.70
LFC-20W 3U blanco cálido 1	LFC GE1	100	130	13.0	0.59
LFC-20W 3U blanco cálido 2	LFC GE2	99	126	13.1	0.60
LFC-20W 3U blanco cálido 3	LFC GE3	98	127	13.0	0.60
LFC-20W 3U blanco cálido 4	LFC GE4	98	125	13.1	0.60
LFC-20W 3U blanco cálido 5	LFC GE5	100	123	13.4	0.61
LFC-20W 3U blanco cálido 6	LFC GE6	96	130	12.6	0.59
LFC-20W 3U blanco cálido 7	LFC GE7	96	125	12.8	0.61
LFC-20W 3U blanco cálido 8	LFC GE8	99	127	13.1	0.60
LFC-11W 2U blanco cálido 1	LFC GE9	77	129	10.0	0.59

En las Figuras 5.1.1.1-12 se muestran las formas de onda de tensión y corriente, y espectros de corriente, de algunas lámparas LFC ensayadas. Los datos y gráficos más completos de cada modelo se encuentran en el [Anexo 2](#).

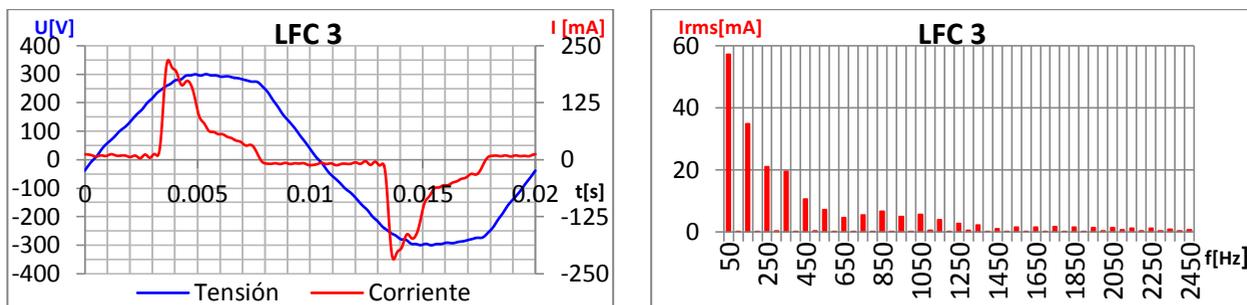


Figura 5.1.1.1. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC PHILIPS 3U de 11 W, blanco frío.

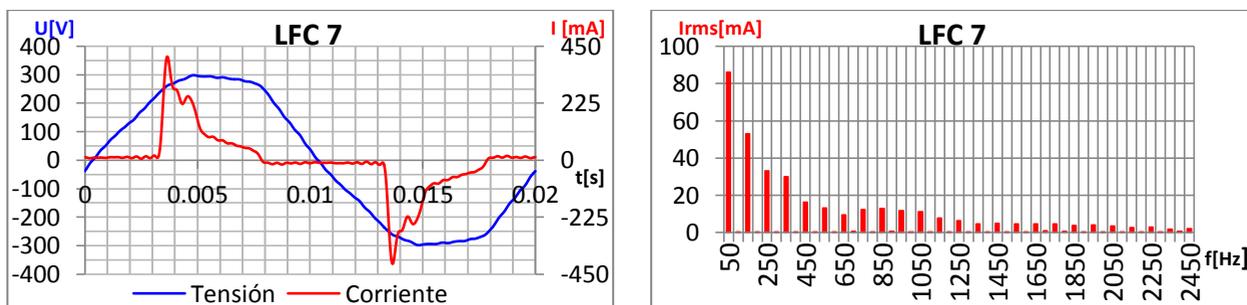


Figura 5.1.1.2. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC OSRAM Espiral de 18 W, blanco cálido.

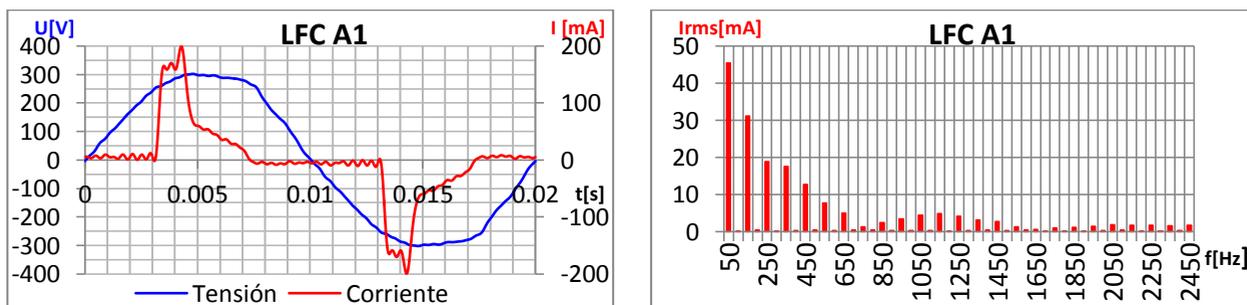


Figura 5.1.1.3. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC ALIC 2U de 11 W, blanco frío.

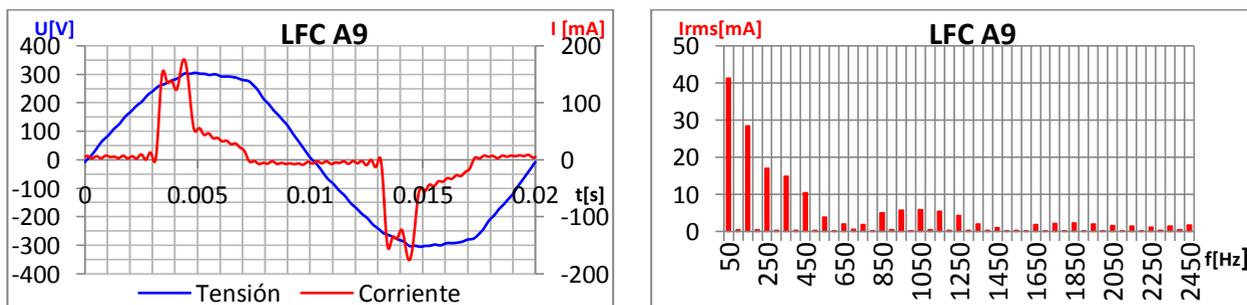


Figura 5.1.1.4. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC ALIC AR111 de 11 W, blanco frío.

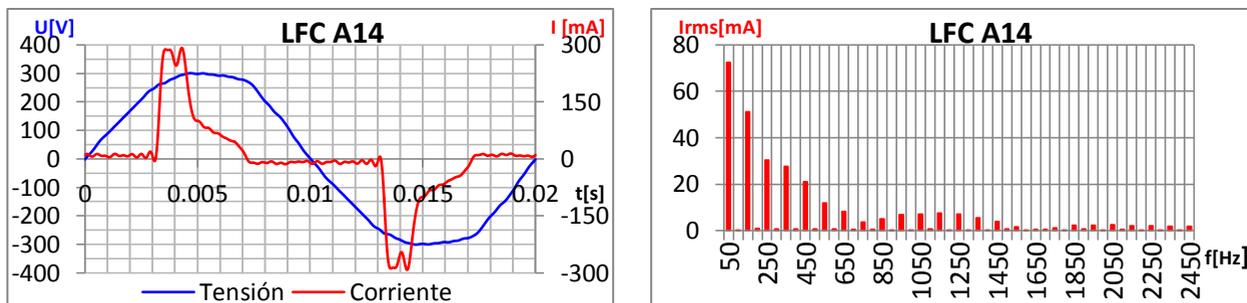


Figura 5.1.1.5. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC ALIC Mini 4U de 18 W, blanco frío.

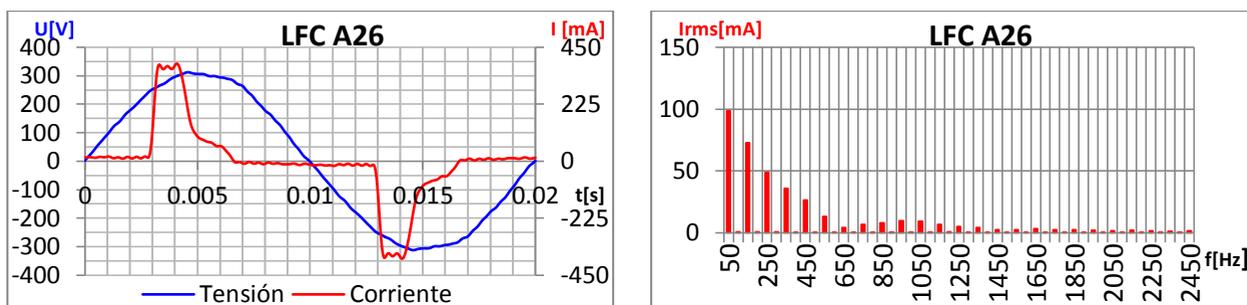


Figura 5.1.1.6. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC ALIC Mini 4U de 20 W, blanco frío.

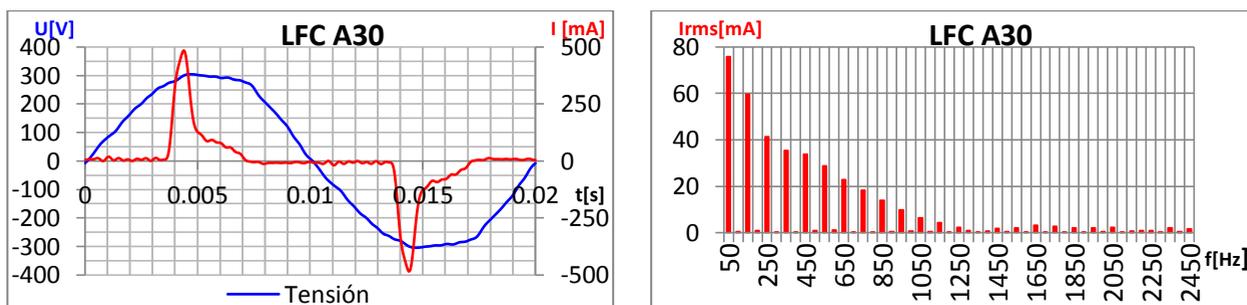


Figura 5.1.1.7. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC ALIC Globo de 24 W, blanco frío.

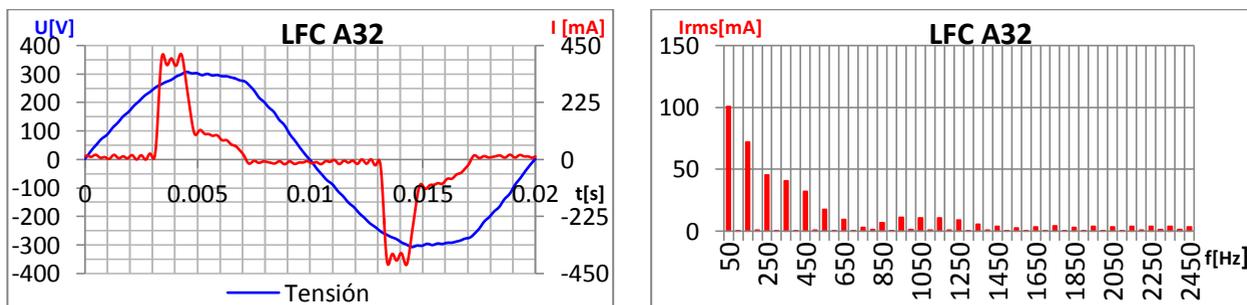


Figura 5.1.1.8. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC ALIC PAR 38 de 24 W, blanco frío.

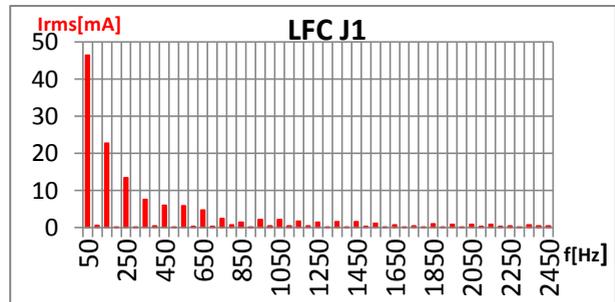
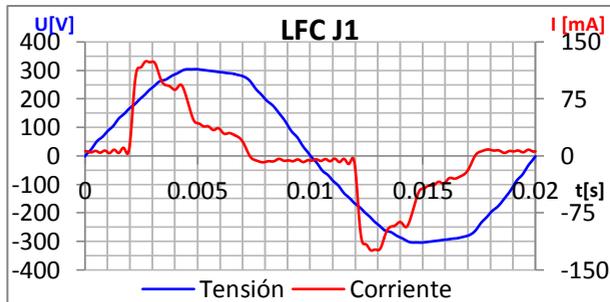


Figura 5.1.1.9. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC JL 3U de 22 W, blanco frío.

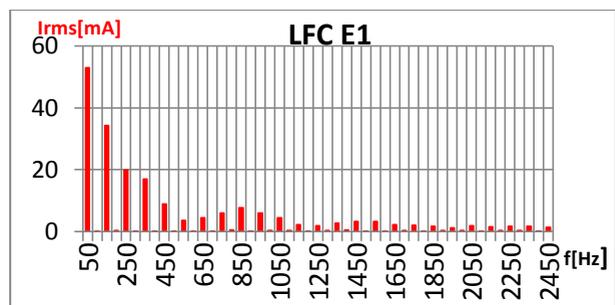
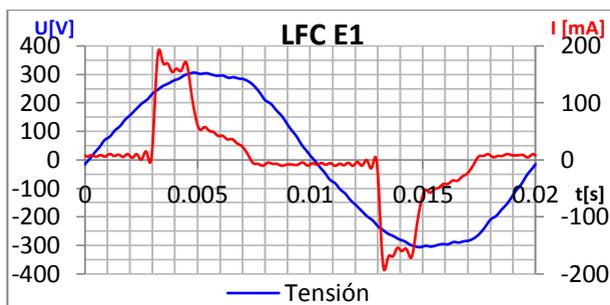


Figura 5.1.1.10. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC Eurolamp 3U de 20 W, blanco cálido.

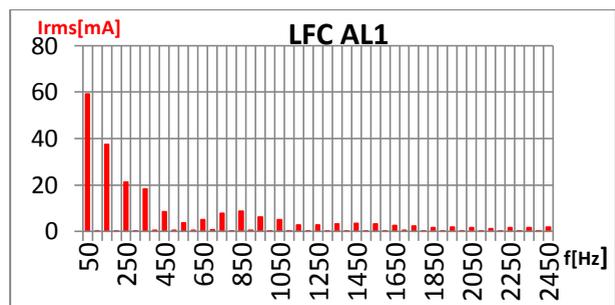
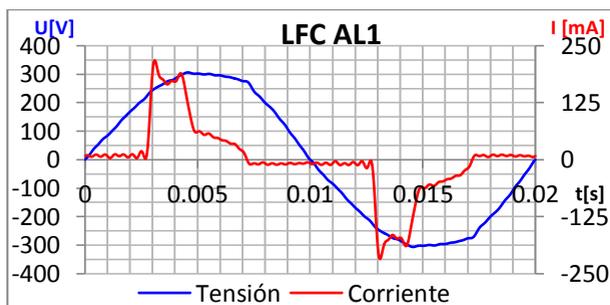


Figura 5.1.1.11. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC Alcaluz 2U de 13 W, blanco cálido.

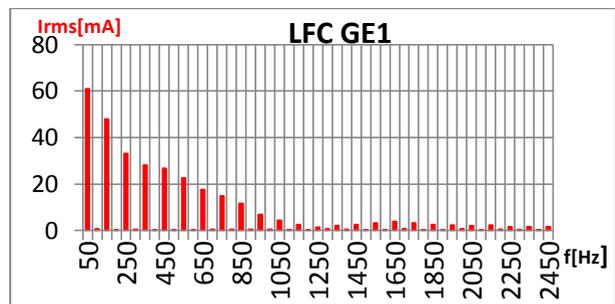
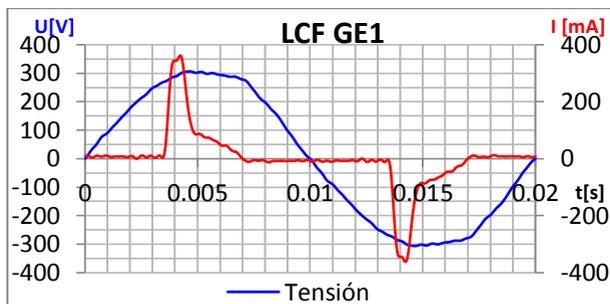


Figura 5.1.1.12. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LFC General Electric 3U de 20 W, blanco cálido.

Se observa que la distorsión de corriente es muy importante. El THDi% de las lámparas LFC ensayadas alcanza valores comprendidos entre 60 y 130 %. Se observa también

como difieren entre sí las formas de onda y los espectros de corriente de acuerdo a la marca, modelo, potencia y color de las mismas.

- **Lámparas de estado sólido (LED)**

En las Tablas 5.1.1.2 y 5.1.1.3 se resumen los datos medidos de corriente, potencia, THDi% y factor de potencia verdadero de las 28 lámparas LED de alto rendimiento lumínico y 8 lámparas LED de bajo rendimiento lumínico ensayadas en el laboratorio.

Tabla 5.1.1.2. Características de las lámparas LED de alto rendimiento lumínico ensayadas.

Lámparas	Identificación	I[mA]	THDi[%]	P[W]	FP(λ)
6 LED-12W blanco cálido 1	LED A1	80	141	9.3	0.54
6 LED-12W blanco cálido 2	LED A2	81	150	9.9	0.55
6 LED-12W blanco cálido 3	LED A3	81	135	10.1	0.55
6 LED-12W blanco cálido 4	LED A4	76	139	9.4	0.55
6 LED-12W blanco cálido 5	LED A5	78	135	9.7	0.56
6 LED-12W blanco cálido 6	LED A6	82	138	10.3	0.56
6 LED-12W blanco cálido 7	LED A7	74	136	9.5	0.56
6 LED-12W blanco cálido 8	LED A8	81	137	10.2	0.56
6 LED-12W blanco cálido 9	LED A9	83	141	10.3	0.55
6 LED-12W blanco cálido 10	LED A10	78	136	9.8	0.56
6 LED-8W blanco cálido 1	LED A11	60	125	7.7	0.60
6 LED-8W blanco cálido 2	LED A12	63	145	7.7	0.59
16 LED- 7W blanco frío 1	LED A13	55	135	6.4	0.53
16 LED- 7W blanco frío 2	LED A14	68	149	8.2	0.55
4 LED- 4W blanco frío 1	LED A15	45	144	4.9	0.51
4 LED- 4W blanco frío 2	LED A16	43	168	4.7	0.53
4 LED- 4W blanco frío 3	LED A17	42	162	4.6	0.52
4 LED- 4W blanco frío 4	LED A18	41	161	4.6	0.52
4 LED- 4W blanco frío 5	LED A19	45	151	5.3	0.50
4 LED- 4W blanco frío 6	LED A20	40	151	4.6	0.51
8 LED- 10W blanco cálido 1	LED A21	43	52	6.5	0.71
8 LED- 10W blanco cálido 2	LED A22	45	47	8.1	0.70
1 LED- 12W blanco cálido 1	LED A23	97	152	10.7	0.51
1 LED- 12W blanco cálido 2	LED A24	98	160	11.1	0.51
12 LED- 15W blanco cálido 1	LED A25	67	9	13.5	0.92
12 LED- 15W blanco cálido 2	LED A26	70	26	14.3	0.89
3 LED- 9W blanco cálido 1	LED G1	57	140	6.8	0.54
3 LED- 6W blanco frío 1	LED W1	51	137	6.5	0.59

Tabla 5.1.1.3. Características de las lámparas LED de bajo rendimiento lumínico ensayadas.

Lámparas	Identificación	I[mA]	THDi[%]	P[W]
32 LED-1,7W blanco frío 1	LBF1	18	39	1.3
32 LED-1,7W blanco frío 2	LBF2	18	40	1.4
32 LED-1,7W blanco frío 3	LBF3	18	40	1.4
32 LED-1,7W blanco frío 4	LBF4	18	40	1.4
15 LED-1,5W blanco frío 1	LBF5	21	27	0.9
15 LED-1,5W blanco frío 2	LBF6	21	27	1.0
32 LED-1,7W blanco cálido 1	LBC1	42	26	2.2
20 LED-1,3W blanco cálido 1	LBC2	21	31	1.2

En las Figuras 5.1.1.13- 21 se muestran las formas de onda de tensión y corriente, y espectros de corriente, de algunas lámparas LED ensayadas. Los datos y gráficos más completos de cada modelo se encuentran en el [Anexo 2](#).

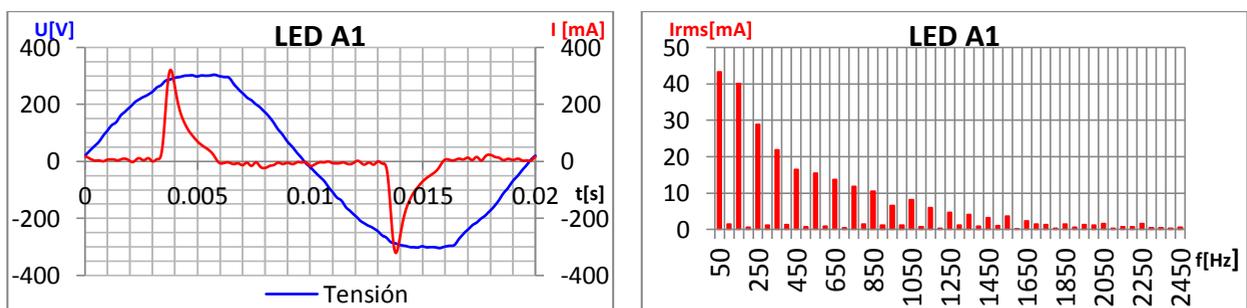


Figura 5.1.1.13. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 6 LED- 12W, blanco cálido.

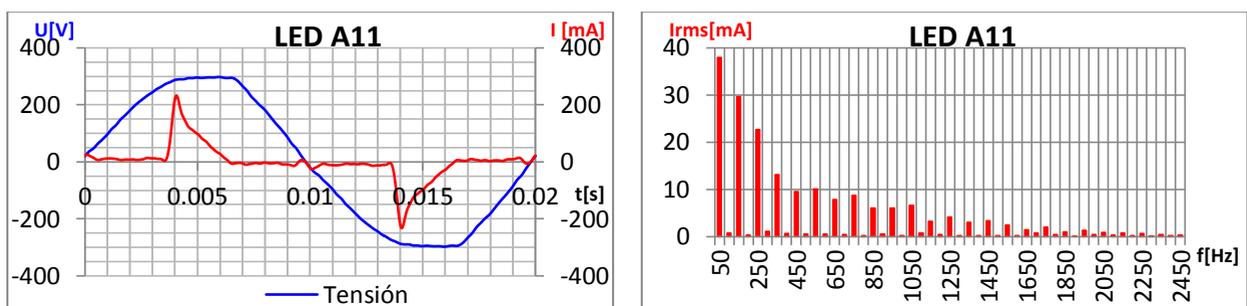


Figura 5.1.1.14. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 6 LED- 8W, blanco cálido.

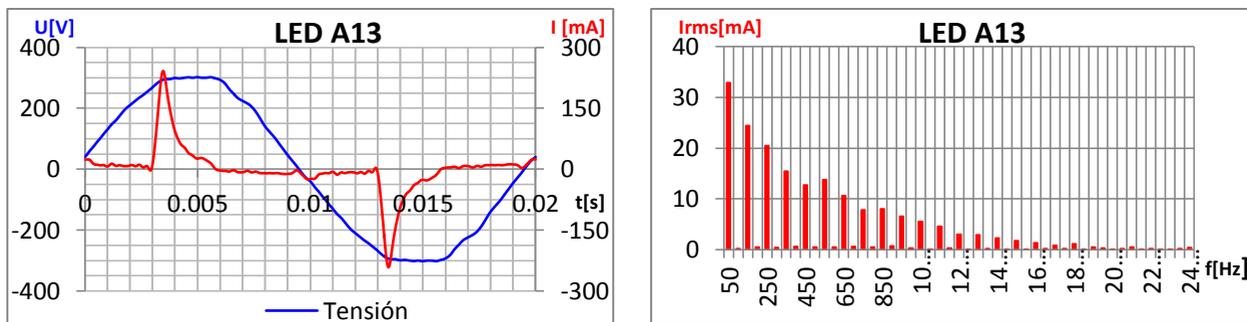


Figura 5.1.1.15. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 16 LED- 7W, blanco frío.

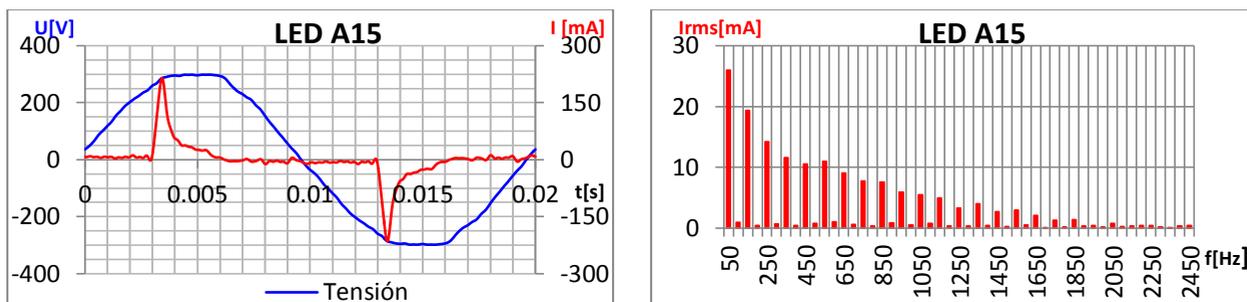


Figura 5.1.1.16. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 4 LED- 4W, blanco frío.

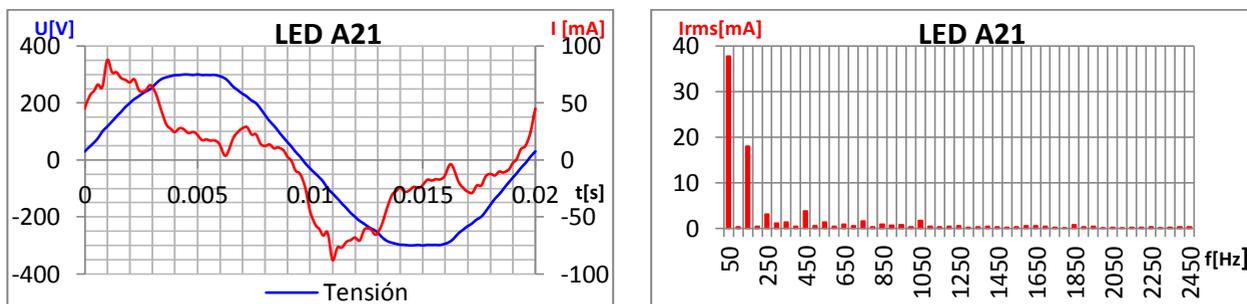


Figura 5.1.1.17. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 8 LED- 10W, blanco cálido.

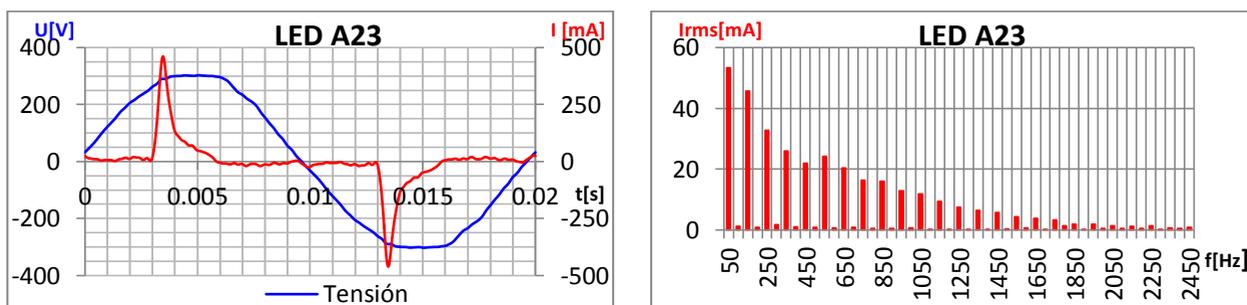


Figura 5.1.1.18. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 1 LED- 12W, blanco cálido.

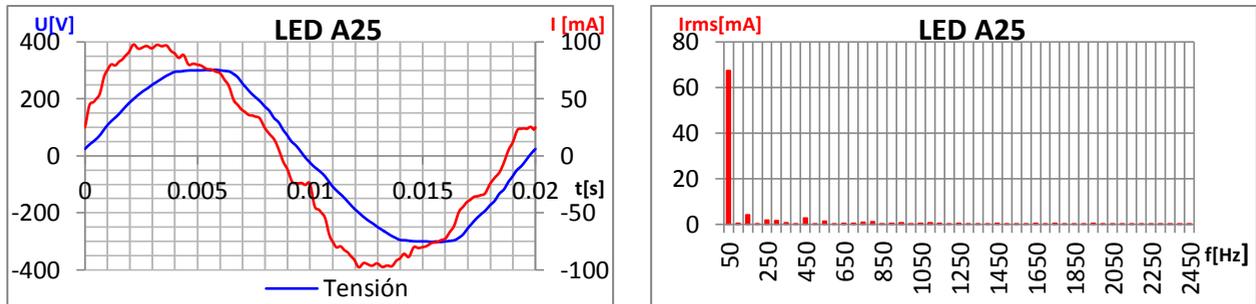


Figura 5.1.1.19. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED ALIC- 12 LED- 15W, blanco cálido.

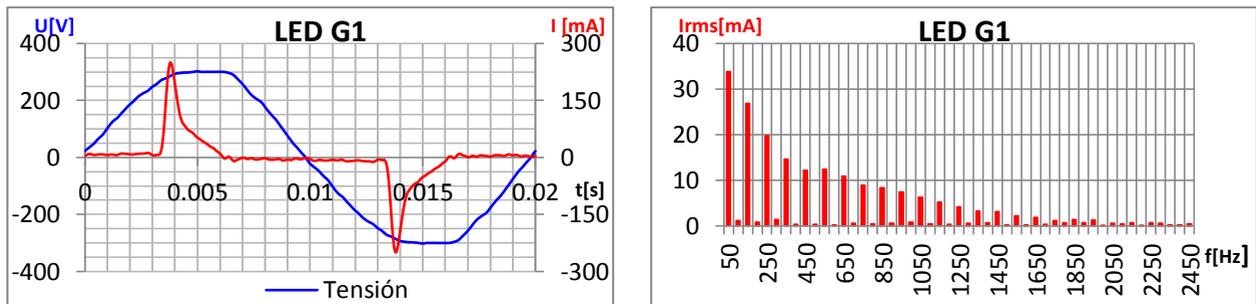


Figura 5.1.1.20. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED GOODYEAR- 3 LED- 9W, blanco cálido.

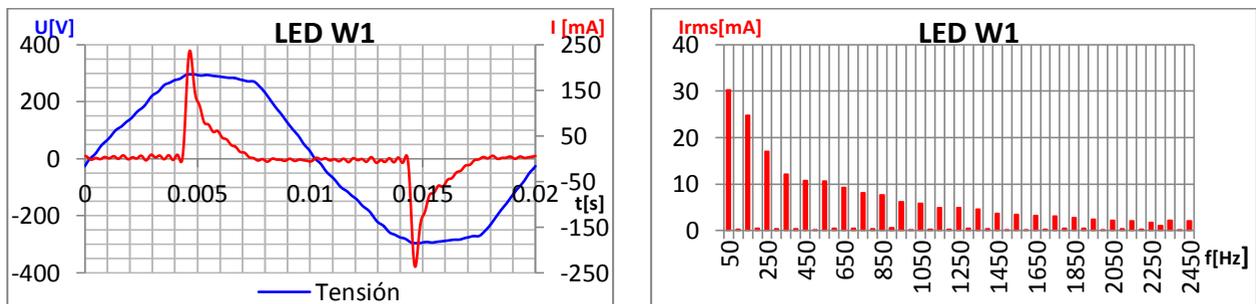


Figura 5.1.1.21. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una lámpara LED WERKE- 3 LED- 6W, blanco frío.

Al igual que las lámparas LFC, las lámparas LED de alto rendimiento lumínico se destacan por la elevada distorsión armónica de la corriente y su elevado factor de cresta. El THDi% de las lámparas de alto rendimiento lumínico ensayadas alcanza valores comprendidos entre 9 y 168 %.

- **Electrodomésticos y equipos electrónicos**

En la Tabla 5.1.1.4 se resumen los datos característicos de los equipos ensayados.

Tabla 5.1.1.4. Características de aparatos electrónicos y electrodomésticos de uso residencial.

Aparato	I[A]	U[V]	THD _i %	THD _u %	P[W]	FP
(1) TV CRT 21"	0.343	220.0	124.7	2.2	47.1	0.62
(1.1) TV CRT 21" STB c/led encendido	0.368	220.3	42.6	2.3	40.0	0.49
(1.2) TV CRT 21" STB en espera	0.371	220.4	37.4	2.4	40.4	0.50
(2) TV CRT 21"	0.378	220.9	150.5	3.2	46.2	0.55
(3) TV CRT 21"	0.552	220.0	113.0	4.3	76.4	0.63
(4) TV CRT 14"	0.315	224.0	87.5	5.6	53.0	0.71
(4.1) TV CRT 14" STB	0.039	225.5	44.0	5.6	7.0	0.83
(5) TV LCD 32"	0.500	225.0	11.3	5.0	107.0	0.98
(5.1) TV LCD 32" Led encendido	0.313	225.6	29.0	5.6	65.4	0.92
(5.2) TV LCD 32" Led STB (espera)	0.041	224.6	51.5	5.7	5.6	0.61
(6) Decodificador TV Digital Encendido	0.104	224.5	93.5	5.7	16.5	0.71
(6.1) Decodificador TV Dig.c/grab.(DVR)	0.212	229.0	132.0	5.0	29.0	0.65
(7) Decodificador TV Digital Encendido	0.065	220.3	140.2	2.2	8.1	0.57
(7.1) Decodificador TV Digital STB	0.010	219.5	39.4	2.2	1.4	0.62
(8) Equipo Audio 2 canales –vol. bajo-	0.113	227.0	41.0	4.7	19.7	0.80
(8.1) Equipo Audio 2 canales (STB)	0.080	227.0	26.0	4.7	10.0	0.60
(9) Lavarropas	1.470	222.3	4.0	5.6	300.0	0.91
(10) Horno a Microondas	4.950	220.0	35.6	6.1	980.0	0.92
(11) Heladera c/freezer	1.720	223.8	13.3	5.5	160.0	0.42
(12) Heladera c/freezer	1.109	218.8	14.8	3.6	152.6	0.64
(13) Heladera s/freezer	1.001	219.3	7.00	2.3	125.2	0.57
(14) Heladera s/freezer	0.398	219.7	26.2	2.3	68.5	0.78
(15) Freezer	0.900	2250	10.0	4.5	90.0	0.45
(16) CPU + Monitor CRT 17"	0.088	219.7	107.6	3.7	127.0	0.65
(17) Monitor LCD 19"	0.259	218.5	121.6	2.7	35.7	0.63
(18) CPU encendida	0.347	221.8	112.2	2.6	50.7	0.66
(18.1) CPU grabando datos	0.578	215.1	127.6	2.3	76.6	0.62
(18.2) CPU STB	0.051	219.0	99.3	2.5	7.1	0.63
(19) Cable-Modem internet	0.080	228.0	31.2	5.3	10.9	0.62
(20) Router WIFI	0.053	225.0	60.0	5.1	9.4	0.79

En las Figuras 5.1.1.22- 31 se muestran las formas de onda de tensión y corriente, y espectros de corriente, de algunos electrodomésticos ensayados. Se puede observar que exceptuando al lavarropas y a una de las heladeras ensayadas, prácticamente todos los electrodomésticos de uso residencial generan armónicos de corriente. Esto se debe a la proliferación de la electrónica de potencia en estos aparatos o dispositivos domésticos.

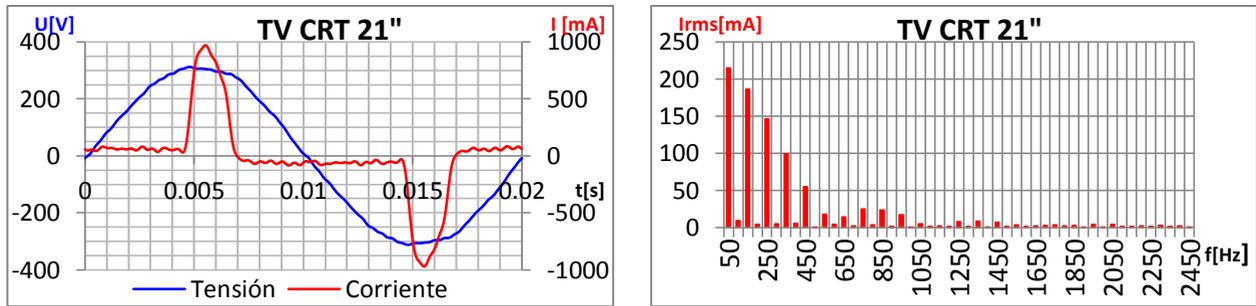


Figura 5.1.1.22. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de un televisor CRT (Tubo de Rayos Catódicos) de 21".

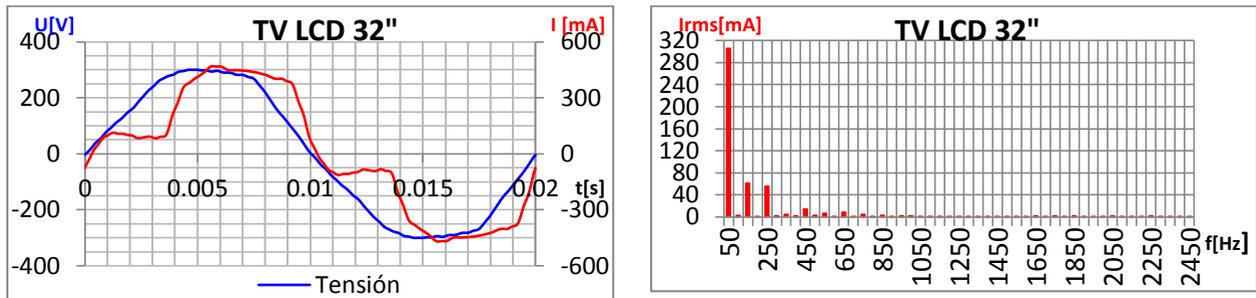


Figura 5.1.1.23. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de un televisor LCD (Display de Cristal Líquido) de 32".

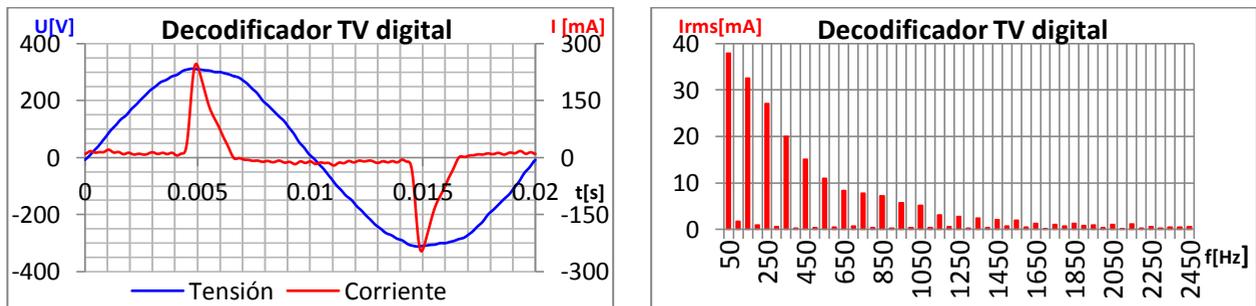


Figura 5.1.1.24. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de un decodificador de televisión digital.

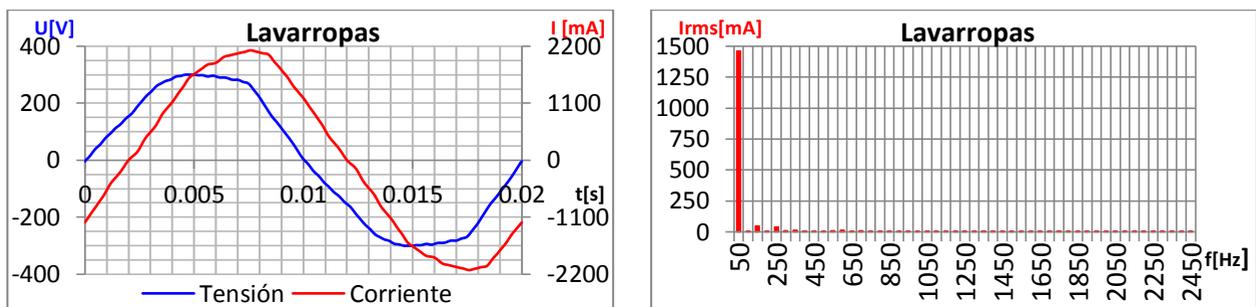


Figura 5.1.1.25. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de un lavarropas.

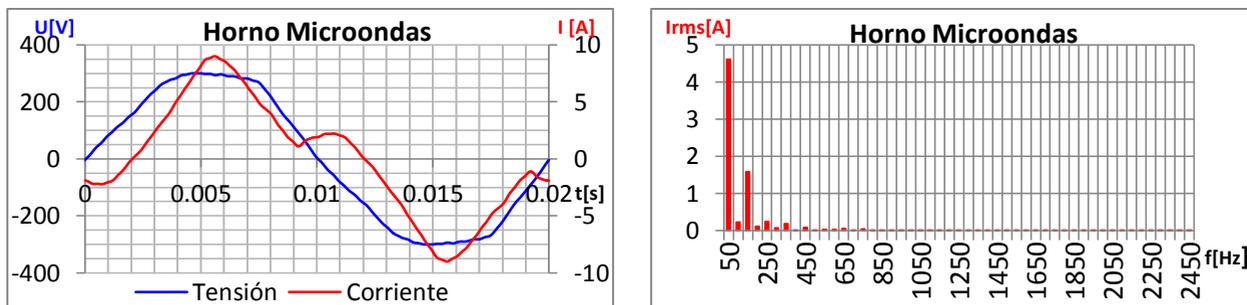


Figura 5.1.1.26. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de un horno a microondas.

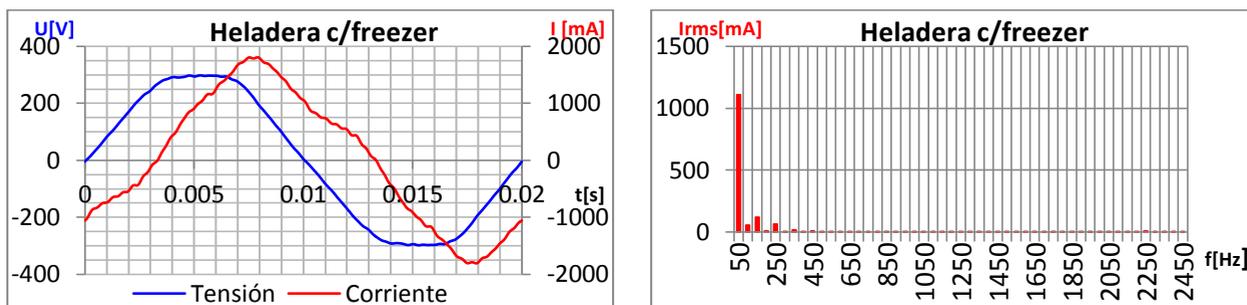


Figura 5.1.1.27. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una heladera con freezer.

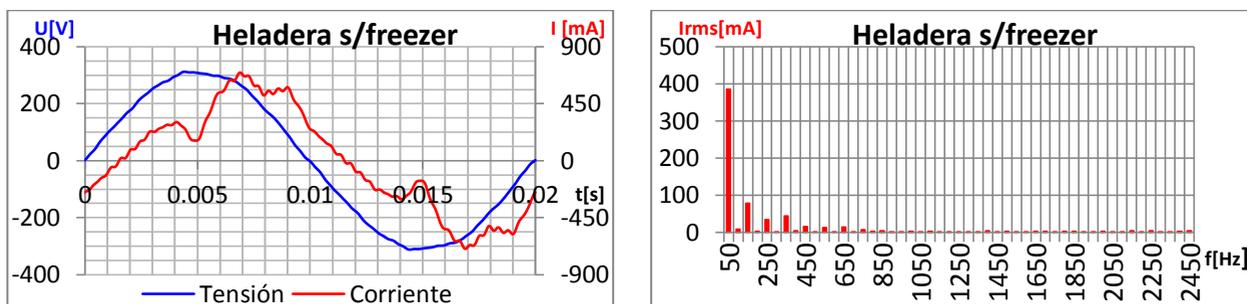


Figura 5.1.1.28. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una heladera sin freezer.

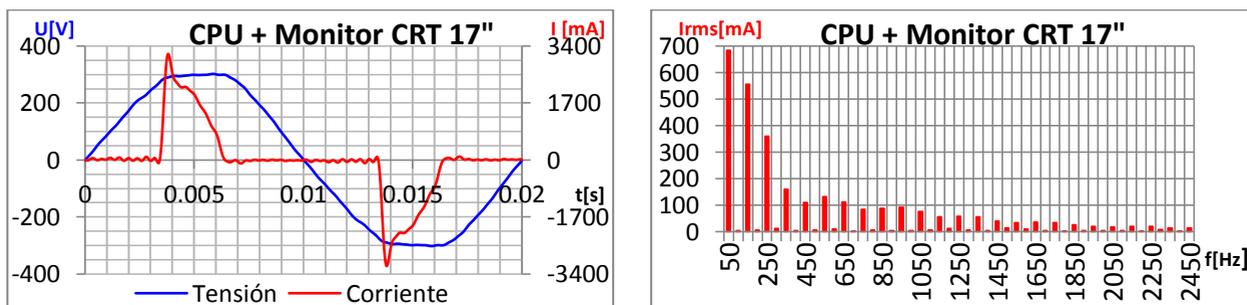


Figura 5.1.1.29. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una computadora personal de escritorio formada por una CPU y un monitor CRT de 17".

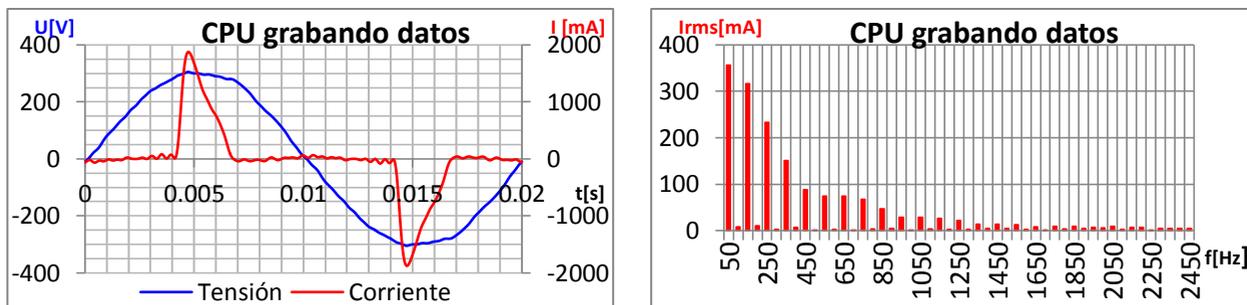


Figura 5.1.1.30. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de una CPU grabando datos.

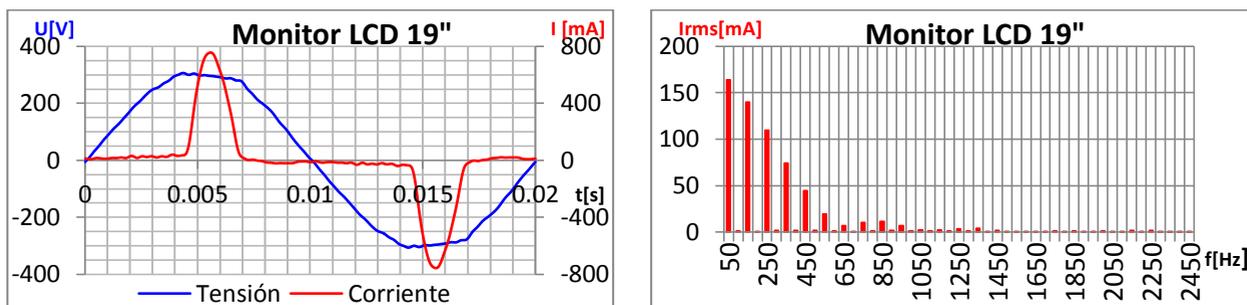


Figura 5.1.1.31. Formas de onda de tensión y corriente, y espectro de corriente de un monitor LCD de 19".

5.1.2. Mediciones combinadas

Cuando se considera un gran número de cargas no lineales, la corriente resultante no es una simple suma aritmética de los componentes armónicos. Hay dos efectos que mitigan en parte el nivel de los armónicos: uno es el conocido como atenuación, que está definido como una disminución en el THDi de la corriente, causado por un incremento en la distorsión de la tensión debido fundamentalmente a la caída de tensión en la impedancia de cortocircuito de la red. El segundo efecto es la diversidad, provocado por las pequeñas desviaciones en los ángulos de fase de los componentes armónicos de las cargas no lineales. Esto conduce a que el vector suma sea menor que la suma aritmética.

El factor diversidad está definido como la relación entre el vector resultante y la suma aritmética de los armónicos para cada armónico. Los efectos diversidad y atenuación han sido ampliamente analizado por la literatura técnica, abarcando las consecuencias en las líneas de distribución [5,13-16].

Con el propósito de evaluar el efecto diversidad de los armónicos de corriente, en el laboratorio se realizaron mediciones combinadas de 10 lámparas LED operando en régimen permanente, es decir, calientes, de iguales características que se resumen en

la Tabla 5.1.2.1. Se observa que a medida que aumenta el número de lámparas conectadas disminuye el índice de distorsión de la corriente (THDi%). Esto se debe a que los ángulos de fase de los armónicos son levemente diferentes debido a las tolerancias en las características de los componentes constitutivos de cada lámpara a pesar de pertenecer a igual modelo y potencia. Por lo tanto se produce una cancelación parcial de armónicos ya que los mismos no se suman algebraicamente, sino fasorialmente. Al conectar todas las lámparas la distorsión de corriente disminuye desde un máximo individual de 185% a 156%, como consecuencia de la dispersión en los valores eficaces y ángulos de fase de los componentes armónicos.

Tabla 5.1.2.1. Ensayo de combinación de lámparas LED de alto rendimiento lumínico.

Lámpara	U [V]	THDU %	THDi %	P [W]	S [VA]	λ fpv	$\cos\phi_1$	I [mA]	I(1) [mA]	I(3) [mA]	I(5) [mA]	I(7) [mA]	I(9) [mA]	I(11) [mA]
LED A1	220.7	3.0	185	9.5	21.7	0.438	0.975	93	44	41	34	28	24	22
LED A1+A2	220.9	3.1	185	18.9	41.4	0.456	0.976	185	88	82	71	56	49	45
LED A1+...+A3	220.7	3.1	180	28.6	61.6	0.463	0.976	277	134	124	106	87	74	67
LED A1+...+A4	220.4	3.0	177	37.9	80.4	0.471	0.978	363	177	164	141	113	99	88
LED A1+...+A5	221.3	3.1	174	47.5	99.3	0.478	0.979	445	221	204	174	143	118	107
LED A1+...+A6	220.6	3.2	167	57.6	116.5	0.491	0.981	524	269	247	209	168	137	117
LED A1+...+A7	221.2	3.3	165	66.9	133.1	0.502	0.983	601	312	286	243	197	159	136
LED A1+...+A8	220.8	3.1	160	77.1	150.3	0.512	0.985	682	362	332	280	223	178	145
LED A1+...+A9	221.6	3.3	159	87.5	169.1	0.518	0.988	759	405	371	414	250	197	163
LEDA1+...+A10	220.1	3.3	156	96.9	185.5	0.521	0.989	834	450	412	347	275	214	172

Cuando se combinan lámparas de distintas potencias y/o tipo de luz (blanco frío y blanco cálido), la distorsión resultante está más cerca de la de menor THDi. Así un THDi% del 144% de una lámpara LED blanco frío de 4[W] (LED A15), combinado con el THDi% del 9% de una lámpara LED blanco cálido de 15[W] (LED A25) resulta una distorsión del 45%, Tabla 5.1.2.2. Mientras que un THDi% del 141% de una lámpara LED blanco cálido de 12[W] (LED A1), combinado con el THDi% del 47% de una lámpara LED blanco cálido de 10[W] (LED A22) resulta en una distorsión del 87% aun cuando es menor el aporte de potencia y corriente de la lámpara de menor THDi%, 45 [mA] frente a los 82 [mA] de la lámpara de mayor THDi%.

Combinando los 8 modelos distintos de lámparas LED cuyos THDi% van desde 9% (LED A25) hasta 168% (LED A15), potencias desde 4[W] (4.9[W] reales), (LED A15) hasta 15[W] (13.5[W] reales), (LED A25) y corrientes desde 45 [mA] (LED A22) hasta 98 [mA] (LED A24) se obtuvo un THDi% total de 101%.

Tabla 5.1.2.2. Distorsión de corriente resultante de combinación de LED.

Lámparas	I_{RMS} [mA]	THD _i [%]	λ fpv	P [W]	S [VA]
LED A1 + A22	113	87	0.686	17.6	25.5
LED A15 + A25	102	45	0.830	19.9	23.5
LED A2 + A11 + A13	205	149	0.547	24.5	45.9
LED A2 + A11 + A13 + A15	247	151	0.525	29.5	55.8
LED A2 + A11 + A13 + A15 + A22 + A24	360	122	0.607	49.2	81.1
LED A2 + A11 + A13 + A15 + A22 + A24 + A25 + G1	471	101	0.670	70.1	104.7
LED A1 + A2 + A25 + A26	265	64	0.806	47.5	59.0
LED A1 + A2 + A25 + A26 + A21 + A22	328	46	0.856	62.5	73.2

En las Figuras 5.1.2.1- 2 se observa que la forma de onda resultante de la corriente total cuando están todas las lámparas conectadas, no es simétrica. Sin embargo la asimetría no es suficientemente grande como para que aparezcan armónicos pares de magnitud comparable con los impares, por tanto como sucede usualmente con las formas de onda simétricas prevalecen en mayor medida armónicos impares.

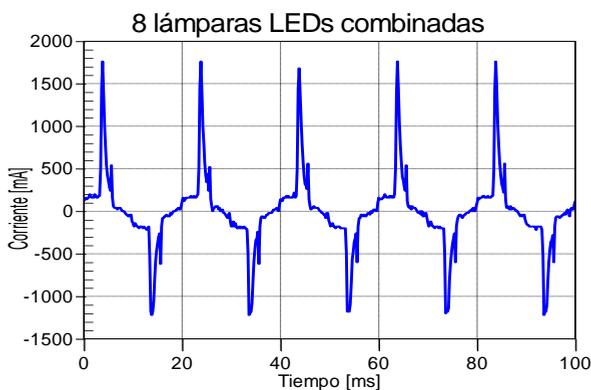


Figura 5.1.2.1. Forma de onda de la corriente de 8 lámparas LED de distintos modelos, color de luz y potencias ensayadas, conectadas simultáneamente.

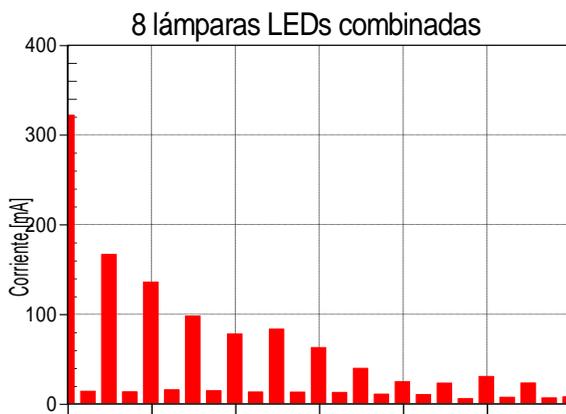


Figura 5.2.1.2. Espectro armónico de valores eficaces de la onda de corriente de las 8 lámparas LED de distintos modelos, color de luz y potencias ensayadas, conectadas simultáneamente.

CAPÍTULO 6

Encuesta energética a usuarios residenciales

6.1. Metodología

Hacia mitad del año 2012, se realizó una encuesta en 61 hogares de la Ciudad de Mar del Plata, encuadrados en la categoría tarifaria T1R-Residencial (menos de 10 kW de demanda, 100% del total de usuarios).

La encuesta fue realizada por el Grupo de Investigación LAT, para desarrollar trabajos de investigación como el presente, sobre calidad de la energía, eficiencia energética y uso racional de la energía. La misma se encuentra en el Anexo 3.

Fue entregada a cada usuario aproximadamente durante una semana, quién la completó en su domicilio. Una vez recogidas las mismas, los datos se ingresaron en una planilla de cálculo de Excel a través de un formulario realizado en Visual Basic. Luego los datos fueron procesados a través de macros programadas en el mencionado programa, se obtuvieron así las tablas y gráficos presentados en este capítulo.

6.2. Contenido

En la encuesta se recabó información sobre el consumo energético residencial. Se relevó información acerca de:

- Tipo de vivienda y superficie de la misma.
- Cantidad de habitantes.
- Iluminación (cantidad, tipo, potencia y horas de utilización de lámparas en cada ambiente de la vivienda).
- Artefactos domésticos de gran utilización (cantidad, tipo, tamaño, eficiencia energética, potencia, y horas de utilización).
- Conocimiento sobre contaminación de las LFC desechadas y destino final de las mismas.
- Consumo bimestral a lo largo del año leído en la factura del suministro de energía eléctrica.
- Nivel educacional de los habitantes de la vivienda.
- Conocimiento sobre ahorro energético.

6.3. Resultados principales

El consumo promedio anual expresado mensualmente de los usuarios encuestados es de 170 [kWh/mes].

6.3.1. Iluminación

El relevamiento arrojó un total de 1258 lámparas (41679 [W]), distribuidas de la siguiente manera (Figuras 6.3.1 y 6.3.2):

- 18 % de lámparas incandescentes (13330 [W]),
- 11 % de lámparas halógenas (7240 [W]),
- 44 % de LFC (9105 [W]),
- 9 % tubos fluorescentes (4136 [W]),
- 14 % de lámparas dicróicas (7650 [W]) y,
- 4 % de lámparas LED (218 [W]).

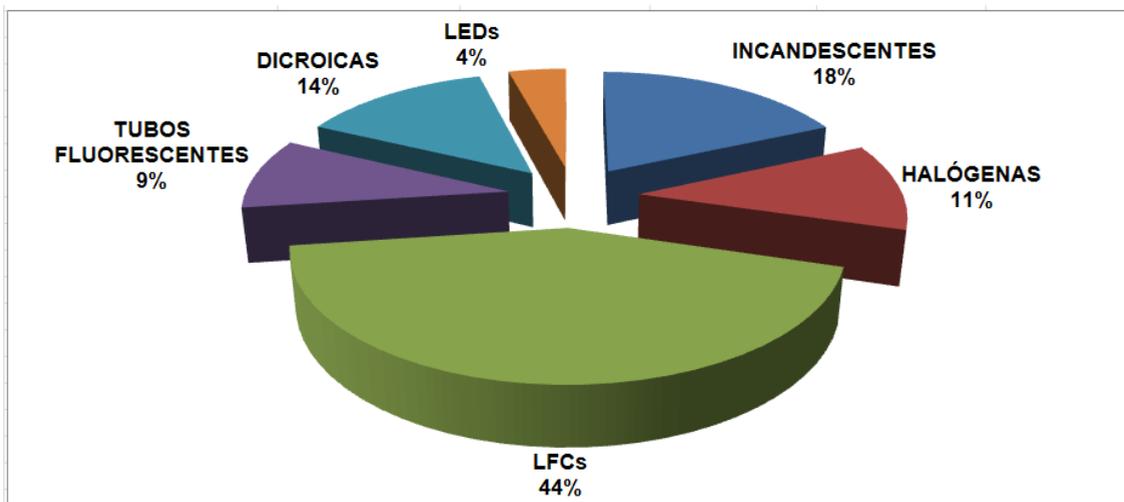


Figura 6.3.1.1. Distribución de lámparas en instalaciones residenciales.

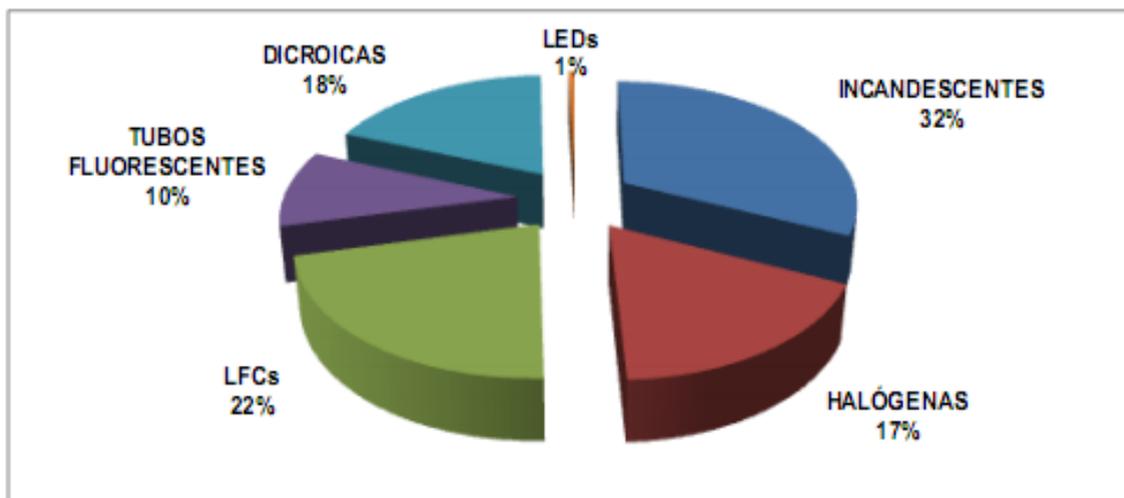


Figura 6.3.1.2. Distribución de potencias de lámparas en instalaciones residenciales.

A partir de estos datos relevados por la encuesta se puede proponer una “vivienda media” con la siguiente distribución de luminarias:

Tabla 6.3.1.1. Distribución teórica de luminarias de una vivienda media.

Valores totales		
Nº usuarios	Nº lámparas	Potencia [W]
61	1258	41679
Valores promedios por usuario		
Nº usuarios	Nº lámparas	Potencia [W]
1	21	683
Distribución de lámparas por usuario		
Tipo	Nº lámparas	Potencia [W]
Incandescente	4	219
Halógena	2	116
LFC	9	150
Tubo Fluorescente	2	68
Dicroica	3	123
LED	1	7

Teniendo en cuenta las potencias nominales de las lámparas que han sido ensayadas se elige la siguiente distribución:

- Incandescentes: 1 x 100 [W] + 1 x 60 [W] + 1 x 40 [W] + 1 x 25 [W].
- Halógenas: 1 x 70 [W] + 1 x 42 [W].
- LFC: 1 x 36 [W] + 1 x 26 [W] + 1 x 20 [W] + 1 x 18 [W] + 1 x 15 [W] + 4 x 11 [W].
- Tubos fluorescentes: 1 x 40 [W] + 1 x 20 [W].
- Dicroicas: 2 x 50 [W] + 1 x 20 [W].
- LED: 1 x 7 [W].

Tabla 6.3.1.2. Distribución adoptada de lámparas de una vivienda media.

Valores promedios por usuario		
Nº usuarios	Nº lámparas	Potencia [W]
1	21	683
Distribución de lámparas por usuario		
Tipo	Nº lámparas	Potencia [W]
Incandescente	4	225
Halógena	2	112
LFC	9	159
Tubo Fluorescente	2	60
Dicroica	3	120
LED	1	7

6.3.2. Artefactos domésticos

- Clasificación de **televisores** en las viviendas encuestadas:

Tablas 6.3.2.1 y 6.3.2.2. Clasificación de televisores.

Nº usuarios	Cantidad	
	Tubo (CRT)	LCD
61	96	31
	Porcentaje %	
	75.6	24.4
	unidades/usuario	
	1.57	0.51

Unidades	Tamaño						Total
	14"	21"	24"	29"	32"	40"	
Tubo (CRT)	9	56	9	16	5	1	96
LCD	0	2	3	0	21	5	31

Se observa que actualmente el 75,6 % de los televisores son a Tubo (CRT) (1,57 unidades por usuario), de los cuáles, un 58,3 % son de 21"; mientras que el 24,4 % son del tipo LCD y LED (0,51 unidades por usuario), de los cuáles un 67,7 % son de 32". En función de estos datos, se considerará que un hogar medio dispone de **1 TV CRT de 21"** (fd = 1,57) y **1 TV LCD de 32"** (fd = 0,51), siendo fd, un factor de disposición que se aplicará durante la simulación de las cargas residenciales, el cual está asociado a la cantidad de equipos que dispone cada usuario. Por ejemplo en este caso, fd aplicado a cada tipo de televisor indica que hay 157 televisores CRT y 51 televisores LCD cada 100 usuarios.

- Clasificación de **equipos de música**:

Tablas 6.3.2.3 y 6.3.2.4. Clasificación de equipos de música.

Nº usuarios	Cantidad	
	radio-grabador	minicomponente
61	19	18
	Porcentaje %	
	51.4	48.6
	unidades/usuario	
	0.31	0.30

Unidades	Tamaño		Total
	chico	grande	
radio-grabador	16	3	19
minicomponente	10	8	18

Se considerará que un hogar medio dispone de **1 radio-grabador chico** (fd = 0,61), si bien esta suposición es aproximada con respecto a los datos de la encuesta, estos equipos son de baja potencia y en general se utilizan poco durante la noche, en cuyo

momento se realizarán las simulaciones, por lo que incidirán muy poco en los resultados.

- Clasificación de **lavarropas**:

Tablas 6.3.2.5 y 6.3.2.6. Clasificación de lavarropas.

Nº usuarios	Cantidad	
	semi-automático	automático
61	8	48
	Porcentaje %	
	14.3	85.7
	unidades/usuario	
	0.13	0.79

Unidades	Logica Fuzzy		Tamaño [litros]			Total
	si	no	6	8	13	
semi-automático	0	8	6	2	0	8
automático	15	33	21	20	7	48

Se observa que actualmente el 85,7 % de los lavarropas son automáticos (0,79 unidades por usuario), de los cuáles, un 85,4 % son menores a 8 litros. Por lo mencionado se considerará que un hogar medio dispone de **1 lavarropas automático de tamaño intermedio** (fd = 0,92).

- Clasificación de **microondas**:

Tablas 6.3.2.7 y 6.3.2.8. Clasificación de microondas.

Nº usuarios	Cantidad	
	analógico	digital
61	9	37
	Porcentaje %	
	19.6	80.4
	unidades/usuario	
	0.15	0.61

Unidades	Tamaño		Total
	20 litros	25 litros	
analógico	6	3	9
digital	24	13	37

El 80,4 % de los microondas son digitales (0,61 unidades por usuario), y el 19,6 % restante son microondas analógicos (0,15 unidades por usuario), de los cuáles la mayor parte son de 20 litros. Dado que en cuanto al funcionamiento no hay una notoria diferencia entre ambas tecnologías, se considera que un hogar medio dispone de **1 microondas de 20 litros** (fd = 0,76).

- Clasificación de **heladeras**:

Tablas 6.3.2.9 y 6.3.2.10. Clasificación de heladeras.

Nº usuarios	Cantidad		
	c/freezer	s/freezer	freezer sólo
61	49	12	7
	Porcentaje %		
	72.1	17.6	10.3
	unidades/usuario		
	0.80	0.20	0.11

Unidades	Etiqueta de eficiencia		Tamaño [litros]			Total
	si	no	100	250	350	
c/freezer	21	28	2	22	25	49
s/freezer	1	11	2	10	0	12
freezer sólo	1	6	3	3	1	7

Se observa que actualmente el 72,1 % de las heladeras son con freezer (0,80 unidades por usuario), de las cuáles, un 95,9 % son de tamaño igual o superior a 250 litros; mientras que el 17,6 % son sin freezer (0,20 unidades por usuario), de las cuales un 83,3 % son de 250 litros; y un 10,3 % son freezers solos (0,11 unidades por usuario), de los cuáles el 85,7 % son de tamaño igual o inferior a 250 litros. En función de estos datos, se considerará que un hogar medio dispone de **1 heladera con freezer** ($fd = 0.91$) y **1 heladera sin freezer** ($fd = 0.09$), **ambas de tamaño intermedio**. Ambos factores fd representan que hay 0,8 heladeras con freezer por usuario, 0,2 heladeras sin freezer por usuario y 0,11 freezers solos por usuarios, es decir, 80, 20 y 11 unidades cada 100 usuarios respectivamente. Para simplificar, los 11 freezers se combinaron con 11 de las 20 heladeras sin freezer, dando un equivalente de 11 heladeras con freezer adicionales y 11 heladeras sin freezer menos.

- Clasificación de **computadoras personales**:

Tablas 6.3.2.11 y 6.3.2.12. Clasificación de computadoras personales.

Nº usuarios	Cantidad	
	PC escritorio	PC Portátil
61	57	39
	Porcentaje %	
	59.4	40.6
	unidades/usuario	
	0.93	0.64

Unidades	Tamaño de pantalla			Total
	10"	14"	17"	
PC escritorio	-	-	-	57
PC Portátil	9	25	5	39

- Clasificación de **monitores**:

Tablas 6.3.2.13 y 6.3.2.14. Clasificación de monitores.

Nº usuarios	Cantidad	
	Tubo (CRT)	LCD-LED
61	27	30
	Porcentaje %	
	47.4	52.6
	unidades/usuario	
	0.44	0.49

Unidades	Tamaño de pantalla				Total
	14"	17"	19"	21"	
Tubo CRT	6	20	1	0	27
LCD-LED	5	4	15	6	30

El 59,4 % de las PCs son de escritorio (0,93 unidades por usuario), de sus monitores el 52,6 % son LCD-LED (0,49 unidades por usuario), predominantemente de 19", y el 47,4 % restante son del tipo CRT (0,44 unidades por usuario), predominantemente de 17". Mientras que el 40,6 % de las PCs son portátiles (0,64 unidades por usuario), de las cuales el 64 % tienen pantallas de 14". Por lo mencionado se considerará que un hogar medio dispone de **1 PC de escritorio** (fd = 0,93) + **1 monitor LCD de 19"** (fd = 0,49) + **1 monitor CRT de 17"** (fd = 0,44) + **1 PC portátil con pantalla de 14"** (fd = 0,64).

Con respecto a los equipos de aire acondicionado, hay solo 3 equipos en 61 usuarios (0,05 unidades por usuario), por lo que no se consideran en las simulaciones. Con respecto a los equipos de calefacción eléctricos, tales como estufas halógenas o paneles ecológicos, su cantidad no es muy grande, solo 6 estufas halógenas y 6 paneles ecológicos en 61 usuarios (0,1 estufas y 0,1 paneles por usuario), y además su utilización es estacional, por lo que tampoco serán considerados en las simulaciones.

Finalmente, a partir de estos datos relevados por la encuesta se puede proponer una "vivienda media" con la siguiente cantidad de artefactos domésticos:

Tabla 6.3.2.15. Cantidad de artefactos domésticos.

Cantidad	Aparato doméstico	Factor de disposición (fd)
1	TV CRT 21"	1,57
1	TV LCD 32"	0,51
1	radio-grabador chico	0,61
1	lavarropas aut. mediano	0,92
1	microondas de 20 lt	0,76
1	heladera c/freezer	0,91
1	heladera s/freezer	0,09
1	PC de escritorio	0,93
1	monitor LCD 19"	0,49
1	monitor CRT 17"	0,44
1	PC portátil 14"	0,64

Los datos obtenidos de esta encuesta han permitido conocer la cantidad y características de los aparatos domésticos e iluminación en instalaciones residenciales de la ciudad de Mar del Plata. Estos datos serán utilizados para modelar y simular usuarios residenciales en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 7

Modelado y simulación de cargas residenciales y redes de distribución

7.1. Modelado de cargas residenciales

A partir de los datos obtenidos de la encuesta a usuarios residenciales, presentados en el capítulo anterior, se determinó la cantidad, potencia y tipo de lámparas y aparatos domésticos presentes en un usuario residencial promedio.

En base a esta descripción de la carga eléctrica instalada en una instalación residencial promedio, se propone ahora el análisis de la carga residencial durante el periodo comprendido entre las 19 y 22 hs, horario de mayor carga [27], planteando tres escenarios, uno con la distribución actual de luminarias combinadas con equipos y aparatos domésticos, y dos escenarios futuros, manteniendo los mismos equipos y aparatos domésticos, pero reemplazando las lámparas incandescentes, halógenas y dicróicas por lámparas LFC y LED respectivamente.

Estos escenarios serán utilizados para realizar la simulación de una red eléctrica con carga preferentemente residencial.

7.1.1. Determinación de la carga de equipos y aparatos domésticos

Se debe tener en cuenta que de la carga instalada, solo una parte estará conectada en forma simultánea en los tres escenarios, entre las 19 y 22 hs, periodo en el que se realiza la simulación. Es por esto que se deben tener en cuenta coeficientes de simultaneidad, los cuáles se pueden estimar en función del tipo de electrodoméstico y la cantidad de los mismos.

Si bien, las cantidades de electrodomésticos están en el orden de unas pocas unidades por usuario, estos coeficientes utilizados, que tal vez carecen de sentido a la hora de analizar un usuario real individual, adquieren sentido lógico cuando se analizan en forma global a través de un usuario promedio, considerando que sucede cuando en una red hay muchos usuarios conectados en forma simultánea. Para ser más claro se expondrá un ejemplo. El factor de simultaneidad de un **usuario real** aplicado a un televisor puede valer 0 o 1 si se analiza en **forma individual**, puesto que podrá tener apagado o encendido el mismo respectivamente. Mientras que tal vez, el factor de simultaneidad de un **usuario promedio** pueda valer 0,6 si se analiza de manera global, esto significa que de 10 usuarios, solo 6 tienen el televisor encendido, por lo que un usuario promedio tiene 0,6 televisores encendidos.

El producto de los coeficientes de simultaneidad por los factores de disposición permitirá determinar la carga total de equipos y aparatos domésticos de un usuario promedio. En la Tabla 7.1.1.1. se presentan los valores mencionados.

Tabla 7.1.1.1. Cantidad de equipos y aparatos domésticos.

Aparato doméstico	Factor de disposición (fd)	Coef. de simultaneidad (cs)	Cantidad c/10 usuarios
TV CRT 21"	1.57	0.50	8
TV LCD 32"	0.51	0.50	3
radio-grabador chico	0.61	0.15	1
lavarropas aut. mediano	0.92	0.10	1
microondas de 20 lt	0.76	0.30	2
heladera c/freezer	0.91	0.70	6
heladera s/freezer	0.09	0.70	1
PC de escritorio	0.93	0.45	4
monitor LCD 19"	0.49	0.45	2
monitor CRT 17"	0.44	0.45	2
PC portátil 14" (cargador)	0.64	0.30	2

7.1.2. Determinación de la carga de iluminación en los tres escenarios

En los tres escenarios se considerará un coeficiente de simultaneidad de iluminación para un usuario promedio igual a 0,5, entre las 19 y 22 hs., horario de mayor encendido de las lámparas.

Escenario 1: (Lámparas incandescentes, halógenas, LFC, fluorescentes, dicróicas y LED)

Corresponde a la distribución actual de un usuario promedio relevada en la encuesta.

Distribución de lámparas:

- Incandescentes: 1 x 100 [W] + 1 x 60 [W] + 1 x 40 [W] + 1 x 25 [W].
- Halógenas: 1 x 70 [W] + 1 x 42 [W].
- LFC: 1 x 36 [W] + 1 x 26 [W] + 1 x 20 [W] + 1 x 18 [W] + 1 x 15 [W] + 4 x 11 [W].
- Tubos fluorescentes: 1 x 40 [W] + 1 x 20 [W].
- Dicróicas: 2 x 50 [W] + 1 x 20 [W].
- LED: 1 x 7 [W].

Tabla 7.1.2.1. Distribución de lámparas de una vivienda media, ESCENARIO 1.

Valores promedios por usuario		
Nº usuarios	Nº lámparas	Potencia [W]
1	21	683
Distribución de lámparas por usuario		
Tipo	Nº lámparas	Potencia [W]
Incandescente	4	225
Halógena	2	112
LFC	9	159
Tubo Fluorescente	2	60
Dicróica	3	120
LED	1	7

Escenario 2: (Reemplazando lámparas incandescentes, halógenas y dicroicas por LFC)

Reemplazando en “la vivienda media” las lámparas incandescentes por 1 LFC de 20[W], 1 LFC de 15 [W] y 2 LFC de 11 [W] c/u; las halógenas por 1 LFC de 20 [W] y 1 LFC de 15 [W]; y las dicroicas por 3 LFC de 11 [W] c/u, manteniendo el mismo nivel de iluminancia.

Distribución de lámparas:

- LFC: 1 x 36 [W] + 1 x 26 [W] + 3 x 20 [W] + 1 x 18 [W] + 3 x 15 [W] + 9 x 11 [W].
- Tubos fluorescentes: 1 x 40 [W] + 1 x 20 [W].
- LED: 1 x 7 [W].

Tabla 7.1.2.2. Distribución de lámparas de una vivienda media, ESCENARIO 2.

Valores promedios por usuario		
Nº usuarios	Nº lámparas	Potencia [W]
1	21	351
Distribución de lámparas por usuario		
Tipo	Nº lámparas	Potencia [W]
LFC	18	284
Tubo Fluorescente	2	60
LED	1	7

Escenario 3: (Reemplazando lámparas incandescentes, halógenas, dicroicas, LFC y fluorescentes por LED)

Reemplazando en la “vivienda media” las lámparas incandescentes por 6 LED A13 de 7[W]c/u; las halógenas por 3 LED A13 de 7[W]c/u; los tubos fluorescentes por 3 LED A1 de 12[W] c/u; las LFC por 17 LED A13 de 7[W] c/u; y las dicroicas por 3 LED A15 de 4[W] c/u, manteniendo el mismo nivel de iluminancia.

Distribución de lámparas:

- LED: 27 x 7[W] + 3 x 12[W] + 3 x 4 [W].

Tabla 7.1.2.3. Distribución de lámparas de una vivienda media, ESCENARIO 3.

Valores promedios por usuario		
Nº usuarios	Nº lámparas	Potencia [W]
1	33	237
Distribución de lámparas por usuario		
Tipo	Nº lámparas	Potencia [W]
LED	33	237

7.2. Simulación de cargas residenciales

Una vez determinadas las cargas de iluminación y aparatos domésticos de un usuario promedio, se realizaron simulaciones en el programa ATPDraw para obtener las formas de onda de corriente de las mismas.

Las cargas están constituidas por lámparas y aparatos domésticos, previamente ensayados en el laboratorio, cuyos resultados se presentaron en el capítulo 7. Cada lámpara o aparato doméstico fue modelado con una fuente de corriente que representa a la componente fundamental y a sus componentes armónicas. Combinando las lámparas y aparatos domésticos en las correspondientes proporciones recién calculadas y teniendo en cuenta los coeficientes de simultaneidad planteados, se realizaron simulaciones en el dominio del tiempo, y se obtuvieron las mencionadas cargas. Los resultados son presentados a continuación.

En las Figuras 7.2.1, 7.2.3 y 7.2.5 se muestran las formas de onda de la tensión, de la corriente absorbida por los aparatos domésticos, de la corriente absorbida por iluminación y de la corriente total, correspondientes a un usuario residencial promedio en los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.

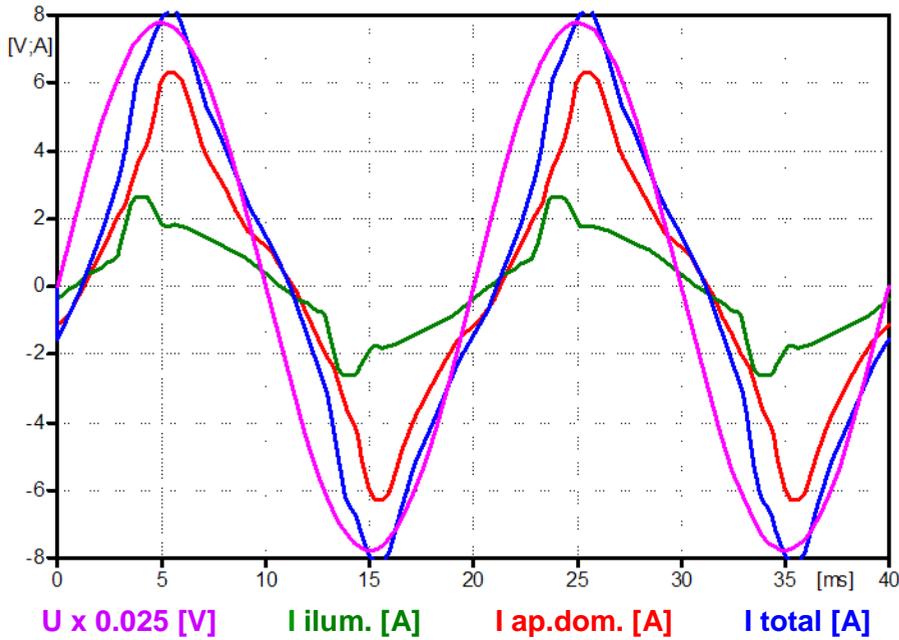
En las Figuras 7.2.2, 7.2.4 y 7.2.6 se muestran los espectros de la corriente absorbida por los aparatos domésticos, de la corriente absorbida por iluminación y de la corriente total, correspondientes a un usuario residencial promedio en los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.

En las Tablas 7.2.1, 7.2.4 y 7.2.7 se muestran los valores pico, eficaz, fundamental, factor de cresta e índice de distorsión de la tensión y corriente total; el factor de desplazamiento, factor de distorsión, verdadero factor de potencia, así como la potencia activa, reactiva, aparente, de distorsión, ficticia y no reactiva, para cada uno de los escenarios respectivamente.

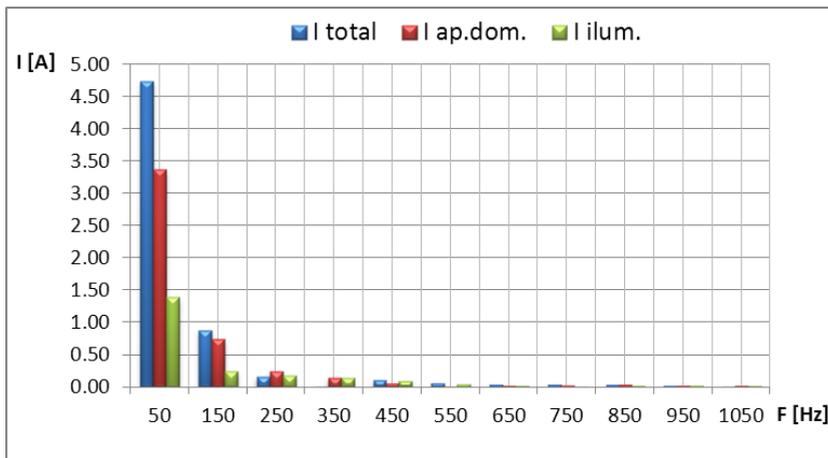
En las Tablas 7.2.2, 7.2.5 y 7.2.8 se muestran los primeros 21 armónicos de la corriente total para cada uno de los escenarios respectivamente, expresados en valor eficaz y como porcentaje de la componente fundamental.

Por último, en las Tablas 7.2.3, 7.2.6 y 7.2.9 se muestran los valores eficaces, fundamentales e índices de distorsión de la corriente total, de aparatos domésticos y de iluminación.

Escenario 1: (Figuras 7.2.1 y 7.2.2; Tablas 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3)



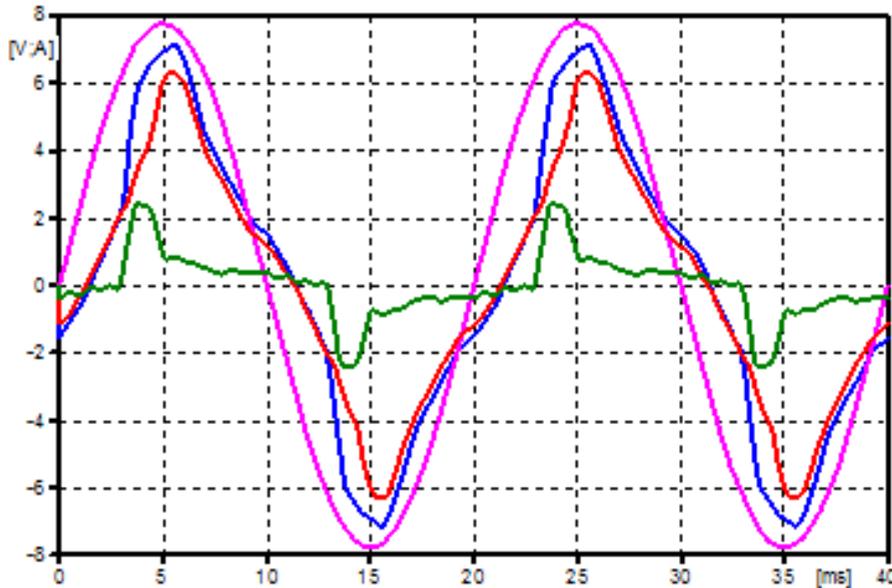
Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.91	311.00
U1[V]	FCu
219.91	1.41
THDu%	
0.00	
Corriente	
Irms[A]	Imax[A]
4.83	8.10
I1[A]	Fci
4.74	1.68
THDi%	
19.07	
Potencia	
FD	cosφ1
0.98	0.97
	inductivo
FP = λ	P1[W]
0.95	1011.00
Q1[VAr]	S1[VA]
254.58	1042.56
P[W]	S[VA]
1011.00	1061.36
D[VA]	N[VA]
198.87	1030.37
F[VA]	
323.05	



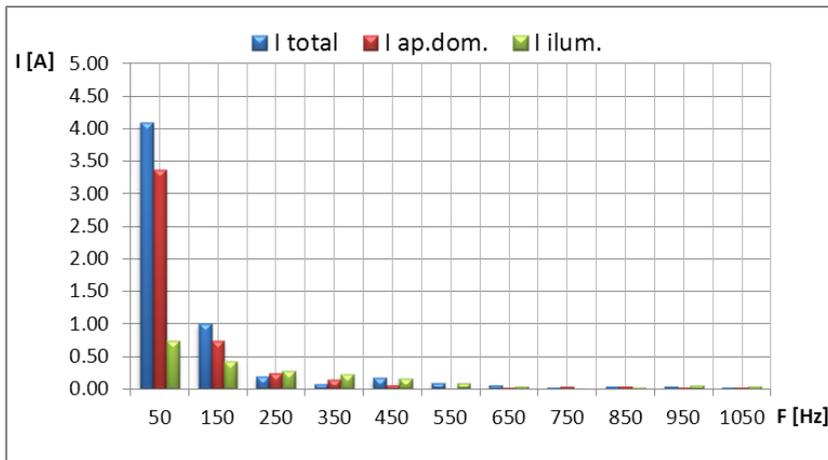
f [Hz]	I RMS [A]	I % fund.
50	4.741	100.00
150	0.876	18.48
250	0.166	3.50
350	0.009	0.19
450	0.116	2.44
550	0.064	1.34
650	0.042	0.89
750	0.040	0.84
850	0.036	0.77
950	0.021	0.44
1050	0.010	0.21

	Ap. Dom.	I lum.	Total
THDi f%	23.74	25.97	19.07
I RMS [A]	3.46	1.43	4.83
I Fund. [A]	3.36	1.39	4.74

Escenario2: (Figuras 7.2.3 y 7.2.4; Tablas 7.2.4, 7.2.5 y 7.2.6)



U x 0.025 [V] I ilum. [A] I ap.dom. [A] I total [A]

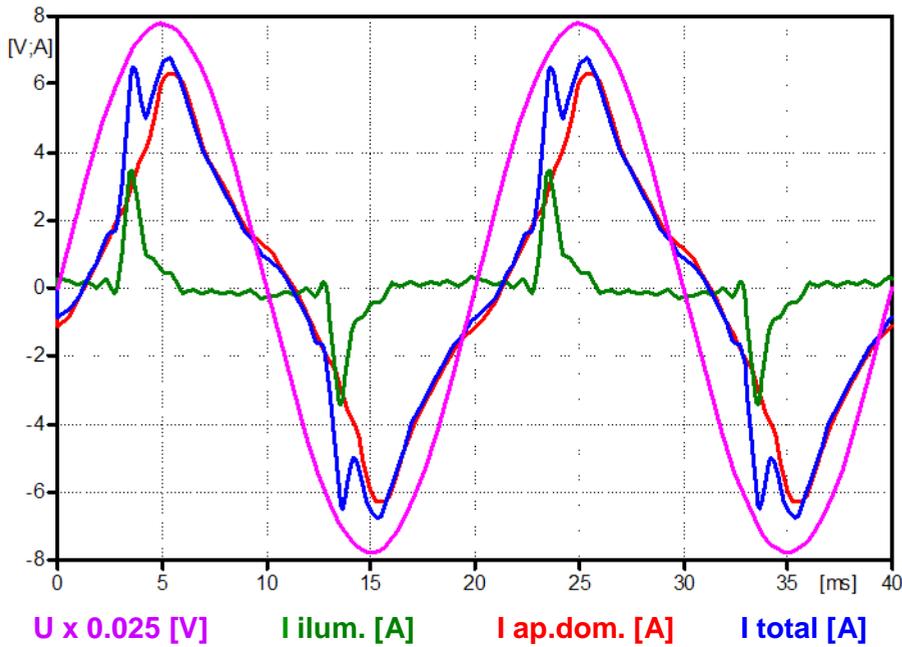


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.91	311.00
U1[V]	FCu
219.91	1.41
THDu%	
0.00	
Corriente	
Irms[A]	Imax[A]
4.23	7.16
I1[A]	Fci
4.10	1.69
THDi%	
25.60	
Potencia	
FD	cosφ1
0.97	0.97
	inductivo
FP = λ	P1[W]
0.94	870.14
Q1[VA]	S1[VA]
234.47	901.18
P[W]	S[VA]
870.14	930.24
D[VAd]	N[VA]
230.70	900.21
F[Vaf]	
328.94	

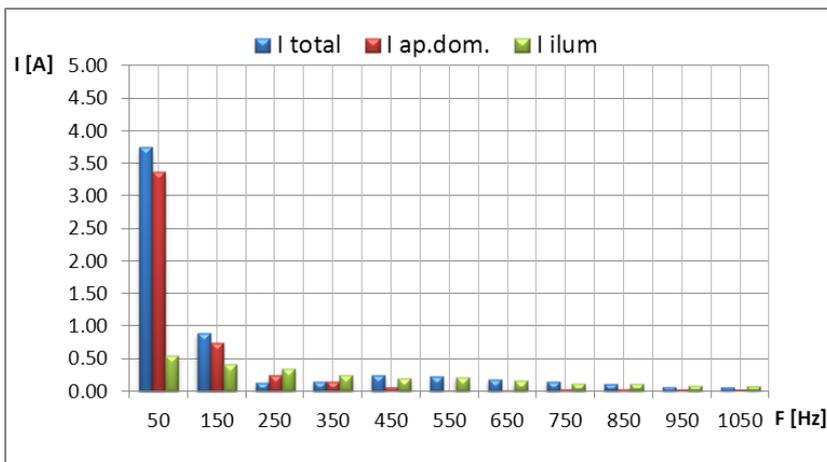
f [Hz]	I RMS [A]	I % fund.
50	4.098	100.00
150	1.003	24.47
250	0.199	4.85
350	0.083	2.03
450	0.173	4.22
550	0.098	2.39
650	0.060	1.47
750	0.033	0.80
850	0.042	1.03
950	0.039	0.95
1050	0.031	0.76

	Ap. Dom.	Ilum.	Total
THDi f%	23.74	80.74	25.60
I RMS [A]	4.89	1.34	5.98
I Fund. [A]	3.36	0.74	4.10

Escenario 3: (Figuras 7.2.5 y 7.2.6; Tablas 7.2.7, 7.2.8 y 7.2.9)



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.91	311.00
U1[V]	FCu
219.91	1.41
THDu%	
0.00	
Corriente	
Irms[A]	Imax[A]
3.88	6.75
I1[A]	Fci
3.75	1.74
THDi%	
27.06	
Potencia	
FD	cosφ1
0.97	0.98
	inductivo
FP = λ	P1[W]
0.95	811.48
Q1[VA]	S1[VA]
145.47	824.42
P[W]	S[VA]
811.48	854.07
D[VAd]	N[Van]
223.08	841.59
F[Vaf]	
266.32	



f [Hz]	I RMS [A]	I % fund.
50	3.749	100.00
150	0.892	23.79
250	0.136	3.63
350	0.151	4.02
450	0.254	6.78
550	0.229	6.12
650	0.182	4.86
750	0.148	3.95
850	0.110	2.95
950	0.068	1.82
1050	0.058	1.55

	Ap. Dom.	I lum.	Total
THDi f%	23.74	129.52	27.06
I RMS [A]	4.89	1.27	5.49
I Fund. [A]	3.36	0.55	3.75

7.3. Modelado de redes de distribución

Como se expuso al comienzo, el fin de este trabajo es investigar la influencia que tendrá en los índices de la calidad de la energía, el incremento progresivo de lámparas con alto contenido de componentes armónicos que irán reemplazando a las incandescentes que actúan como cargas lineales puras.

Para analizar el impacto de estas cargas no lineales en una red de distribución de energía eléctrica, se modeló un tramo de red de la ciudad de Balcarce, cuya carga es preferentemente residencial, para luego simularla con los tres escenarios planteados y analizar los índices de distorsión de tensión (THDv%) y corriente (THDI%) en distintos puntos de la misma.

El tramo de red seleccionado para este análisis consta de un alimentador de Media Tensión (MT) alimentado por la estación transformadora principal de la ciudad que toma energía de la red de Alta Tensión (AT) interconectada a nivel nacional. Este alimentador de MT alimenta a 11 subestaciones transformadoras que reducen a Baja Tensión (BT), y alimentan a una gran cantidad de usuarios residenciales.

En la Figura 7.3.1 se observa una imagen satelital de la zona urbana bajo estudio.



Figura 7.3.1. Imagen satelital de la zona urbana bajo estudio.

En las Figuras 7.3.2 y 7.3.3 se observa la red radial de MT, alimentador bajo análisis, la cual está unida a otras redes a través de seccionadores normalmente abiertos (NA) formando un anillo abierto.

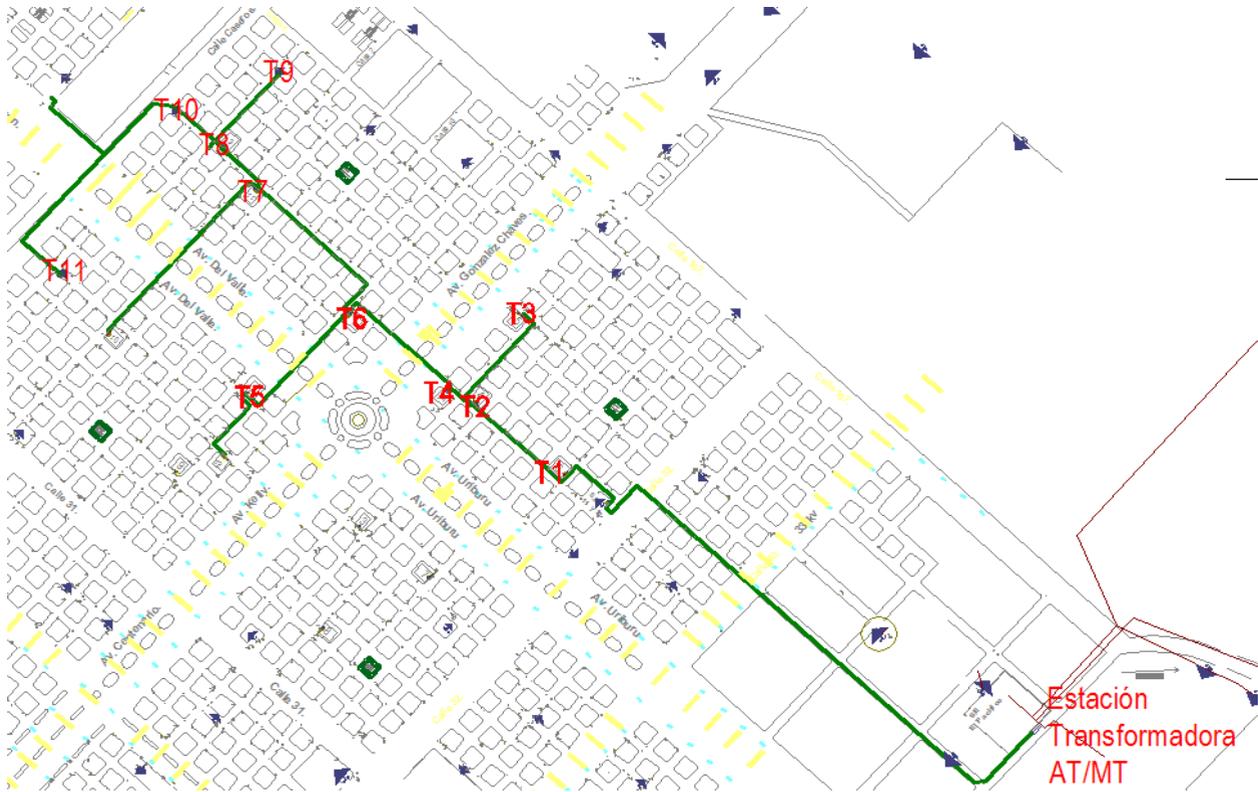


Figura 7.3.2. Alimentador de Media Tensión, zona Norte y Este de la ciudad de Balcarce.

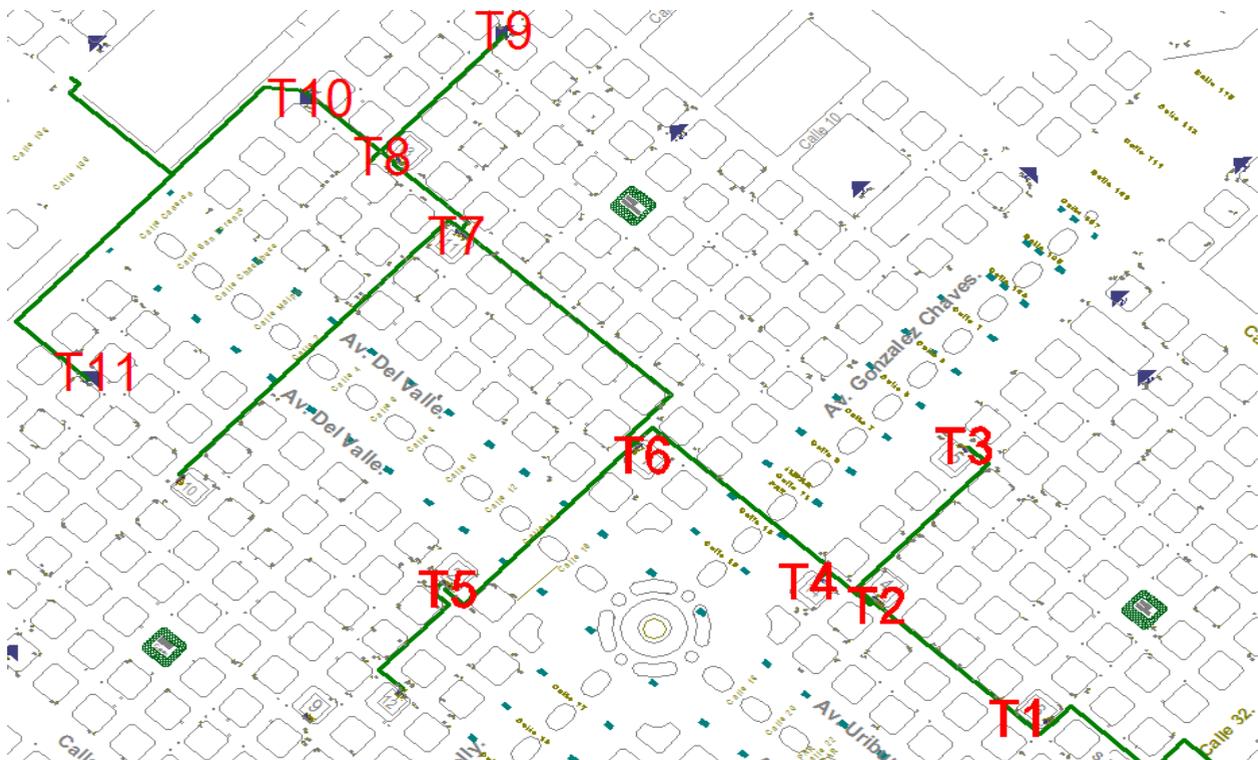


Figura 7.3.3. Ampliación del alimentador de Media Tensión, zona Norte y Este de la ciudad de Balcarce. Se observan en rojo las 11 subestaciones transformadoras MT/BT alimentadas.

7.3.1. Transformadores

Para dimensionar los transformadores se utiliza el programa Tradim, creado por Prof. Jorge Sacchi (Departamento de Electrotecnia, U.N.L.P), el cual permite ingresar los valores de tensión, potencia, n° de fases, conexión de los bobinados de cada arrollamiento, flujo magnetizante, relación de pérdidas, y demás parámetros opcionales mediante un archivo.DAT. Al ejecutar el programa se obtienen todos los parámetros requeridos para el programa ATPDraw.

Si bien las simulaciones en el ATPDraw se realizarán en el dominio del tiempo, dado que en la solución hay armónicos de tensión y corriente, se debe considerar la rama magnetizante de los transformadores en la región lineal, pues las alinealidades traen consigo errores numéricos.

En la Tabla 7.3.1.1 se presentan los datos de los transformadores que constituyen la red en estudio, estos fueron obtenidos de un plano georreferenciado, comúnmente conocido como GIS (Geographic Information System).

Tabla 7.3.1.1. Datos de los transformadores extraídos del GIS.

Nº de transformador	Código del GIS	Disposición de la subestación	Potencia Aparente Nominal [kVA]	Tensiones [kV]	Grupo de conexión
T0	F	Estación a nivel	15000	132/13,8	YNd11
T1	C-6	Subterránea	315	13,2/0,4	Dyn11
T2	C-4	Subterránea	250	13,2/0,4	Dyn11
T3	C-5	Subterránea	400	13,2/0,4	Dyn11
T4	C-14	Subterránea	250	13,2/0,4	Dyn11
T5	C-2	Subterránea	400	13,2/0,4	Dyn11
T6	C-1	Subterránea	400	13,2/0,4	Dyn11
T7	C-11	Subterránea	315	13,2/0,4	Dyn11
T8	C-13	Subterránea	315	13,2/0,4	Dyn11
T9	S-586	Aérea	160	13,2/0,4	Dyn11
T10	S-331	Aérea	100	13,2/0,4	Dyn11
T11	S-658	Aérea	80	13,2/0,4	Dyn11

En la Tabla 7.3.1.2 se presentan algunos de los datos, los más relevantes, extraídos del programa TRADIM y necesarios para el programa ATPDraw.

La relación de pérdidas, la tensión porcentual de cortocircuito, las pérdidas en el cobre y las pérdidas en el hierro no son necesarias para el ATPDraw, pero se presentan, puesto que sirven como datos de referencia y comparación con los brindados por los fabricantes de transformadores. Esta comparación permite verificar que los cálculos realizados por el programa TRADIM son consistentes.

Tabla 7.3.1.2. Datos de los transformadores extraídos del programa TRADIM.

Nº	Sn [kVA]	Up/Us [kV]	Rp [Ohm]	Lp [mH]	Rs [Ohm]	Ls [mH]	Relación de pérdidas	Ucc%	Pcu [W]	PFe[W]
T0	15000	132/13,8	3.13675	218.34170	0.07239	7.15926	5.1	11.8	75911	14859
T1	315	13,2/0,4	11.39483	97.87464	0.00284	0.02996	5.3	4.0	4317	817
T2	250	13,2/0,4	14.97517	118.47140	0.00374	0.03626	5.1	3.8	3576	698
T3	400	13,2/0,4	8.57824	80.30750	0.00214	0.02458	5.4	4.1	5237	964
T4	250	13,2/0,4	14.97517	118.47140	0.00374	0.03626	5.1	3.8	3576	698
T5	400	13,2/0,4	8.57824	80.30750	0.00214	0.02458	5.4	4.1	5237	964
T6	400	13,2/0,4	8.57824	80.30750	0.00214	0.02458	5.4	4.1	5237	964
T7	315	13,2/0,4	11.39483	97.87464	0.00284	0.02996	5.3	4.0	4317	817
T8	315	13,2/0,4	11.39483	97.87464	0.00284	0.02996	5.3	4.0	4317	817
T9	160	13,2/0,4	26.27448	177.31720	0.00655	0.05428	5.2	3.8	2568	497
T10	100	13,2/0,4	47.34999	289.01920	0.01117	0.08847	5.1	3.9	1764	348
T11	80	13,2/0,4	64.09416	340.61510	0.01595	0.10453	5.2	3.8	1565	303

7.3.2. Líneas de distribución

Del GIS se obtuvieron los tipos de tendido, material, sección y longitud de cada línea. Luego se buscó en catálogos comerciales la resistencia y reactancia por unidad de longitud para cada tipo de conductor. Por último, en una planilla de cálculos se hallaron las resistencias a temperatura de servicio e inductancias de cada línea.

En la Tabla 7.3.2.1 se presentan los parámetros de las líneas de Media Tensión.

Tabla 7.3.2.1. Líneas de Media Tensión.

Línea	Tendido	Material	Sección [mm ²]	Longitud [km]	Tipo	Resistencia a 90°C y 50 Hz [Ohm /km]	Reactancia a 50 Hz [Ohm /km]	R [Ohm]	XL [Ohm]	L [mH]	
LMT1-1	Aérea	Aleación de Aluminio	3x1x70	0.351	Prysal AAAC- cuerda desnuda MT(*)	0.588	0.283	0.206	0.099	0.316	
LMT1-2	Subterránea	Cobre	3x70	0.051	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.341	0.110	0.017	0.006	0.018	
LMT1-3	Aérea	Aleación de Aluminio	3x1x120	2.193	Prysal AAAC- cuerda desnuda MT(*)	0.334	0.269	0.732	0.590	1.878	
LMT1-4	Subterránea	Cobre	3x70	0.349	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.341	0.110	0.119	0.038	0.122	
LMT1-5	Subterránea	Cobre	3x50	0.323	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.159	0.037	0.119	
LMT1	Esta línea representa a las 5 líneas anteriores dispuestas en serie								1.234	0.771	2.453
LMT2	Subterránea	Cobre	3x50	0.559	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.276	0.065	0.206	
LMT3	Subterránea	Cobre	3x50	0.567	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.280	0.066	0.209	
LMT4	Subterránea	Cobre	3x50	0.166	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.082	0.019	0.061	
LMT5	Subterránea	Cobre	3x50	0.636	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.314	0.074	0.235	
LMT6	Subterránea	Cobre	3x50	0.646	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.318	0.075	0.239	
LMT7	Subterránea	Cobre	3x50	0.820	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.404	0.095	0.303	
LMT8	Subterránea	Cobre	3x50	0.256	Retenax tripolar Cu 13,2 Kv	0.493	0.116	0.126	0.030	0.095	
LMT9	Aérea	Aleación de Aluminio	3x1x50	0.042	Prysal AAAC- cuerda desnuda MT(*)	0.795	0.298	0.033	0.013	0.040	
LMT10	Aérea	Aleación de Aluminio	3x1x50	0.419	Prysal AAAC- cuerda desnuda MT(*)	0.795	0.298	0.333	0.125	0.397	
LMT11	Aérea	Aleación de Aluminio	3x1x50	0.218	Prysal AAAC- cuerda desnuda MT(*)	0.795	0.298	0.173	0.065	0.207	
LMT12	Aérea	Aleación de Aluminio	3x1x50	1.162	Prysal AAAC- cuerda desnuda MT(*)	0.795	0.298	0.924	0.3463	1.102	

Observaciones: (*): Rmáx a 80°C

En la Tabla 7.3.2.2 se presentan los parámetros de las líneas de Baja Tensión. Los mismos se calcularon teniendo en cuenta la Tabla 7.3.2.3, en la cual se lista el número de líneas o alimentadores de Baja Tensión que salen de cada transformador y la longitud media equivalente de cada línea. La misma se calculó de manera tal que si se concentran todos los usuarios de cada línea en el extremo de la misma, se produzca la misma caída de tensión que se produce en el extremo de la línea real con los usuarios distribuidos a lo largo de la misma.

Tabla 7.3.2.2. Líneas de Baja Tensión.

Línea	Tendido	Material	Sección c/línea [mm ²]	Nº de líneas (//)	Longitud [km]	Tipo	Resistencia a 90°C y 50 Hz [Ohm]	Reactancia a 50 Hz [Ohm /km]	R [Ohm]	XL [Ohm]	L[mH]
LBT10	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	4	0.300	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.043	0.011	0.035
LBT111	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.300	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.173	0.044	0.138
LBT20	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	3	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.031	0.008	0.025
LBT21	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.092	0.023	0.074
LBT30	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	5	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.023	0.006	0.018
LBT31	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.115	0.029	0.092
LBT40	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	3	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.031	0.008	0.025
LBT41	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.092	0.023	0.074
LBT50	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	5	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.018	0.005	0.015
LBT51	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.092	0.023	0.074
LBT60	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	5	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.018	0.005	0.015
LBT61	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.092	0.023	0.074
LBT70	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	4	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.029	0.007	0.023
LBT71	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.115	0.029	0.092
LBT80	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	4	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.029	0.007	0.023
LBT81	Subterránea	Aluminio	3x1x70/35	1	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	0.576	0.145	0.115	0.029	0.092
LBT90	Aérea	Aluminio	3x1x70/50	1	0.200	Retenax Preensamblado	0.569	0.085	0.114	0.017	0.054
LBT91	Aérea	Aluminio	3x1x70/50	1	0.200	Retenax Preensamblado	0.569	0.085	0.114	0.017	0.054
LBT100	Aérea	Aluminio	3x1x70/50	1	0.130	Retenax Preensamblado	0.569	0.085	0.074	0.011	0.035
LBT110	Aérea	Aluminio	3x1x70/50	1	0.130	Retenax Preensamblado	0.569	0.085	0.074	0.011	0.035
NBT1	Subterránea	Aluminio	1x35	5	0.300	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.067	0.009	0.029
NBT2	Subterránea	Aluminio	1x35	4	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.044	0.006	0.019
NBT3	Subterránea	Aluminio	1x35	6	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.037	0.005	0.016
NBT4	Subterránea	Aluminio	1x35	4	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.044	0.006	0.019
NBT5	Subterránea	Aluminio	1x35	6	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.030	0.004	0.013
NBT6	Subterránea	Aluminio	1x35	6	0.160	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.030	0.004	0.013
NBT7	Subterránea	Aluminio	1x35	5	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.044	0.006	0.019
NBT8	Subterránea	Aluminio	1x35	5	0.200	Retenax Valio Unipolar Al.	1.112	0.151	0.044	0.006	0.019
NBT9	Aérea	Al.Aluminio	1x50	2	0.200	Retenax Preensamblado	0.834	0.086	0.083	0.009	0.027
NBT10	Aérea	Al.Aluminio	1x50	1	0.130	Retenax Preensamblado	0.834	0.086	0.108	0.011	0.036
NBT11	Aérea	Al.Aluminio	1x50	1	0.130	Retenax Preensamblado	0.834	0.086	0.108	0.011	0.036

Tabla 7.3.2.3. Nº de alimentadores de cada transformador y longitud media equivalente.

Nº	Sn [kVA]	Nº de líneas a la salida del transformador	Longitud media de c/línea de salida [km]
T1	315	5	0.300
T2	250	4	0.160
T3	400	6	0.200
T4	250	4	0.160
T5	400	6	0.160
T6	400	6	0.160
T7	315	5	0.200
T8	315	5	0.200
T9	160	2	0.200
T10	100	1	0.130
T11	80	1	0.130

7.3.3. Cargas

Se contabilizó el número de usuarios conectado a cada transformador y se llevó a un número entero con el fin de uniformar la carga y discretizar los modelos a simular. Se aplicó un coeficiente de simultaneidad global que tiene en cuenta que no todos los usuarios conectados están demandando potencia en forma simultánea, puesto que siempre hay viviendas con bajos consumos debido a que se encuentran deshabitadas en forma permanente o temporalmente, o porque sus habitantes se van a dormir temprano, y por ello durante la noche el uso de energía es reducido, por los hábitos de consumo, o porque tal vez alguna línea temporalmente está seccionada y alimentada desde otra subestación del anillo, etc.

Como se muestra en la Tabla 7.3.3.1, a partir del número de usuarios que demandan potencia en forma simultánea durante el período de simulación, se determinó la cantidad de grupos de 20 usuarios promedios por fase, que se deben conectar para representar la carga eléctrica de cada transformador.

Tabla 7.3.3.1. Usuarios alimentados y simultáneos en cada transformador.

Nº	Sn [kVA]	Nº de líneas a la salida del transformador	Nº de usuarios alimentados	Coeficiente de simultaneidad global	Nº de usuarios simultáneos	Nº de grupos de 20 usuarios por fase c/u
T1	315	5	500	0.6	300	5
T2	250	4	400	0.6	240	4
T3	400	6	600	0.6	360	6
T4	250	4	400	0.6	240	4
T5	400	6	600	0.6	360	6
T6	400	6	600	0.6	360	6
T7	315	5	500	0.6	300	5
T8	315	5	500	0.6	300	5
T9	160	2	200	0.6	120	2
T10	100	1	100	0.6	60	1
T11	80	1	100	0.6	60	1

Como la simulación representa el periodo comprendido entre las 19 y 22 hs, a estas cargas residenciales correspondientes a los tres escenarios ya planteados se les agrega una carga que representa al alumbrado público, que por lo general se alimenta con las mismas líneas que alimentan a usuarios residenciales.

Se realizó un análisis aproximado de la cantidad de usuarios residenciales y de luminarias de alumbrado público por cuadra, y se estima que en promedio, cada 20 usuarios simultáneos, hay 4 luminarias de Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP) de 250 [W]. Se utilizó esta luminaria de referencia porque es una de las más empleadas en barrios residenciales debido a su excelente rendimiento lumínico. A pesar de que en ciertas calles hay otras potencias instaladas, el producto entre potencia y cantidad

resulta, en promedio similar al adoptado, puesto que de haber considerado luminarias de menor potencia, se tendría que haber aumentado el número que se requieren por cuadra para brindar el mismo nivel de iluminación.

En el circuito unifilar presentado en la sección próxima se observa que a la salida de cada transformador se representó una línea real formada por la impedancia del conductor y una carga alineal concentrada que representa a 20 usuarios y 4 luminarias de alumbrado público en cada fase, mientras que para simplificar, las líneas restantes, de características similares, se representaron en forma agrupada a través de una impedancia de línea equivalente al paralelo de las mismas y cargas de 60 usuarios y 12 luminarias por fase; 80 usuarios y 16 luminarias por fase; y 100 usuarios y 20 luminarias por fase, según el número de líneas agrupadas, que valía 3, 4 ó 5 respectivamente.

Se debe aclarar, que cada grupo de usuarios está modelado a través de 3 fuentes de corriente conectadas en estrella con el centro estrella a tierra. Éste símbolo de tierra tanto en el unifilar como en el ATPDraw representa al punto neutro de las cargas, no al potencial de tierra propiamente dicho. Es por esto que el conductor principal de neutro de cada transformador está representado a través una impedancia inductiva conectada entre el centro estrella del transformador (salida lateral izquierda del mismo en el ATPDraw) y el símbolo de tierra.

7.3.4. Circuito unifilar, medidores de tensión y corriente

En la red a simular se dispusieron medidores de tensión y corriente en distintos nodos para poder obtener en el archivo de salida (.PL4) valores de tensión y corriente en Alta, Media y Baja Tensión aguas arriba y aguas abajo de cada línea y transformador de la red. De esta manera se podrán obtener valores eficaces, índices de distorsión, formas de onda y espectros armónicos en distintos puntos de la red, lo que permitirá analizar la influencia en los índices de calidad de la energía que tienen las cargas no lineales simuladas en cada escenario. En la Figura 7.3.4.1 se presenta un circuito unifilar de la red, en el que se observa la nomenclatura de los medidores de tensión y corriente, lo que permitirá comprender los datos de salida que se presentarán en la sección siguiente a través de tablas y gráficos.

En color verde se observan los medidores de tensión, y en color rojo, los medidores de corriente.

7.4. Simulación de redes de distribución

Determinados ya los parámetros de la red, se procedió a cargar la misma en el ATPDraw, utilizando como base el circuito unifilar presentado anteriormente. En las Figuras 7.4.1-4 se observa la red trazada en el programa recién mencionado.

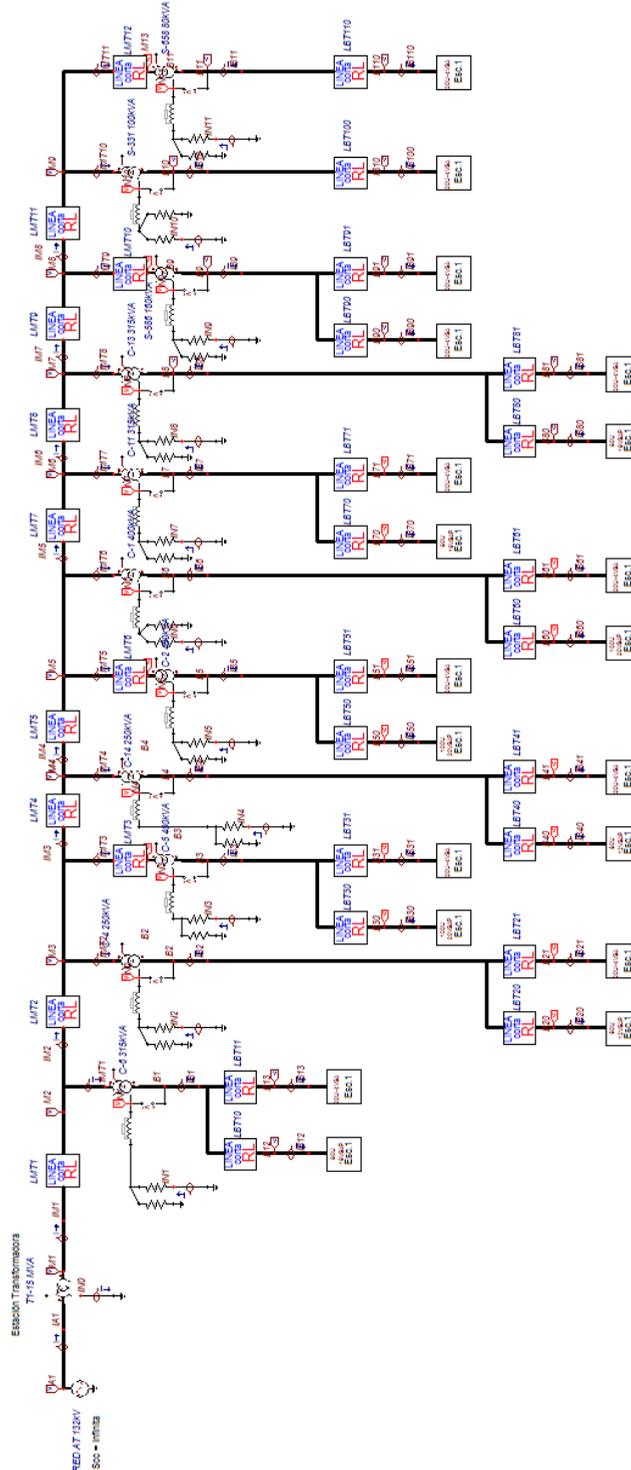


Figura 7.4.1. Vista general de la red simulada en el programa ATPDraw.

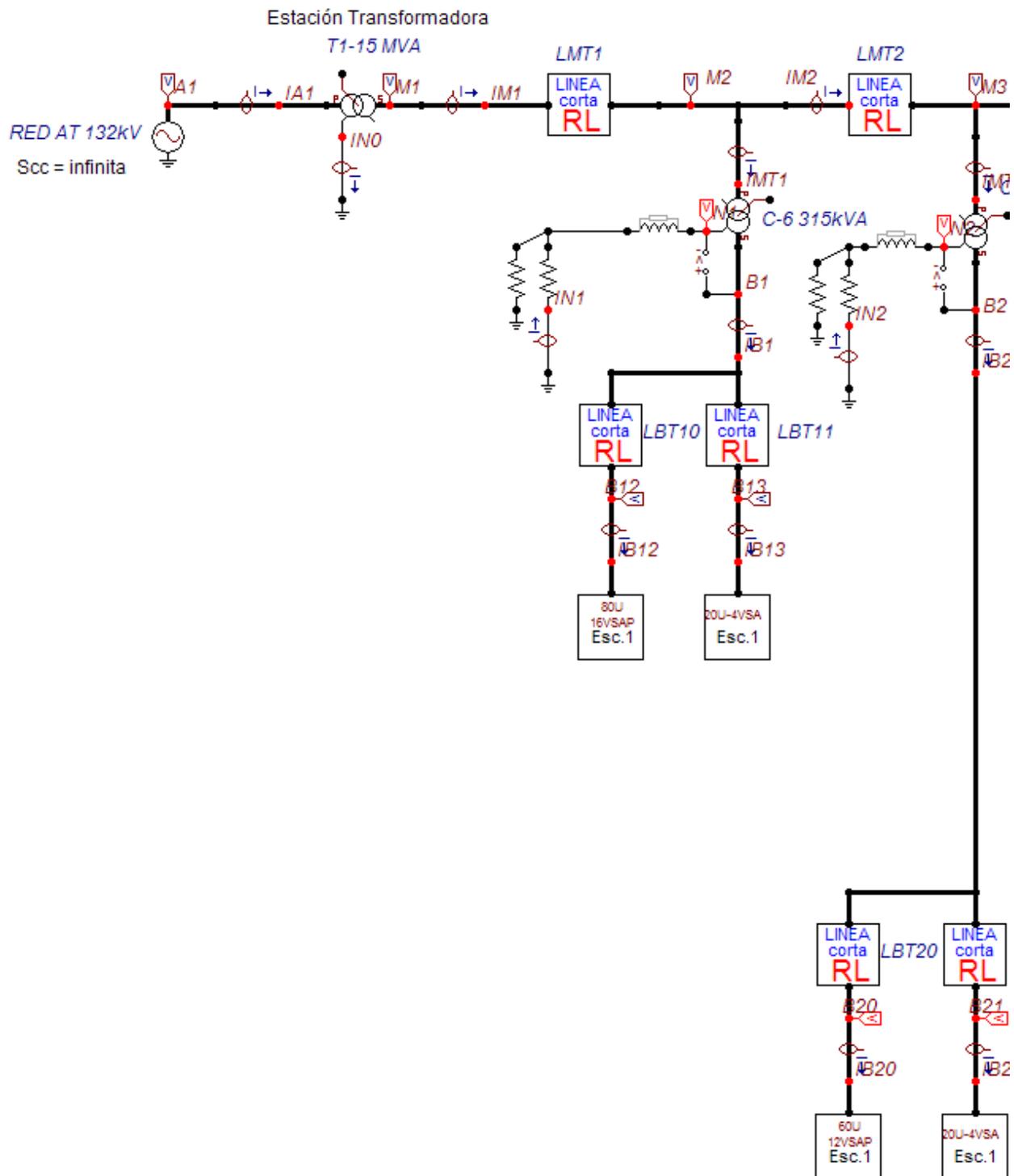


Figura 7.4.2. Ampliación 1 de la red simulada en el programa ATPDraw.

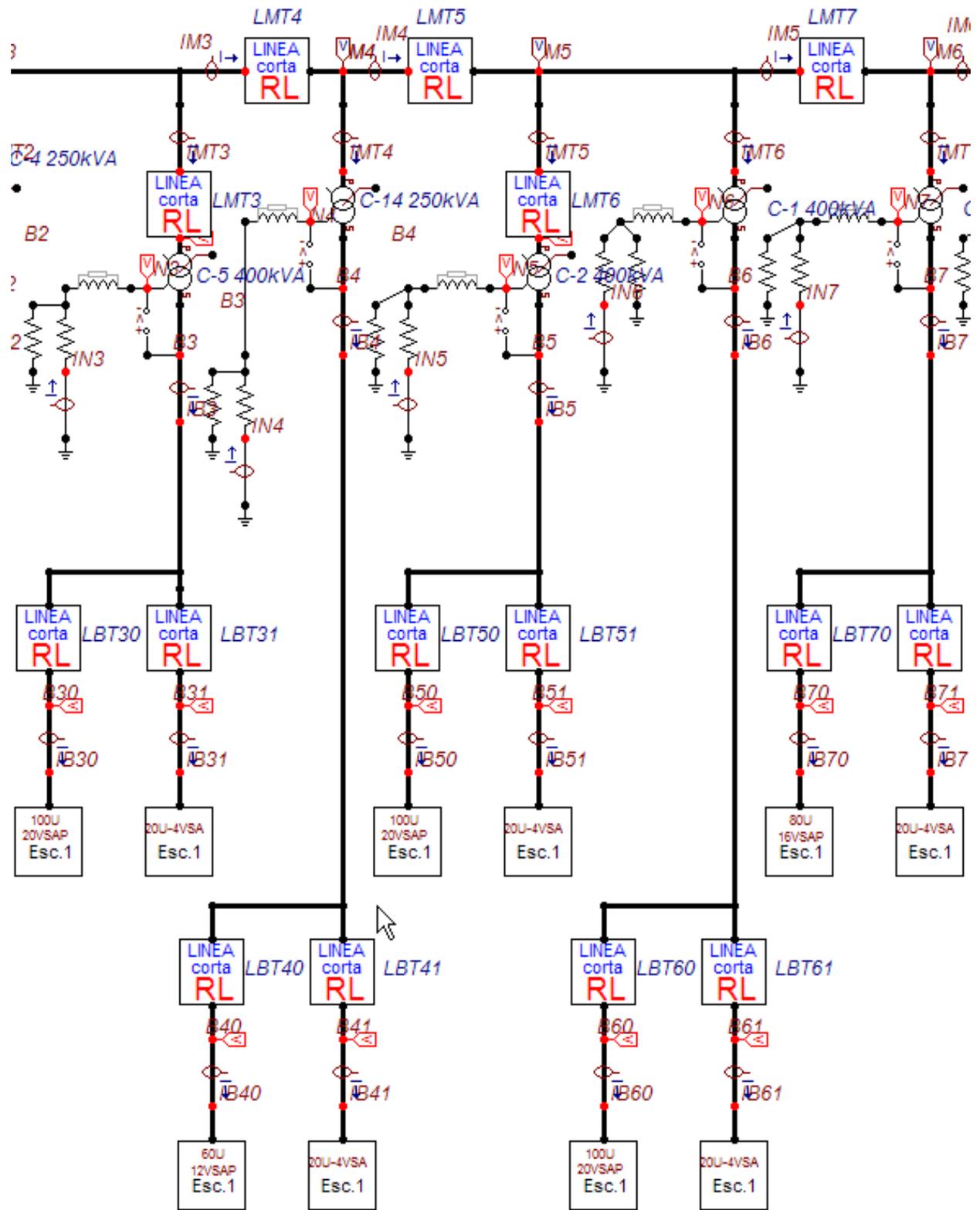


Figura 7.4.3. Ampliación 2 de la red simulada en el programa ATPDraw.

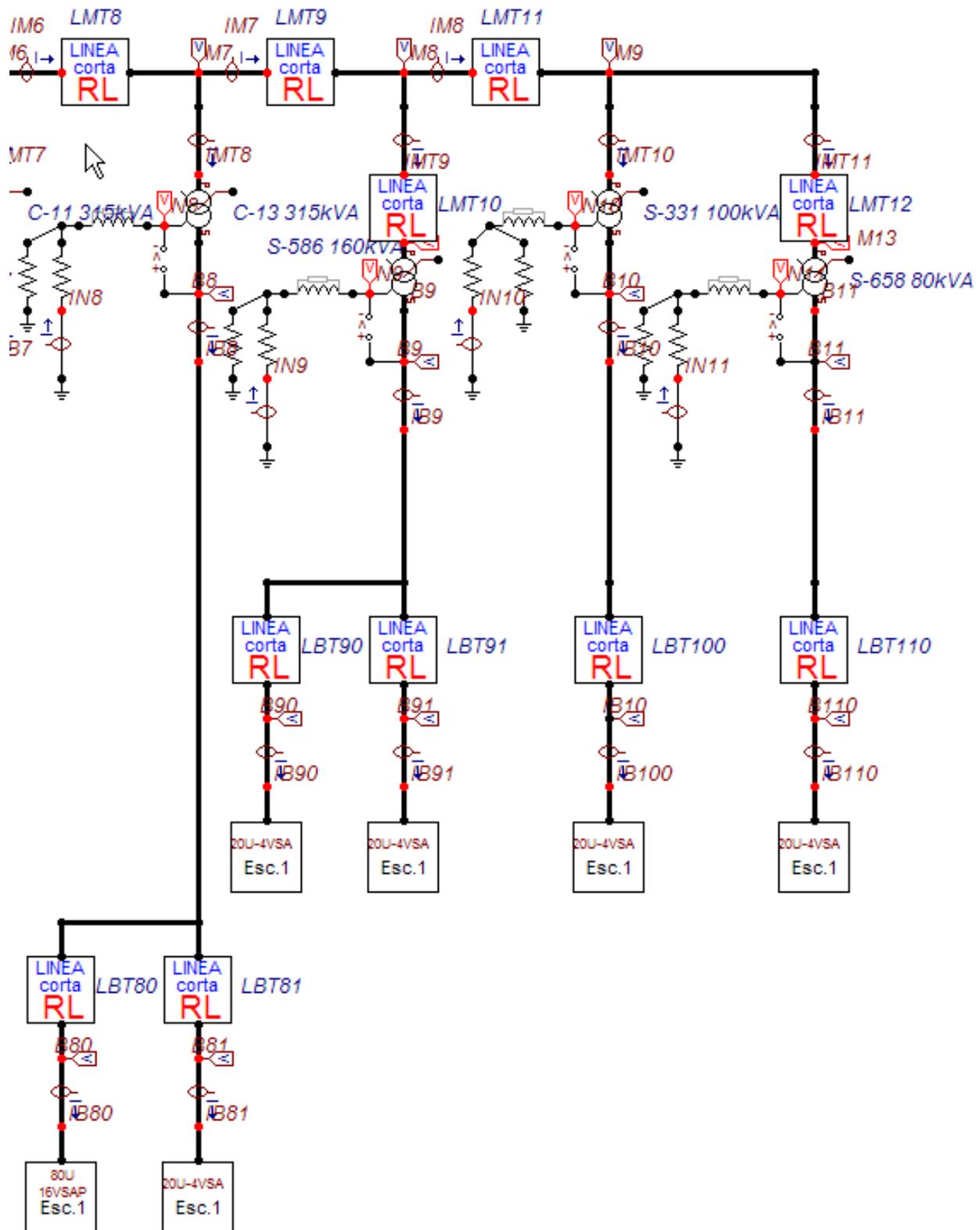


Figura 7.4.4. Ampliación 3 de la red simulada en el programa ATPDraw.

Como ya se ha mencionado, se realizaron 3 simulaciones correspondientes a tres escenarios posibles. En los mismos solo se cambian las cargas que representan a los usuarios residenciales, manteniendo todos los otros parámetros de la red constantes.

Luego de cargar la red y sus cargas, para cada escenario se configuraron los parámetros de simulación para hacer una ejecución en el dominio del tiempo. Realizada la misma, se exportaron los datos del ATP por medio de un archivo de valores separados por comas .CSV, el cuál contenía las señales muestreadas de tensión y corriente de todos los nodos.

Luego, a través de un script programado en Matlab, se procesó ese archivo con los valores temporales, y a cada señal muestreada se le realizó la Transformada Rápida de Fourier con la función FFT. Se obtuvieron así las amplitudes y ángulos de la componente fundamental y los respectivos armónicos de cada señal, los cuales se exportaron en un archivo .TXT, que fue levantado con una planilla de cálculo para obtener distintos índices de calidad de la energía.

Se llegó así a los resultados que se presentan en la siguiente sección.

7.4.1. Resultados de las simulaciones

A continuación se presentan, para cada escenario, las tasas de distorsión armónica total de tensión (THDu%) de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión; en el lado secundario, o de menor tensión; y en el extremo de línea. (Figuras 7.4.1.1, 7.4.1.6 y 7.4.1.10).

De acuerdo a como se modeló la red, el extremo de línea es el nodo más alejado en cada una de las líneas distribuidoras de BT que salen de los transformadores MT/BT (T1-T11), excepto para el transformador AT/MT (T0), en el cual, el extremo de línea es el nodo más alejado del transformador en la red de MT, es decir, corresponde al nodo M13 del circuito unifilar de la red, de la Figura 7.3.4.1.

El extremo de línea así definido, en el caso de los transformadores MT/BT es equivalente al Punto de Conexión Común (PCC) o acometida del usuario más alejado del transformador, es decir con mayor impedancia de cortocircuito intercalada en serie, también conocido como usuario de cola. Estos extremos son los puntos más críticos de cada transformador, ya que en ellos se produce la mayor caída de tensión, y en presencia de corrientes armónicas importantes, la mayor distorsión armónica de tensión.

En las Figuras 7.4.1.2, 7.4.1.7 y 7.4.1.11, para cada escenario se presentan las tasas de distorsión armónica total de corriente (THDi%) de línea en los primarios y secundarios de cada transformador.

En las Figuras 7.4.1.4, 7.4.1.8 y 7.4.1.12, para cada escenario se presentan las tasas de distorsión armónica total (THDi%) de las corrientes de línea en cada punto del circuito serie de la red de Media Tensión. Los nodos se corresponden con el circuito unifilar de la Figura 7.3.4.1.

Por último, en las Figuras 7.4.1.5, 7.4.1.9 y 7.4.1.13, se presentan los Factores de Atenuación de los primeros 21 armónicos (incluyendo a la fundamental) en cada uno de los 11 transformadores de la red MT simulada.,

Escenario 1:

- **Distorsión de tensión:**

Se observa en la Figura 7.4.1.1 que en cada transformador, el THDu% aumenta en dirección aguas abajo, esto se debe a que la circulación de corrientes armónicas en las líneas, a través de la impedancia de cortocircuito del propio transformador y de la impedancia de los conductores, provoca una caída de tensión distorsionada. Puesto que la tensión en un nodo cualquiera de la red, es igual a la resta entre la tensión en el nodo aguas arriba, que en general es senoidal casi pura producida por el generador, y la caída de tensión entre ambos nodos, en consecuencia, la tensión en dicho nodo se ve distorsionada.

Tabla 7.4.1.1. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, en el lado secundario o de menor tensión, y en el extremo de línea.

Transformador	THDuf%		
	A. Primario	A. Secundario	Extremo de línea
T0	0.00	0.63	1.06
T1	0.98	2.50	8.62
T2	1.01	2.66	6.00
T3	1.01	2.63	6.78
T4	1.01	2.67	6.01
T5	1.04	2.71	6.07
T6	1.04	2.71	6.06
T7	1.05	2.70	6.86
T8	1.06	2.71	6.86
T9	1.06	2.28	5.47
T10	1.06	2.11	3.52
T11	1.06	2.30	4.32

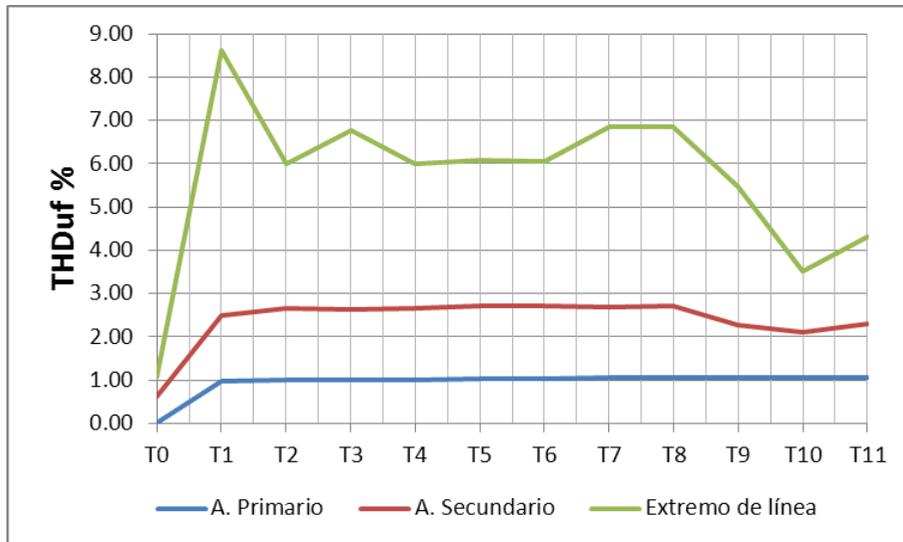


Figura 7.4.1.1. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, en el lado secundario o de menor tensión, y en el extremo de línea.

- **Distorsión de corriente:**

Se observa en la Figura 7.4.1.2 que la mayor distorsión de corriente se da en el secundario de los transformadores MT/BT (T1-T11), puesto que las cargas residenciales no lineales inyectan armónicos de corriente en baja tensión.

Tabla 7.4.1.2. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, y en el lado secundario o de menor tensión.

Transformador	THDif%	
	A. Primario	A. Secundario
T0	3.06	3.08
T1	3.07	12.49
T2	3.07	14.10
T3	3.07	13.59
T4	3.07	14.11
T5	3.06	14.09
T6	3.06	14.08
T7	3.07	13.69
T8	3.07	13.69
T9	3.18	14.67
T10	3.17	15.30
T11	3.17	15.38

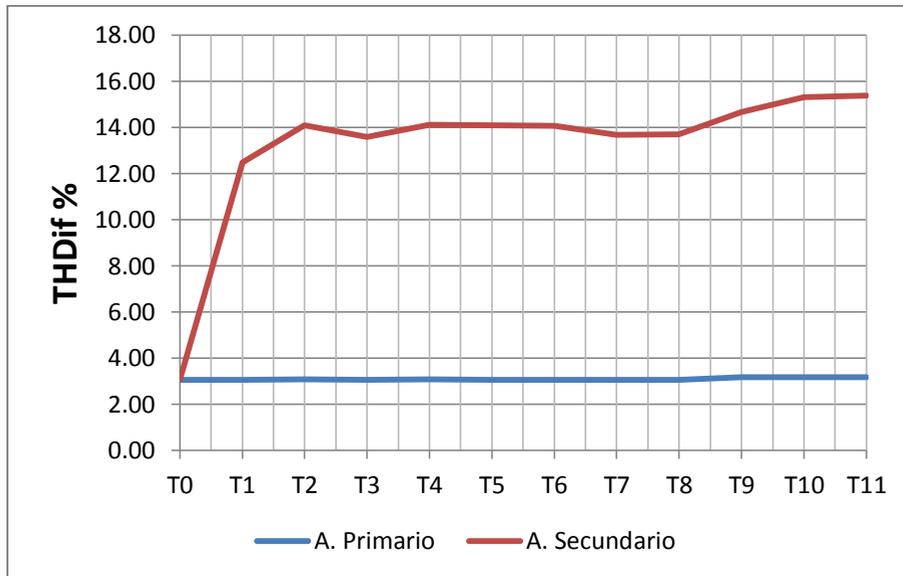


Figura 7.4.1.2. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, y en el lado secundario o de menor tensión.

La gran disminución de distorsión armónica en el primario de los transformadores MT/BT, se debe a que los mismos tienen un núcleo magnético de tres columnas y además, tienen una conexión triángulo estrella. De esta manera, los armónicos de corriente impares múltiplos de tres (3, 9, 15, 21, etc.), es decir, los de secuencia homopolar, que circulan en el arrollamiento estrella del secundario, inducen flujos magnéticos homopolares, que por estar en fase deberían sumarse y circular por un neutro o centro estrella magnético. Sucede que los transformadores trifásicos de tres columnas carecen de neutro magnético, por lo tanto, estos flujos magnéticos homopolares no pueden circular libremente. En consecuencia los armónicos homopolares de corriente no pueden circular en el primario, por lo tanto la distorsión armónica total disminuye, debido a que el tercer armónico es en general el de mayor amplitud. En el caso de que en la red existan bancos de transformadores monofásicos, existiría un núcleo magnético que permitiría la circulación de flujos homopolares. Estos inducirían tensiones de fase homopolares en el arrollamiento primario. Sin embargo, como el primario se encuentra conectado en triángulo, las corrientes homopolares inducidas quedarían circulando en fase confinadas dentro del triángulo (Figura 7.4.1.3), y las tensiones y corrientes de línea del primario no tendrían componentes homopolares.

Resumiendo lo expuesto, se puede decir que los transformadores de distribución trifásicos de tres columnas, o banco de transformadores monofásicos, con conexión Dy (triángulo estrella) bloquean las corrientes armónicas múltiplos de tres, evitando que se propaguen desde la red de baja tensión hacia la red de media tensión, reduciendo en consecuencia la tasa de distorsión armónica total.

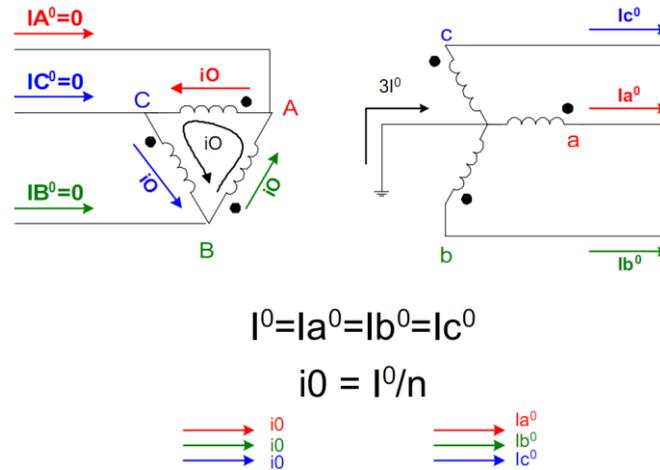


Figura 7.4.1.3. Corrientes homopolares o de secuencia cero en la conexión Dy.

Tabla 7.4.1.3. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

Corriente	THDif%
IA1	3.06
IM1	3.08
IM2	3.08
IM3	3.08
IM4	3.08
IM5	3.10
IM6	3.11
IM7	3.17
IM8	3.17
IMT11	3.17

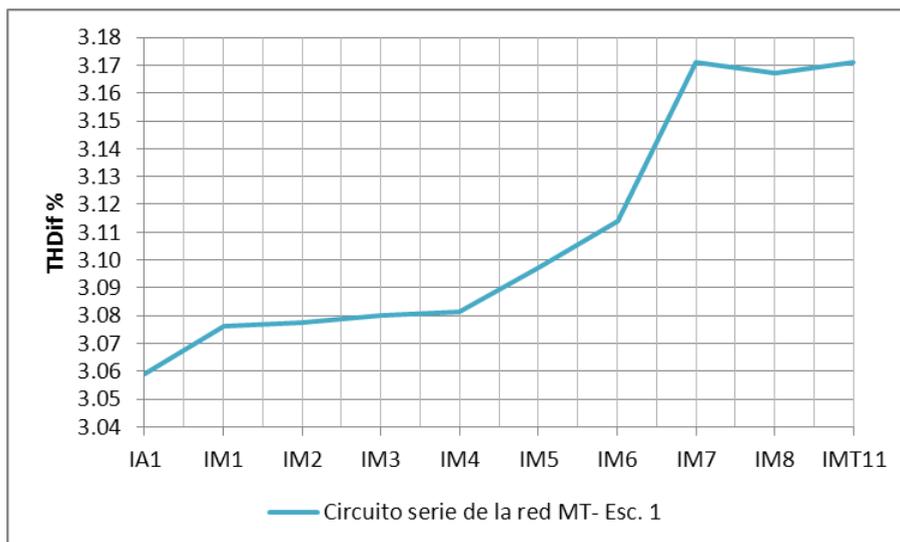


Figura 7.4.1.4. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

En la figura 7.4.1.4 se observa que la tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT, se mantiene prácticamente constante con una leve tendencia a disminuir hacia el lado de la fuente (aguas arriba).

- **Atenuación de componentes armónicos de corriente:**

Como se mencionó en el [Capítulo 4](#), la atenuación de armónicos de corriente es provocada por la propia impedancia del sistema de potencia y por la correspondiente distorsión de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producida por cargas no lineales. En la Figura 7.4.1.5 se puede apreciar el factor de atenuación de los primeros 21 armónicos, incluyendo la componente fundamental, en cada transformador MT/BT. Este factor de atenuación representa cuanto se atenúa cada armónico cuando hay conectados n cantidad de usuarios por fase (Ver Tabla 7.4.1.4) en cada transformador con respecto a n veces los armónicos que estarían presentes si se conectara un solo usuario por fase en cada transformador.

En el transformador (T1), con mayor densidad de carga, y mayor distorsión de tensión se observa que la mayor atenuación se da en los armónicos de corriente múltiplos de tres, o de secuencia homopolar (3, 9, 15 y 21), mientras que en los transformadores con menor densidad de carga (T10 y T11) y menor distorsión de tensión sucede lo opuesto.

Tabla 7.4.1.4. Factor de atenuación de los primeros 21 armónicos en cada uno de los 11 transformadores MT/BT de la red simulada.

Factor de atenuación de todos los transformadores de la red MT/BT- Resumen												
Transformador		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Potencia Nominal [KVA]		315	250	400	250	400	400	315	315	160	100	80
Nº usuarios/fase		100	80	120	80	120	120	100	100	40	20	20
Nº armónico	f [Hz]	FA										
1	50	0.88	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.90	0.94	0.91
3	150	0.65	0.76	0.73	0.76	0.76	0.76	0.73	0.73	0.79	0.87	0.84
5	250	0.76	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.80	0.84	0.81
7	350	0.74	0.76	0.75	0.76	0.75	0.76	0.75	0.75	0.78	0.82	0.79
9	450	0.66	0.75	0.72	0.75	0.75	0.75	0.72	0.72	0.80	0.86	0.84
11	550	0.72	0.74	0.73	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.77	0.80	0.78
13	650	0.71	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.76	0.80	0.77
15	750	0.66	0.75	0.72	0.75	0.74	0.74	0.72	0.72	0.80	0.86	0.84
17	850	0.71	0.73	0.72	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.76	0.80	0.77
19	950	0.71	0.73	0.72	0.73	0.72	0.72	0.72	0.71	0.76	0.80	0.77
21	1050	0.66	0.75	0.72	0.75	0.74	0.74	0.72	0.72	0.80	0.86	0.84

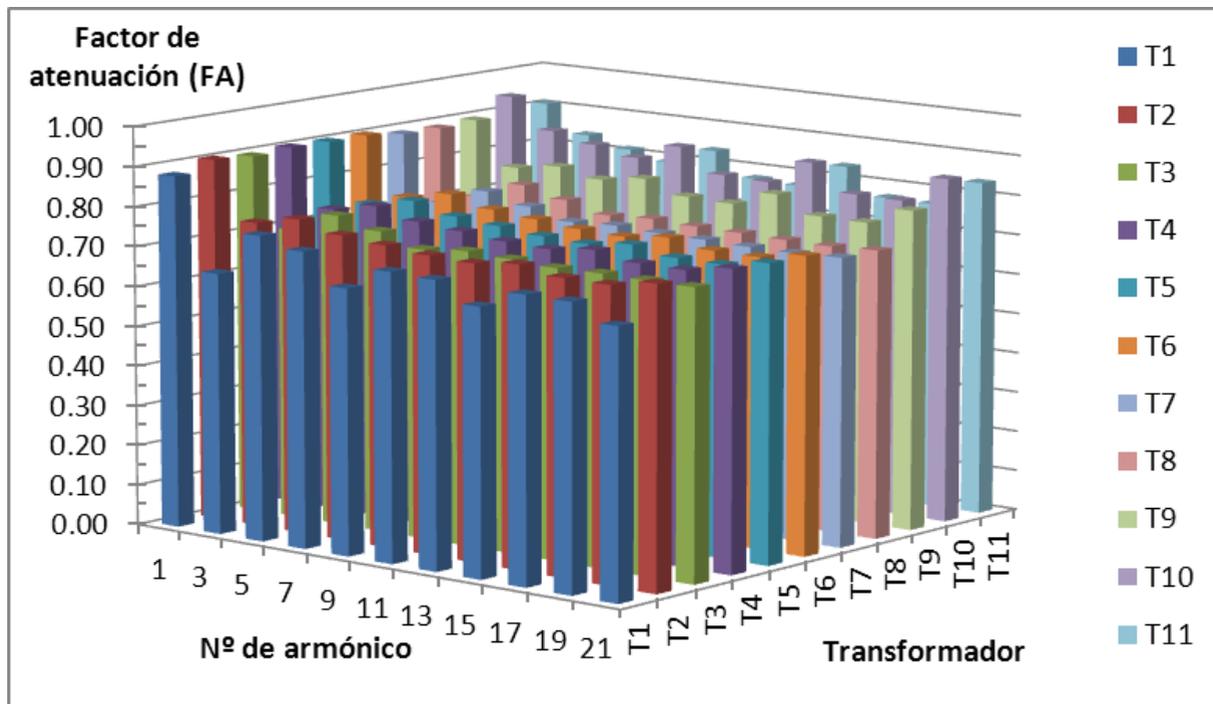


Figura 7.4.1.5. Factor de atenuación de los primeros 21 armónicos en cada uno de los 11 transformadores MT/BT de la red simulada.

En los siguientes escenarios se presentan gráficos similares con comportamientos parecidos, aunque se observa claramente el aumento de las tasas de distorsión armónica total de corriente y tensión debido al aumento de cargas de iluminación no lineales (lámparas LFC en el escenario 2 y lámparas LED en el escenario 3).

Escenario 2:

- **Distorsión de tensión:**

Tabla 7.4.1.5. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, en el lado secundario o de menor tensión, y en el extremo de línea.

Transformador	THDuf%		
	A. Primario	A. Secundario	Extremo de línea
T0	0.00	0.87	1.46
T1	1.35	3.39	10.77
T2	1.39	3.56	7.49
T3	1.39	3.53	8.46
T4	1.40	3.57	7.50
T5	1.43	3.63	7.59
T6	1.43	3.62	7.58
T7	1.45	3.63	8.56
T8	1.45	3.63	8.56
T9	1.46	3.06	6.75
T10	1.46	2.82	4.39
T11	1.46	3.07	5.37

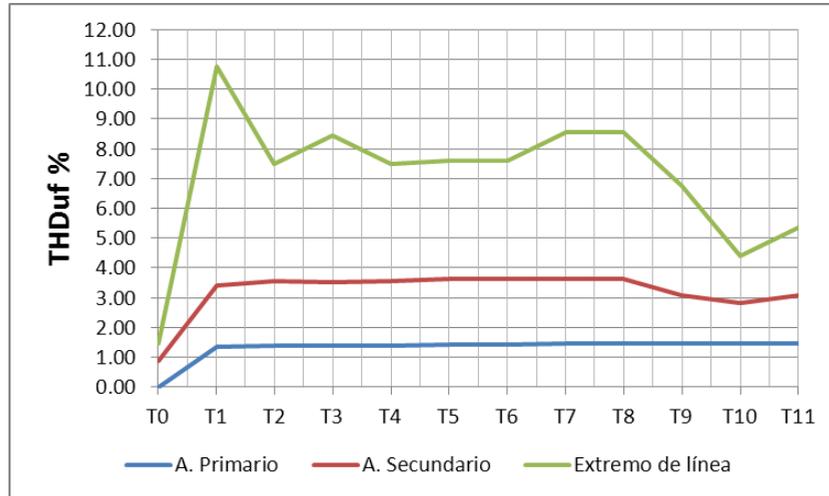


Figura 7.4.1.6. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, en el lado secundario o de menor tensión, y en el extremo de línea.

• **Distorsión de corriente:**

Tabla 7.4.1.6. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, y en el lado secundario o de menor tensión.

Transformador	THDif%	
	A. Primario	A. Secundario
T0	4.57	4.60
T1	4.67	17.76
T2	4.55	19.21
T3	4.55	18.61
T4	4.56	19.22
T5	4.54	19.19
T6	4.54	19.18
T7	4.67	19.24
T8	4.67	19.25
T9	4.69	19.92
T10	4.67	20.65
T11	4.68	20.74

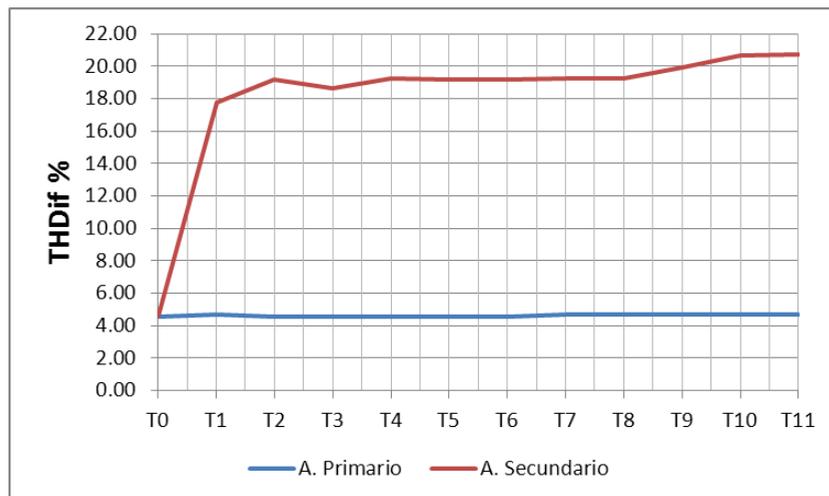


Figura 7.4.1.7. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, y en el lado secundario o de menor tensión.

Tabla 7.4.1.7. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

Corriente	THDif%
IA1	4.57
IM1	4.60
IM2	4.59
IM3	4.60
IM4	4.61
IM5	4.67
IM6	4.67
IM7	4.68
IM8	4.67
IMT11	4.68

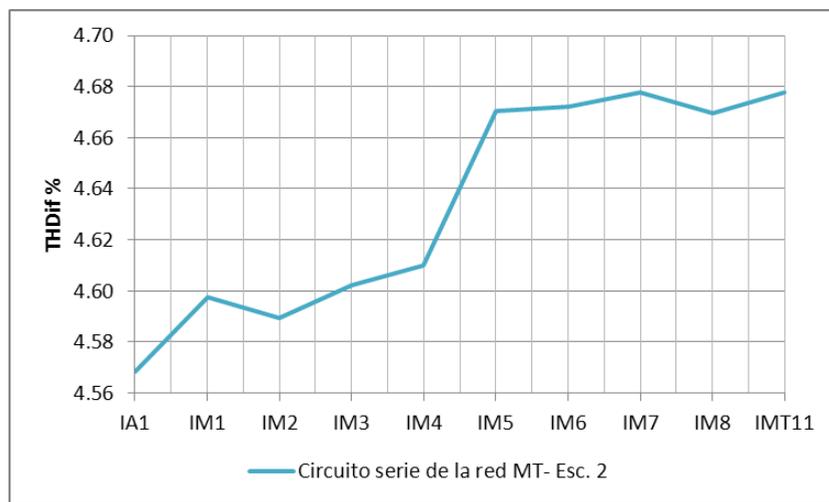


Figura 7.4.1.8. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

- **Atenuación de componentes armónicos de corriente:**

Los factores de atenuación siguen un comportamiento similar al del escenario 1, puesto que la topología de la red la misma, sin embargo, en general en este escenario los factores de atenuación son mayores, es decir, la atenuación es menor.

Tabla 7.4.1.8. Factor de atenuación de los primeros 21 armónicos en cada uno de los 11 transformadores MT/BT de la red simulada.

Factor de atenuación de todos los transformadores de la red MT/BT- Resumen												
Transformador		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Potencia Nominal [KVA]		315	250	400	250	400	400	315	315	160	100	80
Nº usuarios/fase		100	80	120	80	120	120	100	100	40	20	20
Nº armónico	f [Hz]	FA										
1	50	0.87	0.92	0.91	0.92	0.91	0.91	0.88	0.88	0.91	0.95	0.92
3	150	0.69	0.79	0.76	0.79	0.79	0.79	0.76	0.76	0.81	0.88	0.86
5	250	0.79	0.81	0.80	0.81	0.81	0.81	0.80	0.80	0.83	0.86	0.84
7	350	0.77	0.79	0.78	0.79	0.79	0.79	0.78	0.78	0.81	0.85	0.82
9	450	0.70	0.78	0.76	0.78	0.78	0.78	0.76	0.76	0.83	0.88	0.86
11	550	0.75	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76	0.76	0.80	0.83	0.81
13	650	0.75	0.77	0.76	0.77	0.77	0.77	0.76	0.76	0.79	0.83	0.81
15	750	0.71	0.78	0.76	0.78	0.78	0.78	0.76	0.76	0.83	0.88	0.86
17	850	0.75	0.77	0.76	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.79	0.82	0.80
19	950	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.79	0.82	0.80
21	1050	0.71	0.78	0.76	0.78	0.78	0.78	0.76	0.76	0.83	0.88	0.86

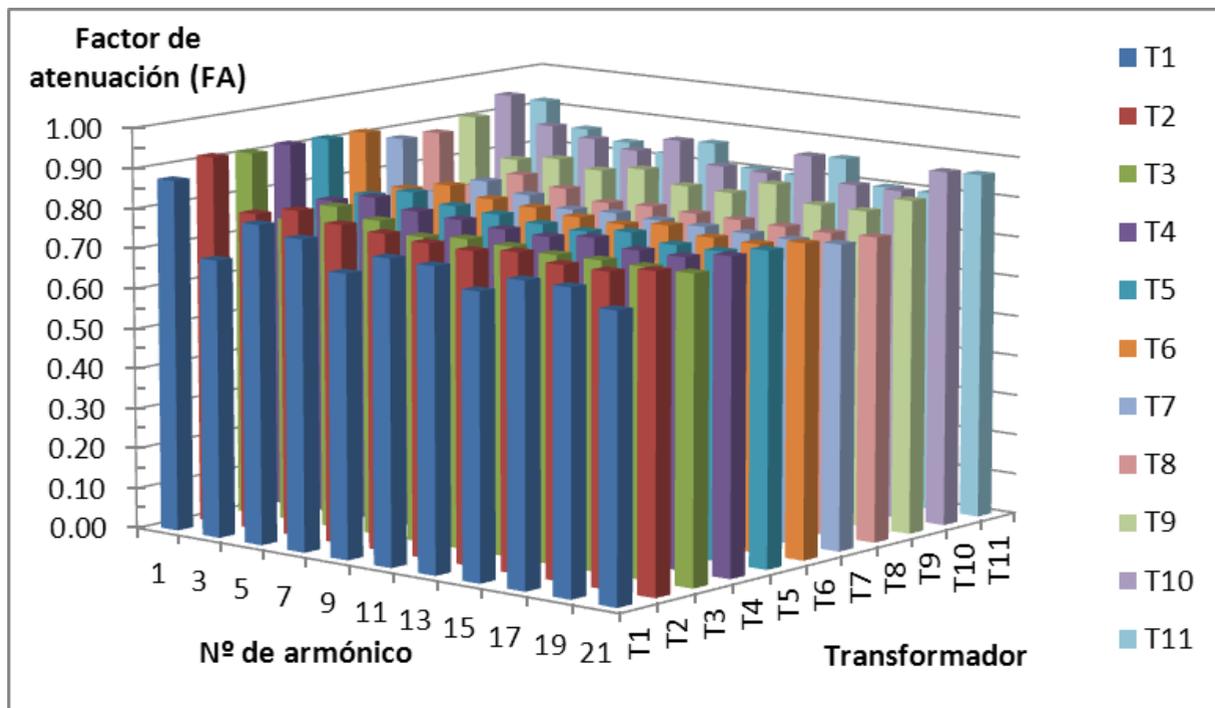


Figura 7.4.1.9. Factor de atenuación de los primeros 21 armónicos en cada uno de los 11 transformadores MT/BT de la red simulada.

Escenario 3:

• **Distorsión de tensión:**

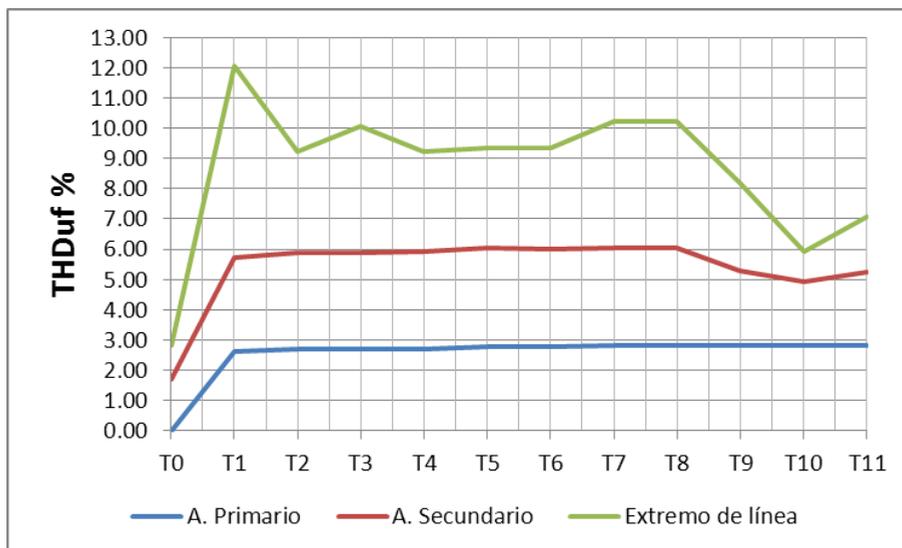


Figura 7.4.1.10. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, en el lado secundario o de menor tensión, y en el extremo de línea.

Se observa que la tasa de distorsión de tensión en los distintos transformadores de la red tiene un comportamiento relativo similar, por tratarse de la misma red, sin embargo, cabe destacar que en valor absoluto, en este escenario se alcanzan las mayores tasas, alcanzando un THDu% del 12.04 % en el extremo de línea del transformador T1, frente a un 8.62% y 10.77% en el mismo transformador, en los escenarios 1 y 2 respectivamente.

Tabla 7.4.1.9. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, en el lado secundario o de menor tensión, y en el extremo de línea.

Transformador	THDuf%		
	A. Primario	A. Secundario	Extremo de línea
T0	0.00	1.70	2.84
T1	2.62	5.72	12.04
T2	2.70	5.90	9.21
T3	2.71	5.90	10.05
T4	2.72	5.92	9.23
T5	2.79	6.03	9.35
T6	2.77	6.01	9.34
T7	2.81	6.05	10.20
T8	2.82	6.06	10.21
T9	2.83	5.28	8.21
T10	2.83	4.92	5.92
T11	2.84	5.26	7.06

• **Distorsión de corriente:**

Tabla 7.4.1.10. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, y en el lado secundario o de menor tensión.

Transformador	THDif%	
	A. Primario	A. Secundario
T0	7.39	7.44
T1	7.39	17.76
T2	7.45	19.67
T3	7.42	19.07
T4	7.45	19.69
T5	7.41	19.65
T6	7.42	19.64
T7	7.41	19.17
T8	7.41	19.17
T9	7.74	20.38
T10	7.80	21.21
T11	7.73	21.22

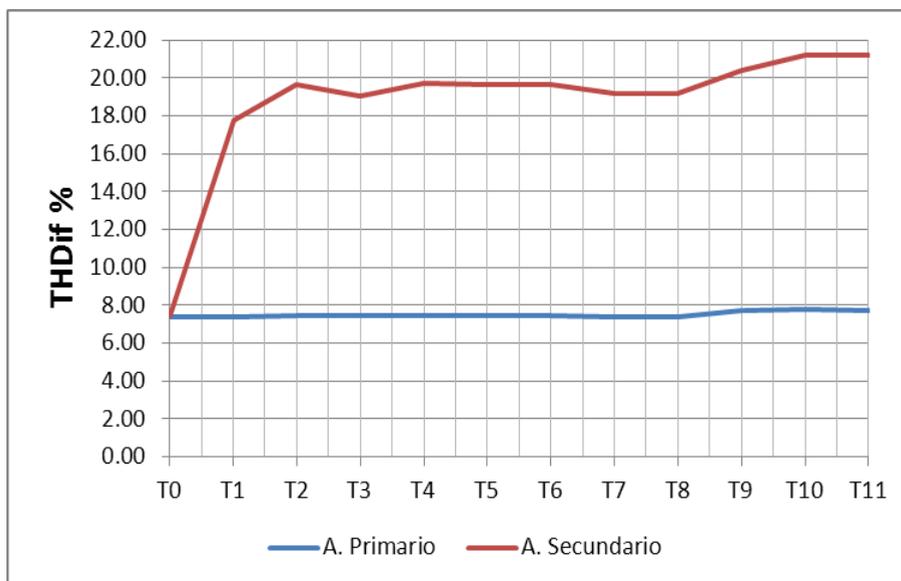


Figura 7.4.1.11. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, o de mayor tensión, y en el lado secundario o de menor tensión.

Tabla 7.4.1.11. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

Corriente	THDi%
IA1	7.39
IM1	7.44
IM2	7.45
IM3	7.46
IM4	7.46
IM5	7.50
IM6	7.55
IM7	7.74
IM8	7.75
IMT11	7.73

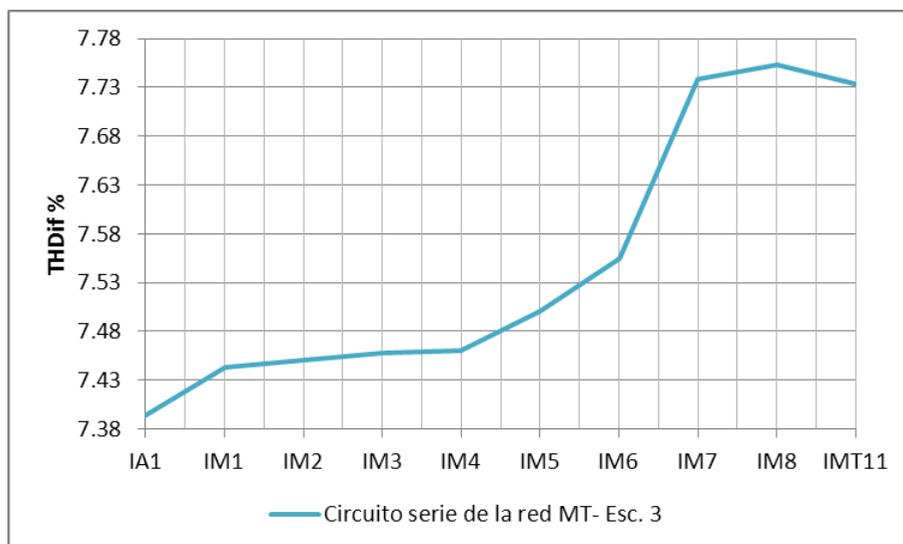


Figura 7.4.1.12. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

Las tasas de distorsión armónica de corriente también tienen un comportamiento relativo similar a los escenarios 1 y 2, por tratarse de la misma red, pero en valor absoluto, hay mayor distorsión en este escenario, en el que se han reemplazado todas las lámparas convencionales por lámparas LED. En este escenario se alcanzan valores de THDi% de hasta un 7.39 % en AT, 7.80 % en MT y 21.22 % en BT. Mientras que en el escenario 1 se alcanzan valores de hasta un 3.06% en AT, 3.18 en MT y 15.38 en BT; y en el escenario 2, 4.57 % en AT, 4.68 % en MT y 20.74 en BT.

En los tres escenarios, la máxima distorsión de corriente en MT y BT se da en los transformadores T10 y T11, mientras que la máxima distorsión de tensión se da en el transformador T1.

• **Atenuación de componentes armónicos de corriente:**

Figura 7.4.1.12. Factor de atenuación de los primeros 21 armónicos en cada uno de los 11 transformadores MT/BT de la red simulada.

Factor de atenuación de todos los transformadores de la red MT/BT- Resumen												
Transformador	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	
Potencia Nominal [KVA]	315	250	400	250	400	400	315	315	160	100	80	
Nº usuarios/fase	100	80	120	80	120	120	100	100	40	20	20	
Nº armónico	f [Hz]	FA										
1	50	0.91	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.92	0.96	0.93
3	150	0.68	0.79	0.76	0.79	0.79	0.79	0.76	0.76	0.81	0.88	0.86
5	250	0.79	0.81	0.80	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79	0.82	0.86	0.83
7	350	0.75	0.77	0.76	0.77	0.77	0.77	0.76	0.76	0.79	0.83	0.80
9	450	0.66	0.75	0.72	0.75	0.74	0.74	0.72	0.72	0.79	0.86	0.84
11	550	0.71	0.74	0.73	0.74	0.73	0.73	0.72	0.72	0.76	0.80	0.78
13	650	0.71	0.73	0.72	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.76	0.80	0.77
15	750	0.65	0.74	0.71	0.74	0.73	0.73	0.71	0.71	0.79	0.86	0.83
17	850	0.70	0.72	0.71	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71	0.75	0.79	0.76
19	950	0.69	0.72	0.71	0.72	0.71	0.71	0.70	0.70	0.75	0.79	0.76
21	1050	0.65	0.73	0.71	0.73	0.73	0.73	0.70	0.70	0.79	0.85	0.83

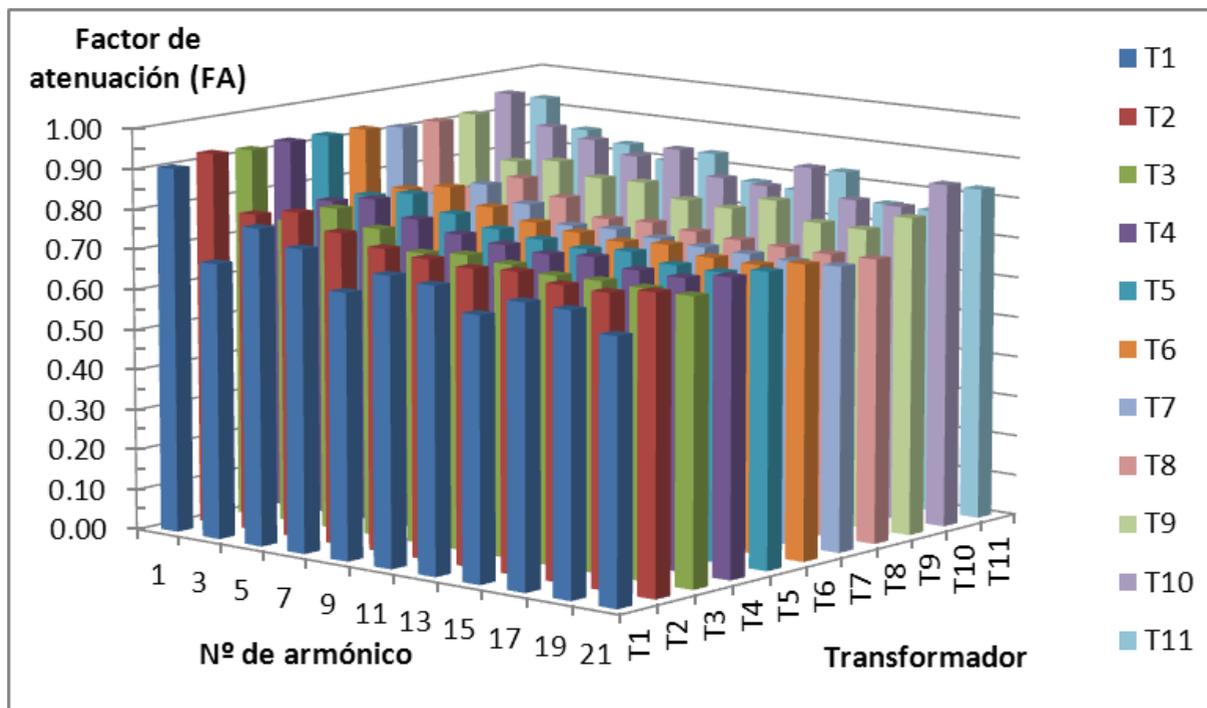


Figura 7.4.1.13. Factor de atenuación de los primeros 21 armónicos en cada uno de los 11 transformadores MT/BT de la red simulada.

Globalmente, en este escenario, los factores de atenuación son menores con respecto a los del escenario 2, es decir hay mayor atenuación de los armónicos, pero menos atenuación de la componente fundamental en los transformadores T1, T7 y T8. Con respecto al escenario 1 sucede algo similar, pero la diferencia no es tan marcada.

Comparación de los tres escenarios:

A continuación se presentan las curvas mostradas anteriormente, pero en un mismo gráfico, con el fin de comparar fácilmente los tres escenarios.

- **Distorsión de tensión:**

Tabla 7.4.1.13. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, en el lado secundario, y en el extremo de línea, para cada uno de los tres escenarios.

Transformador	THDuf%								
	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	E1- A. Prim	E1- A. Sec.	E1- Ext. de línea	E2- A. Prim	E2- A. Sec.	E2- Ext. de línea	E3- A. Prim	E3- A. Sec.	E3- Ext. de línea
T0	0.00	0.63	1.06	0.00	0.87	1.46	0.00	1.70	2.84
T1	0.98	2.50	8.62	1.35	3.39	10.77	2.62	5.72	12.04
T2	1.01	2.66	6.00	1.39	3.56	7.49	2.70	5.90	9.21
T3	1.01	2.63	6.78	1.39	3.53	8.46	2.71	5.90	10.05
T4	1.01	2.67	6.01	1.40	3.57	7.50	2.72	5.92	9.23
T5	1.04	2.71	6.07	1.43	3.63	7.59	2.79	6.03	9.35
T6	1.04	2.71	6.06	1.43	3.62	7.58	2.77	6.01	9.34
T7	1.05	2.70	6.86	1.45	3.63	8.56	2.81	6.05	10.20
T8	1.06	2.71	6.86	1.45	3.63	8.56	2.82	6.06	10.21
T9	1.06	2.28	5.47	1.46	3.06	6.75	2.83	5.28	8.21
T10	1.06	2.11	3.52	1.46	2.82	4.39	2.83	4.92	5.92
T11	1.06	2.30	4.32	1.46	3.07	5.37	2.84	5.26	7.06

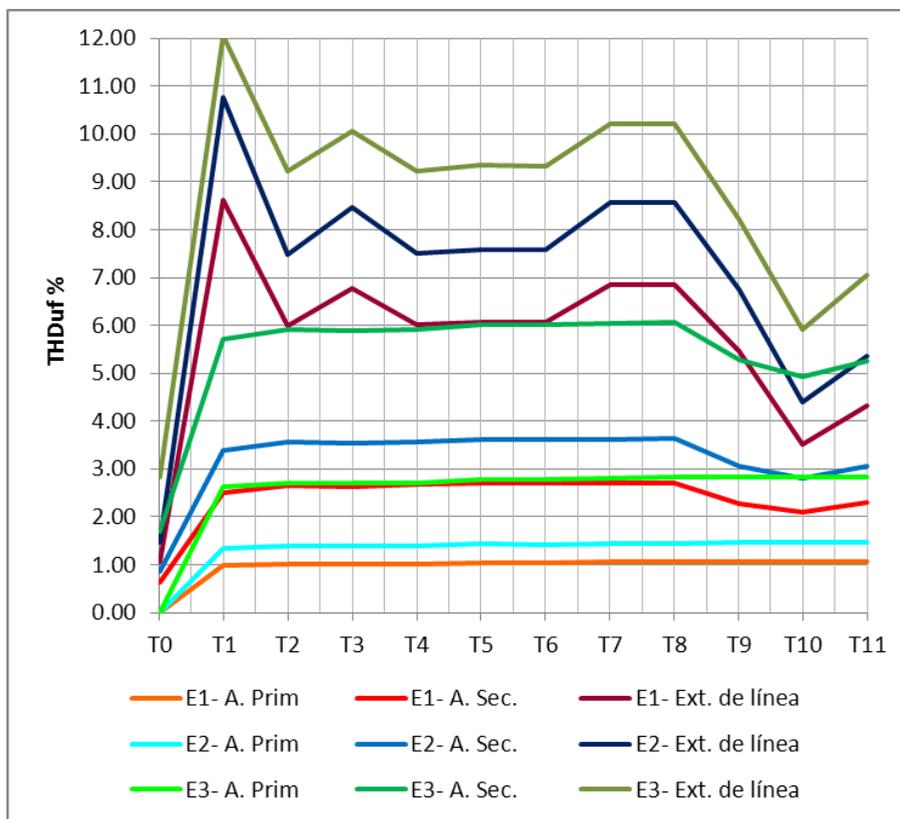


Figura 7.4.1.14. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, en el lado secundario, y en el extremo de línea, para cada uno de los tres escenarios.

• **Distorsión de corriente:**

Tabla 7.4.1.14. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, y en el lado secundario, para cada uno de los tres escenarios simulados.

Transformador	THDif%					
	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	E1- A. Prim	E1- A. Sec.	E2- A. Prim	E2- A. Sec.	E3- A. Prim	E3- A. Sec.
T0	3.06	3.08	4.57	4.60	7.39	7.44
T1	3.07	12.49	4.67	17.76	7.39	17.76
T2	3.07	14.10	4.55	19.21	7.45	19.67
T3	3.07	13.59	4.55	18.61	7.42	19.07
T4	3.07	14.11	4.56	19.22	7.45	19.69
T5	3.06	14.09	4.54	19.19	7.41	19.65
T6	3.06	14.08	4.54	19.18	7.42	19.64
T7	3.07	13.69	4.67	19.24	7.41	19.17
T8	3.07	13.69	4.67	19.25	7.41	19.17
T9	3.18	14.67	4.69	19.92	7.74	20.38
T10	3.17	15.30	4.67	20.65	7.80	21.21
T11	3.17	15.38	4.68	20.74	7.73	21.22

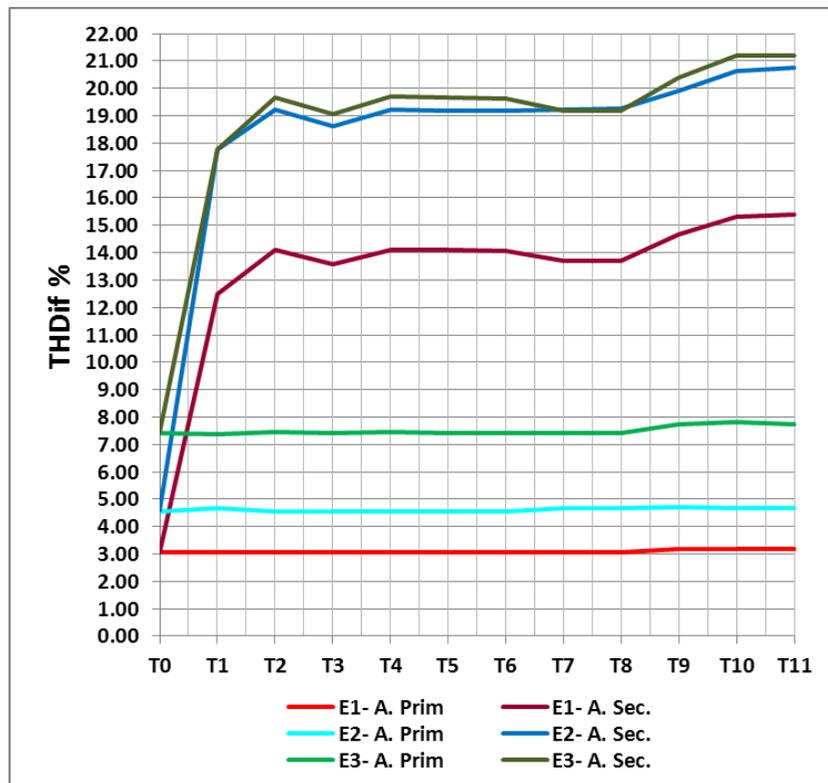


Figura 7.4.1.15. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, y en el lado secundario, para cada uno de los tres escenarios simulados.

Tabla 7.4.1.15. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT para cada uno de los tres escenarios. (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

Corriente	THDif%		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
IA1	3.06	4.57	7.39
IM1	3.08	4.60	7.44
IM2	3.08	4.59	7.45
IM3	3.08	4.60	7.46
IM4	3.08	4.61	7.46
IM5	3.10	4.67	7.50
IM6	3.11	4.67	7.55
IM7	3.17	4.68	7.74
IM8	3.17	4.67	7.75
IMT11	3.17	4.68	7.73

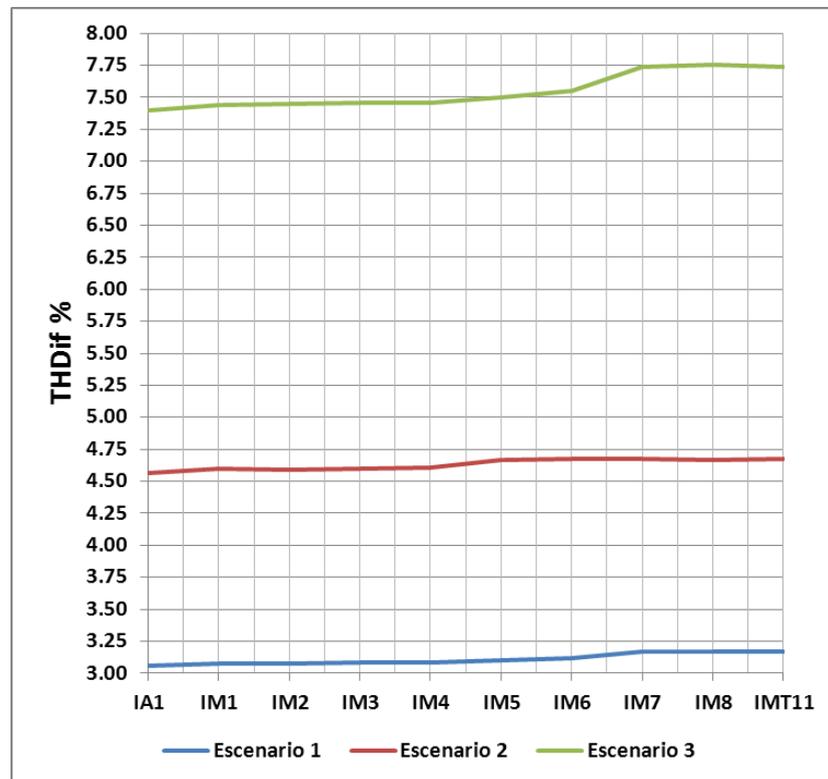


Figura 7.4.1.16. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea en distintos puntos del circuito serie de la red MT para cada uno de los tres escenarios. (IA1 está aguas arriba, IMT11 está aguas abajo).

• **Corrientes medidas en los transformadores**

Tabla 7.4.1.16. Corrientes de los transformadores medidas en baja tensión en el escenario 1.

Transformador	Escenario 1- Valores medidos en el lado de baja tensión										
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
I _{rms} [A]	481.37	397.48	590.73	397.10	594.86	595.30	488.63	488.41	196.74	103.79	99.91
I ₁ [A]	477.66	393.58	585.35	393.20	589.04	589.49	484.11	483.89	194.65	102.59	98.75
I _h [A]	59.65	55.48	79.56	55.48	82.98	82.98	66.27	66.27	28.56	15.70	15.19
I _{neutro} [A]	173.43	162.42	232.47	162.42	242.93	242.93	193.72	193.72	83.62	46.07	44.57
I ₃ [% de I ₁]	12.02	13.67	13.15	13.68	13.66	13.65	13.25	13.26	14.22	14.87	14.95
I ₅ [% de I ₁]	2.50	2.51	2.50	2.51	2.50	2.50	2.50	2.50	2.59	2.58	2.59
I ₇ [% de I ₁]	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.95	0.95	0.95
I ₉ [% de I ₁]	1.36	1.50	1.46	1.50	1.50	1.50	1.47	1.47	1.61	1.65	1.66
I ₁₁ [% de I ₁]	1.06	1.07	1.06	1.07	1.06	1.06	1.06	1.06	1.12	1.11	1.11
I ₁₃ [% de I ₁]	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.86	0.86	0.86
I ₁₅ [% de I ₁]	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.30	0.30	0.30
I ₁₇ [% de I ₁]	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.77	0.76	0.77
I ₁₉ [% de I ₁]	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24
I ₂₁ [% de I ₁]	0.27	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.32	0.33	0.33
THDi%	12.49	14.10	13.59	14.11	14.09	14.08	13.69	13.69	14.67	15.30	15.38

Tabla 7.4.1.17. Corrientes de los transformadores medidas en baja tensión en el escenario 2.

Transformador	Escenario 2- Valores medidos en el lado de baja tensión										
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
I_{rms} [A]	419.59	353.43	525.59	353.14	529.08	529.42	425.54	425.38	175.29	91.91	88.91
I₁ [A]	413.13	347.08	516.72	346.79	519.60	519.95	417.87	417.71	171.92	90.02	87.06
I_h [A]	73.35	66.67	96.14	66.67	99.73	99.74	80.40	80.40	34.24	18.58	18.05
I_{neutro} [A]	212.25	194.26	279.61	194.26	290.63	290.63	233.94	233.94	99.78	54.29	52.74
I₃ [% de I₁]	16.87	18.39	17.77	18.40	18.38	18.36	18.39	18.40	19.05	19.81	19.90
I₅ [% de I₁]	3.29	3.20	3.20	3.21	3.20	3.20	3.29	3.29	3.30	3.29	3.29
I₇ [% de I₁]	2.21	2.16	2.16	2.16	2.15	2.15	2.21	2.21	2.24	2.23	2.23
I₉ [% de I₁]	2.84	3.02	2.94	3.02	3.01	3.01	3.03	3.04	3.22	3.28	3.30
I₁₁ [% de I₁]	1.76	1.72	1.72	1.72	1.71	1.71	1.76	1.76	1.79	1.78	1.78
I₁₃ [% de I₁]	1.35	1.32	1.31	1.32	1.31	1.31	1.35	1.35	1.37	1.36	1.37
I₁₅ [% de I₁]	0.30	0.32	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.34	0.35	0.35
I₁₇ [% de I₁]	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.99	0.99	1.01	1.01	1.01
I₁₉ [% de I₁]	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.61	0.60	0.60
I₂₁ [% de I₁]	0.81	0.86	0.84	0.86	0.85	0.85	0.86	0.86	0.92	0.93	0.94
THDi%	17.76	19.21	18.61	19.22	19.19	19.18	19.24	19.25	19.92	20.65	20.74

Tabla 7.4.1.18. Corrientes de los transformadores medidas en baja tensión en el escenario 1.

Transformador	Escenario 3- Valores medidos en el lado de baja tensión										
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
I_{rms} [A]	400.02	328.92	489.44	328.67	492.49	492.79	405.44	405.29	163.11	85.24	82.66
I₁ [A]	393.86	322.74	480.77	322.48	483.25	483.55	398.19	398.04	159.82	83.39	80.86
I_h [A]	69.95	63.50	91.70	63.49	94.96	94.97	76.32	76.32	32.58	17.69	17.16
I_{neutro} [A]	190.68	176.21	253.24	176.21	263.64	263.64	211.04	211.04	90.32	49.28	47.85
I₃ [% de I₁]	15.63	17.65	17.02	17.66	17.63	17.62	17.13	17.13	18.22	19.06	19.09
I₅ [% de I₁]	1.93	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	2.00	2.01	2.00
I₇ [% de I₁]	3.90	3.93	3.91	3.93	3.91	3.91	3.91	3.91	4.07	4.09	4.07
I₉ [% de I₁]	3.20	3.56	3.45	3.56	3.55	3.55	3.47	3.47	3.81	3.96	3.95
I₁₁ [% de I₁]	4.63	4.67	4.65	4.67	4.65	4.65	4.64	4.64	4.88	4.92	4.89
I₁₃ [% de I₁]	2.99	3.02	3.01	3.02	3.01	3.01	3.00	3.00	3.17	3.19	3.17
I₁₅ [% de I₁]	2.08	2.30	2.23	2.30	2.30	2.29	2.24	2.24	2.49	2.59	2.58
I₁₇ [% de I₁]	2.10	2.12	2.11	2.12	2.11	2.11	2.11	2.11	2.23	2.25	2.23
I₁₉ [% de I₁]	1.10	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.17	1.18	1.17
I₂₁ [% de I₁]	1.24	1.37	1.33	1.37	1.37	1.37	1.34	1.34	1.49	1.54	1.54
THDi%	17.76	19.67	19.07	19.69	19.65	19.64	19.17	19.17	20.38	21.21	21.22

• **Síntesis de la Normativa vigente:**

En el Capítulo 4 se analizó la normativa vigente que establece los límites de emisiones armónicas y los niveles de compatibilidad electromagnética en redes de Baja Tensión (BT), Media Tensión (MT) y Alta Tensión (AT). En la Tabla 7.4.1.19 se resumen los mismos.

Tabla 7.4.1.19. Niveles de compatibilidad electromagnética y límites de emisiones armónicas según la normativa vigente.

Normativa	THDu%		THDi%	
	BT y MT	AT	BT y MT	AT
IEC 61000-3-6	8	3	-	-
IEEE 519	5	2,5	20	10
Res. ENRE 99/97	-	-	20	12
Res. ENRE 184/00	8	3	-	-

En la Figura 7.4.1.17 se graficaron los THDu% de cada transformador en el lado primario, secundario y extremo de línea para los tres escenarios, y los niveles de compatibilidad según la normativa vigente.

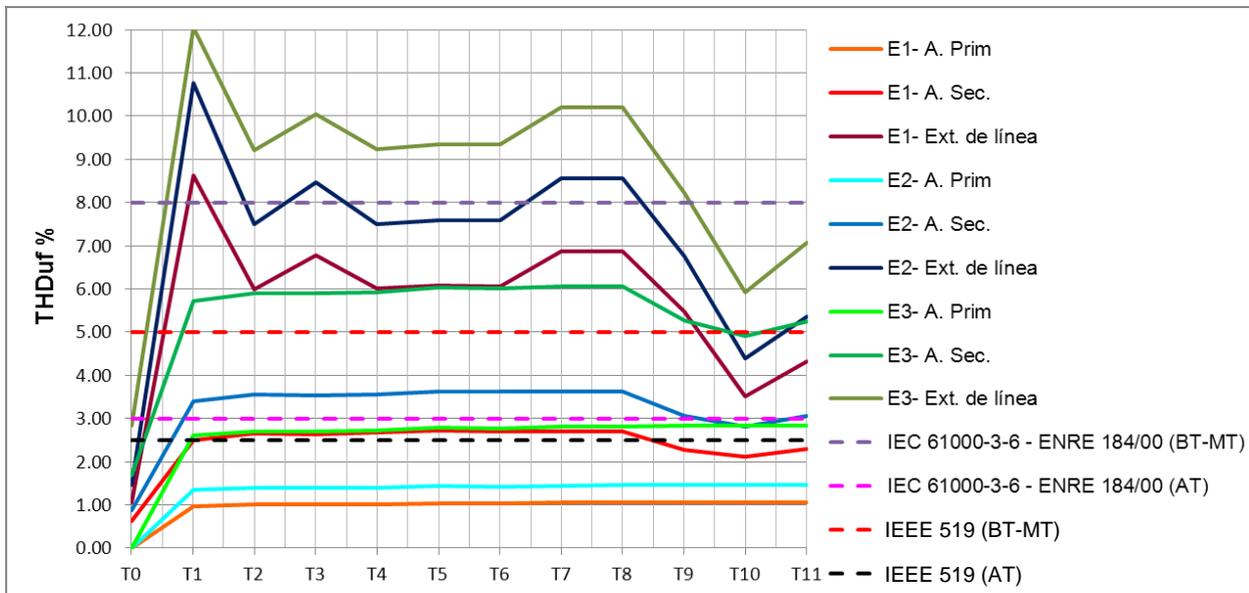


Figura 7.4.1.20. Tasa de distorsión armónica de la tensión de fase de cada transformador en el lado primario, en el lado secundario, y en el extremo de línea, para cada uno de los tres escenarios y niveles de compatibilidad electromagnética (THDu% máx.) según la normativa vigente.

Se concluye que en el **escenario 1** (electrodomésticos y lámparas de distintos tipos, según la distribución actual), solo en el extremo de línea del transformador MT/BT T1, el THDu% supera el nivel máximo del 8% en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 184/00 del ENRE a nivel Nacional y de la Norma IEC 61000-3-6 a nivel Internacional. Mientras que en los extremos de línea de los transformadores MT/BT T1-T9 el THDu% supera el nivel máximo del 5% en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional, la cual es más conservadora.

En el **escenario 2** (los mismos electrodomésticos del escenario 1 y todas las lámparas convencionales reemplazadas por lámparas fluorescentes compactas), en los extremos de línea de los transformadores MT/BT T1, T3, T7 y T8 el THDu% supera el nivel máximo del 8% en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 184/00 del ENRE a nivel Nacional y de la Norma IEC 61000-3-6 a nivel Internacional. Mientras que en los extremos de línea de todos los transformadores MT/BT, excepto T10, el THDu% supera el nivel máximo del 5% en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional.

En el **escenario 3** (los mismos electrodomésticos del escenario 1 y todas las lámparas convencionales reemplazadas por lámparas LED), en los extremos de línea de todos los transformadores MT/BT, excepto T10 y T11, el THDu% supera el nivel máximo del 8% en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 184/00 del ENRE a nivel Nacional y de la Norma IEC 61000-3-6 a nivel Internacional. Mientras que en los extremos de línea de todos los transformadores MT/BT, y en los secundarios de todos los transformadores MT/BT, excepto T10, el THDu% supera el nivel máximo del 5% en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional.

En la Figura 7.4.1.18 se graficaron los THDi% de cada transformador en el lado primario y, secundario, y los límites de emisiones armónicas según la normativa vigente.

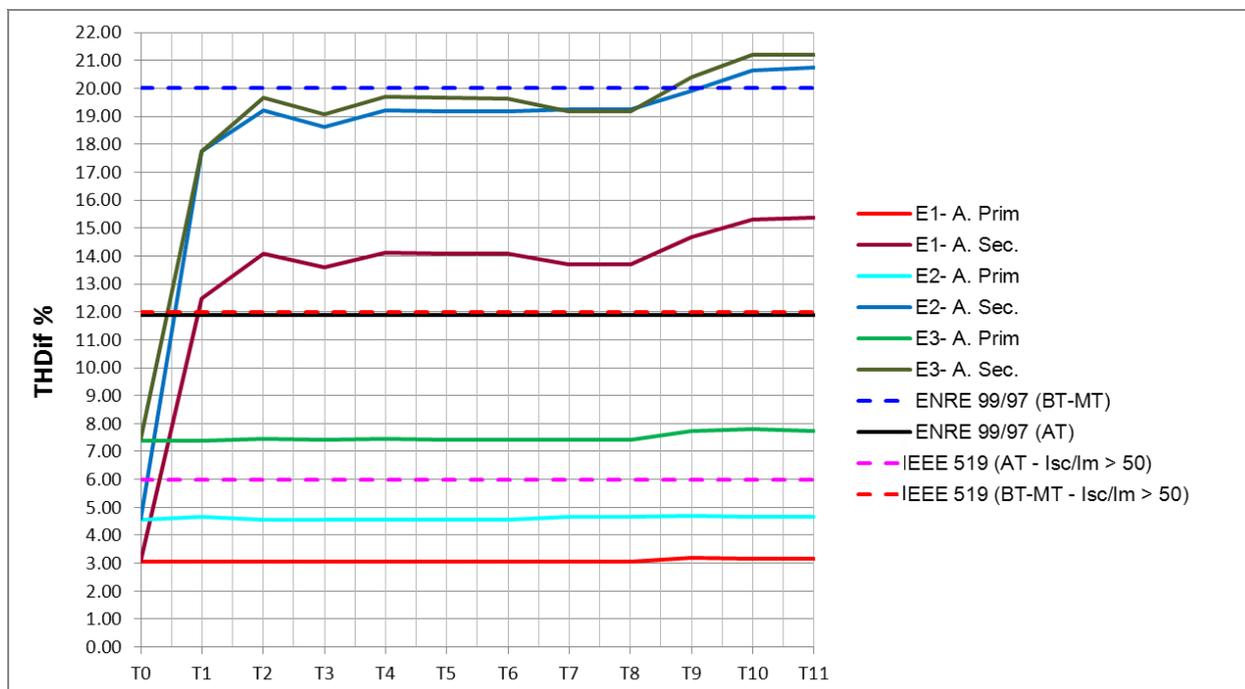


Figura 7.4.1.18. Tasa de distorsión armónica de la corriente de línea de cada transformador en el lado primario, y en el lado secundario, para cada uno de los tres escenarios simulados y límites de emisiones armónicas (THDi% máx.) según la normativa vigente.

Se concluye que en el **escenario 1**, en el primario y secundario de todos los transformadores, el THDi% está por debajo de los límites máximos del 12% en líneas de alta tensión y 20% en líneas de media y baja tensión, exigidos por la Resolución 99/97 del ENRE a nivel Nacional. Mientras que en los secundarios de todos los transformadores MT/BT el THDi% supera el límite 12% en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional, la cual es más conservadora.

En el **escenario 2**, solo en el secundario de los transformadores MT/BT T10 y T11, el THDi% está por encima del límite máximo del 20% en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 99/97 del ENRE a nivel Nacional. Mientras que en los secundarios de todos los transformadores MT/BT el THDi% supera el límite máximo del 12% en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional.

En el **escenario 3**, solo en el secundario de los transformadores MT/BT T9, T10 y T11, el THDi% está por encima del límite máximo del 20% en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 99/97 del ENRE a nivel Nacional. Mientras que, en el primario del transformador AT/MT T0, el THDi% está por encima del límite máximo del 6% en líneas de alta tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional. Y en los secundarios de todos los transformadores MT/BT el THDi% supera el límite máximo del 12% en líneas de baja tensión, exigido por la misma Norma.

7.4.2. Comparación de los resultados obtenidos con mediciones reales en subestaciones

Se presentan en forma sintética los datos de mediciones realizadas en una de las subestaciones de la ciudad de Necochea, que alimenta preferentemente a usuarios residenciales.

En la Figura 7.4.2.1 se observa el perfil de potencia activa en la subestación a lo largo de una semana.

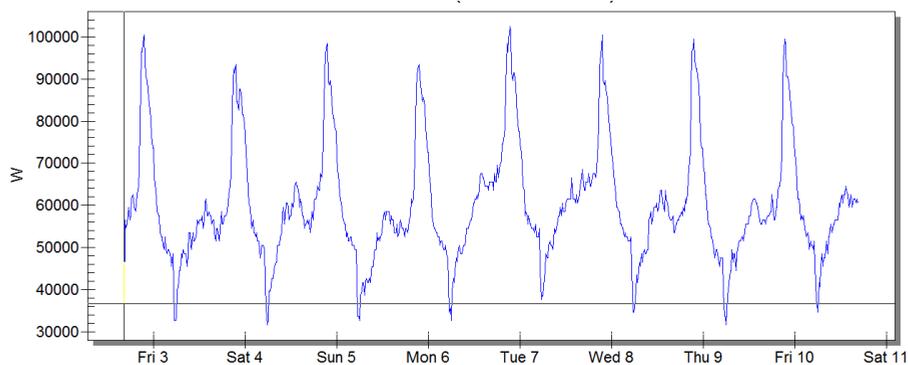


Figura 7.4.2.1. Perfil de potencia activa en la subestación transformadora registrada a lo largo una semana.

En la figura 7.4.2.2 se observa la típica variación de la corriente fundamental en una de las fases a lo largo de un día. Se distingue que la máxima corriente se da entre las 21.00 y 23.00 hs, parte de la banda horaria en la que se realizaron las simulaciones (19.00- 23.00hs).

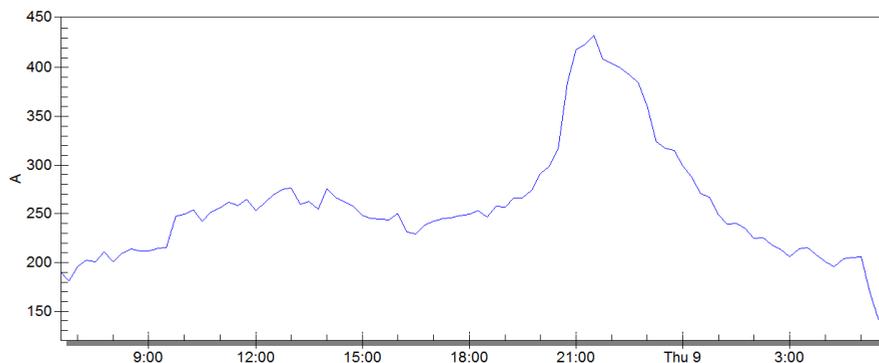


Figura 7.4.2.2. Variación de la componente fundamental de corriente en la fase 1 a lo largo de un día.

En la Figura 7.4.2.3 está graficada la evolución de los armónicos 3, 5 y 7 como porcentaje de la fundamental en la banda horaria 15hs- 6hs de la fase 1. En la banda horaria 19.00 – 23.00 hs, el armónico 3 a las 21hs varía entre el 10% y 12% de la fundamental, mientras que en el Escenario 1 simulado varía entre 12.02 y 14.95 % en

los 11 transformadores (Tabla 7.4.1.16). El armónico 5 en el mismo horario varía entre el 2% y 6% de la fundamental, mientras que en el Escenario 1 varía entre 2.50 y 2.59 % en los 11 transformadores. Por último, el armónico 7 varía entre un 1.8 y 2.2 % aprox, y en el Escenario 1 varía entre 0.91 y 0.95%.

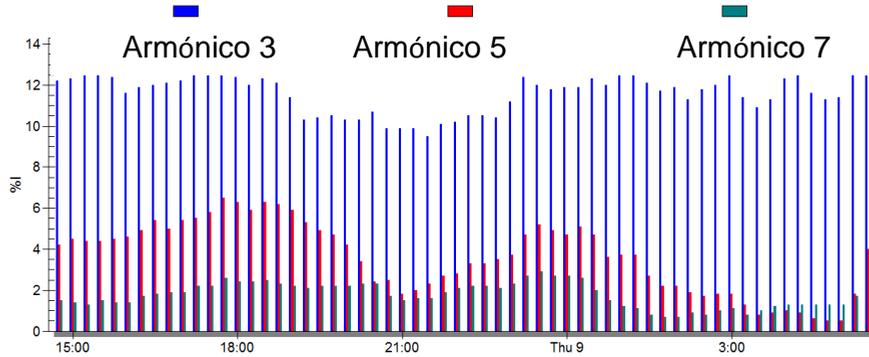


Figura 7.4.2.3. Evolución de los componentes armónicos 3, 5 y 7, en la banda horaria 15hs-6hs de la fase 1.

En la Figura 7.4.2.4 se puede apreciar la variación del THDi% entre las 11hs y 7hs en las tres fases. En la banda horaria 19.00 – 23.00 hs el THDi% toma valores comprendidos en el intervalo 9 - 14% aproximadamente, mientras que en el Escenario 1 varía entre un 12.49 y 15.38% en los 11 transformadores (Tabla 7.4.1.16)

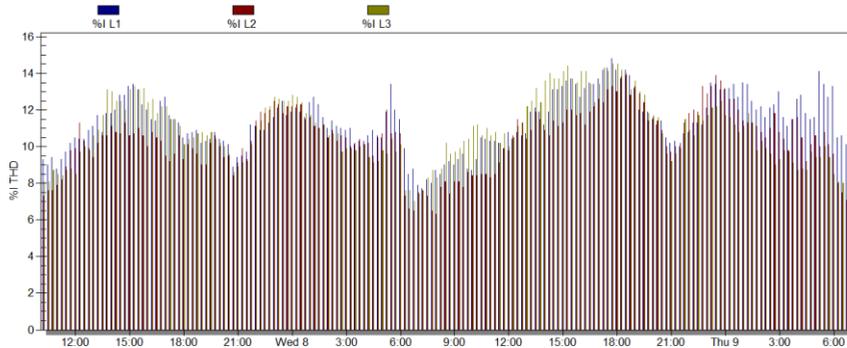


Figura 7.4.2.4. Variación del THDi% entre las 11hs y 7hs en las tres fases.

Por lo mencionado, se puede concluir que los resultados obtenidos en la simulación del Escenario 1, el cual pretende representar el consumo actual de los usuarios residenciales encuestados, no dista mucho de las mediciones tomadas en una subestación transformadora real que alimenta preferentemente a usuarios residenciales.

CAPÍTULO 8

Aspectos Económicos

8.1. Introducción

Se realiza un análisis económico comparando la situación actual con una futura que supone reemplazar las lámparas actualmente utilizadas en las viviendas encuestadas por la tecnología LED. El cálculo económico se hace sobre las lámparas incandescentes, halógenas y dicroicas porque su consumo energético respecto a las lámparas LED justifica este análisis. No así con las lámparas LFC puesto que su eficiencia energética es prácticamente similar a las LED a un costo inicial por lámpara muchísimo menor. Las LFC consideradas tienen una etiqueta de eficiencia energética clase A que indica que consume sólo un 55% de una de tipo medio (Norma IRAM 62404-2).

En el análisis económico se consideran los siguientes factores:

- Costo y vida útil de la lámpara a reemplazar y de la lámpara LED de reemplazo.
- Horas de funcionamiento de la lámpara a reemplazar.
- Costo de la energía eléctrica consumida.

El primer análisis se realiza calculando el PSR- Período Simple de Repago. Si bien este método es el más simple y da una idea del tiempo que llevaría amortizar la nueva lámpara, no es el más apropiado ya que no considera el valor futuro del dinero. Como segunda opción se realiza el análisis de rentabilidad calculando el CAT- Costo Anualizado Total, que considera el valor temporal del dinero. En ambos análisis se calculó el costo de la energía eléctrica consumida utilizando la tarifa con subsidio (0,2476 \$/KWh) y la tarifa sin subsidio (0,5733 \$/KWh), correspondientes a un usuario T1R- Residencial cuyo consumo mensual es entre 100 y 200 KWh, puesto que el consumo promedio de los usuarios encuestados es de 182,4 KWh/mes. Los datos fueron extraídos del cuadro tarifario de EDEA de junio de 2013. (EDEA, 2013). Para calcular el CAT se utilizó una tasa de interés del 10% anual, tasa promedio de plazos fijos de diversos Bancos Argentinos.

8.1.1. Cálculo del Período Simple de Repago (PSR)

Se utiliza la expresión (1), la cual expresa matemáticamente que el PSR es el cociente entre la inversión inicial y el ahorro en el primer año.

$$\text{PSR} = \Delta I / (\Delta O \& M) \quad (1)$$

La inversión inicial es igual al Costo inicial de la tecnología Eficiente (CE) de acuerdo a la expresión (2).

$$\Delta I = CE \quad (2)$$

El ahorro anual obtenido en Operación y Mantenimiento se calcula sumando dos términos. El primer término representa el ahorro energético a lo largo de un año, y se calcula multiplicando el Precio de la Energía (PE) por la diferencia entre el consumo anual de Energía de la tecnología Convencional (EC) y el consumo anual de Energía de la tecnología Eficiente (EE) tal como se expresa analíticamente en (3). El segundo término representa el ahorro debido a no tener que comprar la tecnología convencional a lo largo de la vida útil de la tecnología eficiente, y se calcula dividiendo el costo de las unidades de la tecnología convencional necesarias durante la vida útil de la tecnología eficiente por los años de vida útil de esta última.

$$\Delta O\&M = PE \cdot (EC - EE) + CC = CEC - CEE + CC \quad (3)$$

8.1.2. Cálculo del Costo Anualizado Total (CAT)

Se utiliza la expresión (4), la cual expresa que el CAT es igual a la inversión inicial (C) anualizada durante la vida útil (N años) a través del Factor de Recupero de Capital (FRC), utilizando una tasa de descuento (i), expresión (5).

$$CAT = C \cdot FRC_{i, N} + PE \cdot E \quad (4)$$

$$FRC = \frac{i \cdot 1+i^N}{1+i^N - 1} \quad (5)$$

Nomenclatura:

PSR: Periodo Simple de Repago [años]

ΔI: Inversión adicional [\$]

ΔO&M: Ahorro anual o beneficio obtenido en Operación y Mantenimiento [\$/año]

CE: Costo inicial de la tecnología Eficiente [\$]

CC: Costo anual de la tecnología Convencional [\$/año]

PE: Precio de la Energía [\$/kWh]

EE: Consumo anual de Energía de la tecnología Eficiente [kWh/año]

EC: Consumo anual de Energía de la tecnología Convencional [kWh/año]

CEE: Costo anual de Energía de la tecnología Eficiente [\$/año]

CEC: Costo anual de Energía de la tecnología Convencional [\$/año]

TO: Tiempo de Operación Anual [h/año]

VUE: Vida Útil de funcionamiento de la tecnología Eficiente [años]

VUC: Vida Útil de funcionamiento de la tecnología Convencional [años]

CAT: Costo Anualizado Total [\$]

C: Inversión inicial [\$]

FRC: Factor de Recupero de Capital (adimensional)

E: Consumo anual de Energía de la tecnología analizada [kWh/año]

8.2. Análisis Económico

En la Tabla 8.2.1 se muestran los datos de las lámparas utilizadas actualmente, que figuran con una letra A y las lámparas LED que las reemplazan por tener la misma calidad lumínica, que figura con una letra B.

Tabla 8.2.1. Características de las lámparas analizadas.

Tipo de lámpara	Potencia [W]	Tensión [V]	Zócalo	Vida útil [h]	Costo inicial [\$]
Halógena clara (A)	28	220	E27	2.000	15,90
Globo A60 7 LED (B)	7	220	E27	20.000	263,20
Halógena clara (A)	42	220	E27	2.000	15,90
Master LED A60 (B)	12	220	E27	25.000	367,90
Halógena clara (A)	53	220	E27	2.000	15,90
Master LED A60 (B)	15	220	E27	25.000	460,70
Halógena clara (A)	70	220	E27	2.000	15,90
2 x Globo A60 7 LED (B)	14	220	E27	20.000	526,40
Dicroica halógena JDR (A)	20	220	E27	2.000	13,60
JDR 4 LED (B)	4	220	E27	20.000	226,70
Dicroica halógena JDR (A)	35	220	E27	2.000	13,60
JDR 4 LED (B)	4	220	E27	20.000	226,70
Dicroica halógena JDR (A)	50	220	E27	2.000	13,60
R63 6 LED (B)	12	220	E27	30.000	415,60

Tabla 8.2.2. Tipos de lámparas analizadas.

Halógena clara	Globo A60 7 LED	Master LED A60	Dicroica halógena JDR	JDR 4 LED	R63 6 LED
					

En las Tablas 8.2.3 y 8.2.4 se presentan los cálculos del PSR y CAT de los reemplazos analizados para 8 horas de encendido diario, y tarifa con y sin subsidio respectivamente. Con estas tablas, variando el tiempo diario de encendido se obtuvieron los gráficos que se presentan a continuación de las mismas.

Tabla 8.2.3. Cálculo del PSR y CAT de los reemplazos analizados para 8 horas de encendido diario y tarifa con subsidio.

Lámp.	Pot. [W]	VU [h]	T.diario [h]	TO [h/año]	Reemplazo analizado					PSR [años]	C [\$]	FRC	CAT [\$]
					VUC VUE [años]	CC CE [\$/año]	PE [\$/kWh]	CEC CEE [\$/año]					
Reemplazo de lámpara Halógena de 28W por lámpara LED Difusa de 7W													
HAL.	28	2000	8	2920	0.68	23.21	0.2476	20.24	-	15.9	1.582	45.40	
LED	7	20000	8	2920	6.85	263.20	0.2476	5.06	6.9	263.2	0.209	59.96	
Reemplazo de lámpara Halógena de 42W por lámpara LED Difusa de 12W													
HAL.	42	2000	8	2920	0.68	24.14	0.2476	30.37	-	15.9	1.582	55.53	
LED	12	25000	8	2920	8.56	367.90	0.2476	8.68	8.0	367.9	0.179	74.63	
Reemplazo de lámpara Halógena de 53W por lámpara LED Difusa de 15W													
HAL.	53	2000	8	2920	0.68	24.14	0.2476	38.32	-	15.9	1.582	63.48	
LED	15	25000	8	2920	8.56	460.70	0.2476	10.84	8.9	460.7	0.179	93.44	
Reemplazo de lámpara Halógena de 70W por 2 lámparas LED's Difusas de 7W c/u													
HAL.	70	2000	8	2920	0.68	23.21	0.2476	50.61	-	15.9	1.582	75.77	
LED	14	20000	8	2920	6.85	526.40	0.2476	10.12	8.3	526.4	0.209	119.92	
Reemplazo de lámpara Dicroica de 20W por lámpara LED Dicroica de 4W													
DIC.	20	2000	8	2920	0.68	19.86	0.2476	14.46	-	13.6	1.582	35.98	
LED	4	20000	8	2920	6.85	226.70	0.2476	2.89	7.2	226.7	0.209	50.18	
Reemplazo de lámpara Dicroica de 35W por lámpara LED Dicroica de 4W													
DIC.	35	2000	8	2920	0.68	19.86	0.2476	25.30	-	13.6	1.582	46.83	
LED	4	20000	8	2920	6.85	226.70	0.2476	2.89	5.4	226.7	0.209	50.18	
Reemplazo de lámpara Dicroica de 50W por lámpara LED Dicroica de 12W													
DIC.	50	2000	8	2920	0.68	19.86	0.2476	36.15	-	13.6	1.582	57.67	
LED	12	30000	8	2920	10.27	415.60	0.2476	8.68	8.8	415.6	0.160	75.24	

Tabla 8.2.4. Cálculo del PSR y CAT de los reemplazos analizados para 8 horas de encendido diario y tarifa sin subsidio.

Lámp.	Pot. [W]	VU [h]	T.diario [h]	TO [h/año]	Reemplazo analizado					PSR [años]	C [\$]	FRC	CAT [\$]
					VUC VUE [años]	CC CE [\$/año]	PE [\$/kWh]	CEC CEE [\$/año]					
Reemplazo de lámpara Halógena de 28W por lámpara LED Difusa de 7W													
HAL.	28	2000	8	2920	0.68	23.21	0.5733	46.87	-	15.9	1.582	72.03	
LED	7	20000	8	2920	6.85	263.20	0.5733	11.72	4.5	263.2	0.209	66.62	
Reemplazo de lámpara Halógena de 42W por lámpara LED Difusa de 12W													
HAL.	42	2000	8	2920	0.68	24.14	0.5733	70.31	-	15.9	1.582	95.47	
LED	12	25000	8	2920	8.56	367.90	0.5733	20.09	4.9	367.9	0.179	86.04	
Reemplazo de lámpara Halógena de 53W por lámpara LED Difusa de 15W													
HAL.	53	2000	8	2920	0.68	24.14	0.5733	88.72	-	15.9	1.582	113.88	
LED	15	25000	8	2920	8.56	460.70	0.5733	25.11	5.2	460.7	0.179	107.70	
Reemplazo de lámpara Halógena de 70W por 2 lámparas LED's Difusas de 7W c/u													
HAL.	70	2000	8	2920	0.68	23.21	0.5733	117.18	-	15.9	1.582	142.34	
LED	14	20000	8	2920	6.85	526.40	0.5733	23.44	4.5	526.4	0.209	133.24	
Reemplazo de lámpara Dicroica de 20W por lámpara LED Dicroica de 4W													
DIC.	20	2000	8	2920	0.68	19.86	0.5733	33.48	-	13.6	1.582	55.00	
LED	4	20000	8	2920	6.85	226.70	0.5733	6.70	4.9	226.7	0.209	53.98	
Reemplazo de lámpara Dicroica de 35W por lámpara LED Dicroica de 4W													
DIC.	35	2000	8	2920	0.68	19.86	0.5733	58.59	-	13.6	1.582	80.11	
LED	4	20000	8	2920	6.85	226.70	0.5733	6.70	3.2	226.7	0.209	53.98	
Reemplazo de lámpara Dicroica de 50W por lámpara LED Dicroica de 12W													
DIC.	50	2000	8	2920	0.68	19.86	0.5733	83.70	-	13.6	1.582	105.22	
LED	12	30000	8	2920	10.27	415.60	0.5733	20.09	5.0	415.6	0.160	86.65	

En las Figuras 8.2.1 y 8.2.2 se observa el tiempo de amortización de las lámparas LED en función del tiempo diario de encendido, teniendo en cuenta las tarifas sin subsidio y con subsidio respectivamente. A mayor tiempo de encendido de la lámpara el tiempo

de amortización se reduce. Se observa que el tiempo de amortización es significativamente mayor en el caso de tener una tarifa subsidiada.

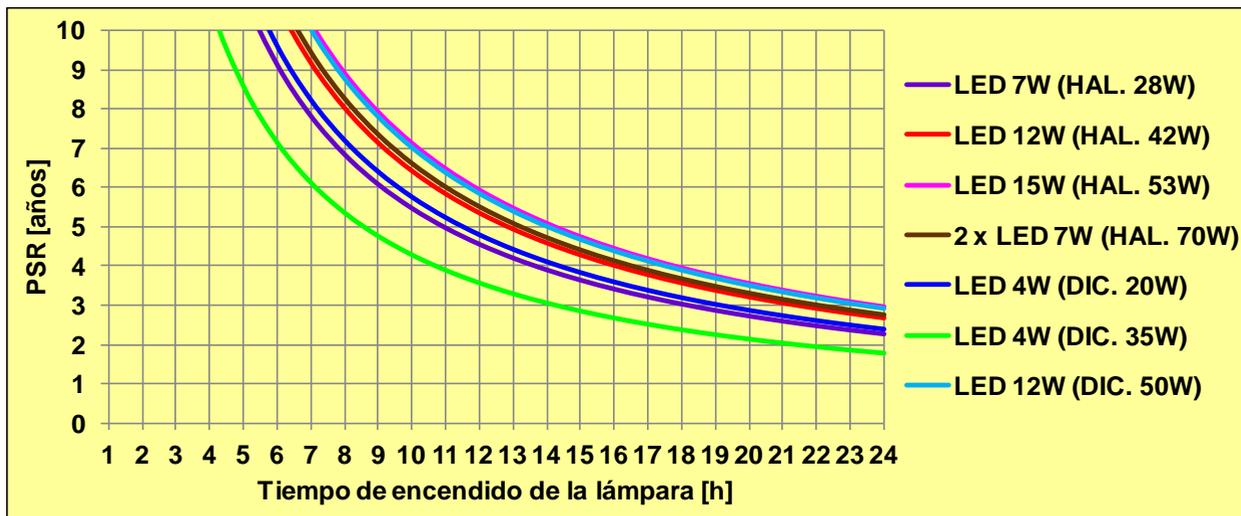


Figura 8.2.1. PSR de las lámparas LED. Tarifa con subsidio.

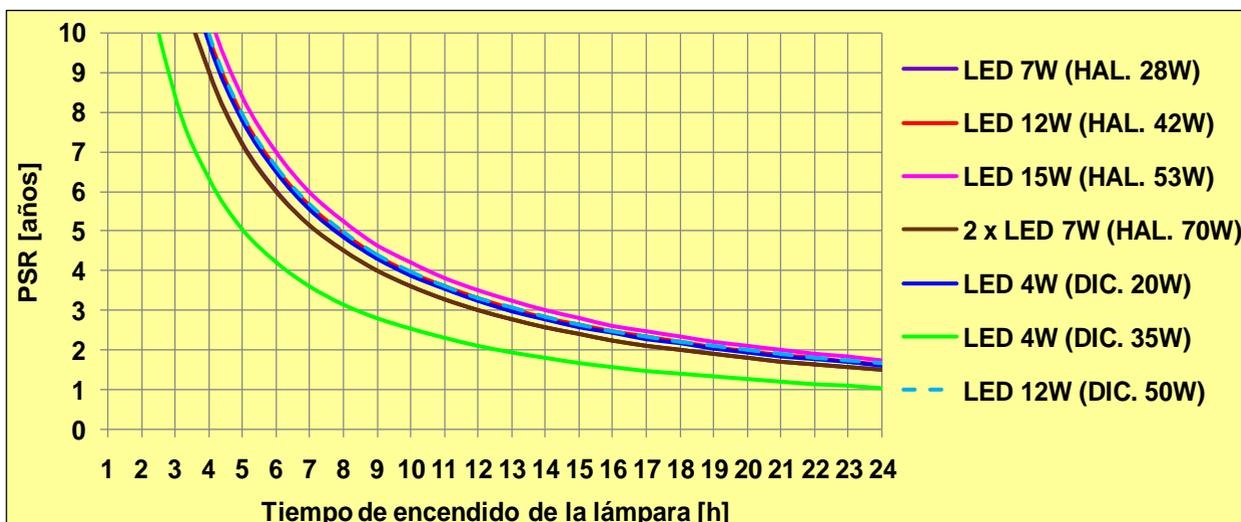


Figura 8.2.2. PSR de las lámparas LED. Tarifa sin subsidio.

Tomando como ejemplo las lámparas LED de 15W y 4W podemos analizar la vida útil y amortización en función del tiempo de encendido, Figuras 8.2.3 y 8.2.4. En el primer ejemplo, cuando la tarifa es subsidiada, es decir energía más barata, la lámpara se amortiza en un tiempo mayor a su vida útil. Mientras que con tarifa no subsidiada, es decir energía más cara, se amortiza en un tiempo mayor al 50% de su vida útil. En el segundo ejemplo, con tarifa subsidiada la lámpara se amortiza entre uno y dos años antes de su vida útil. Y en el caso sin subsidio se amortiza en menos del 50% de la vida útil. Este análisis se hizo para todas las lámparas y sus reemplazos, pero sólo se muestran estos ejemplos para claridad en la presentación gráfica.

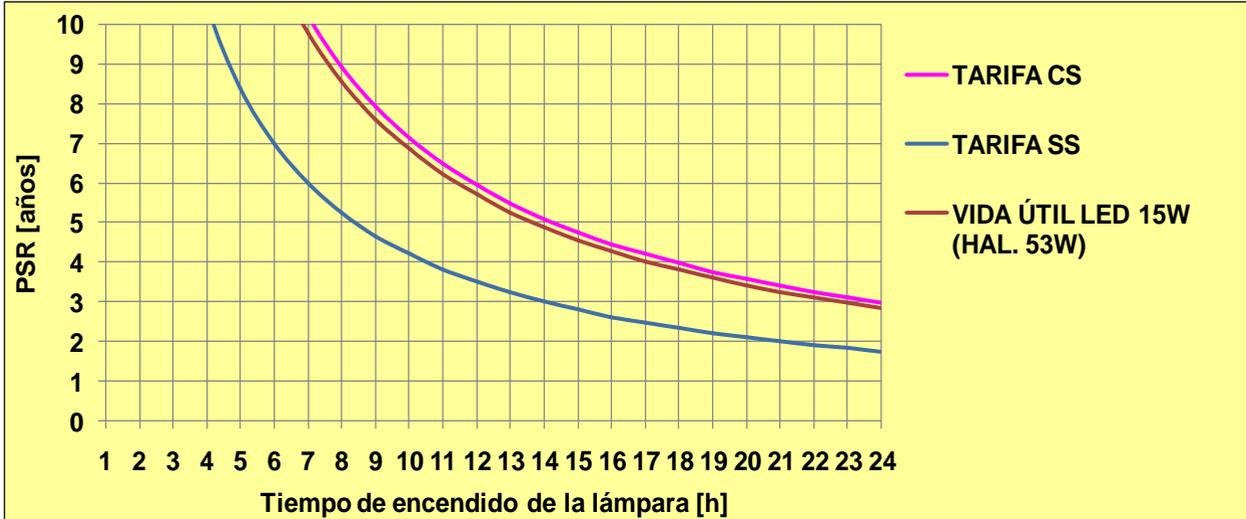


Figura 8.2.3. Vida útil y amortización, lámpara LED 15 [W].

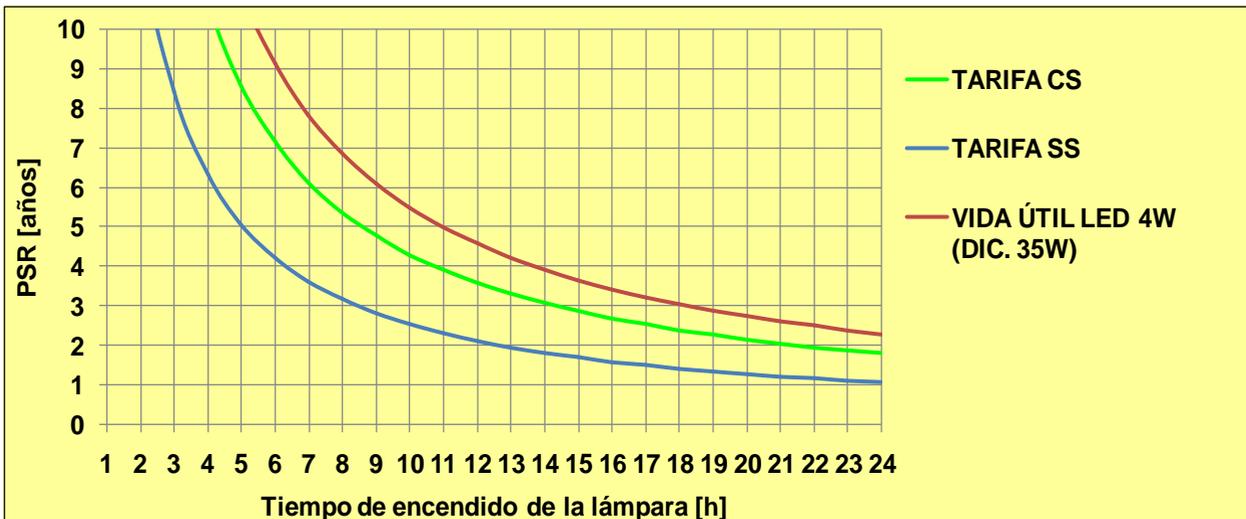


Figura 8.2.4. Vida útil y amortización, lámpara LED 4 [W].

En las Figuras 8.2.5 y 8.2.6 se presenta el costo anualizado total en función del tiempo diario de encendido de las lámparas halógenas y dicroicas y sus correspondientes reemplazos LED, para tarifa subsidiada y no subsidiada respectivamente. Con subsidio el costo anualizado total es mayor en las lámparas LED, esto evidencia que el reemplazo no es rentable, porque a pesar de que las halógenas tienen un mayor consumo, la energía es más económica que el costo de la lámpara LED. Con tarifa sin subsidio el reemplazo comienza a ser rentable para tiempos de encendido que se encuentran entre 3 y 7 horas diarias de encendido según el modelo de lámpara.

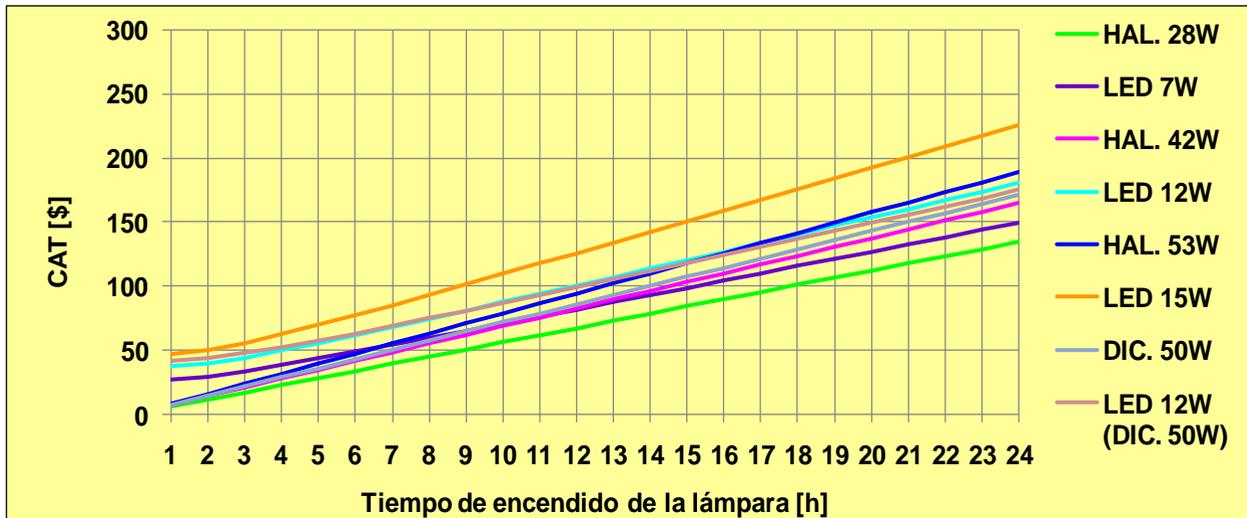


Figura 8.2.5. CAT de las lámparas LED. Tarifa con subsidio.

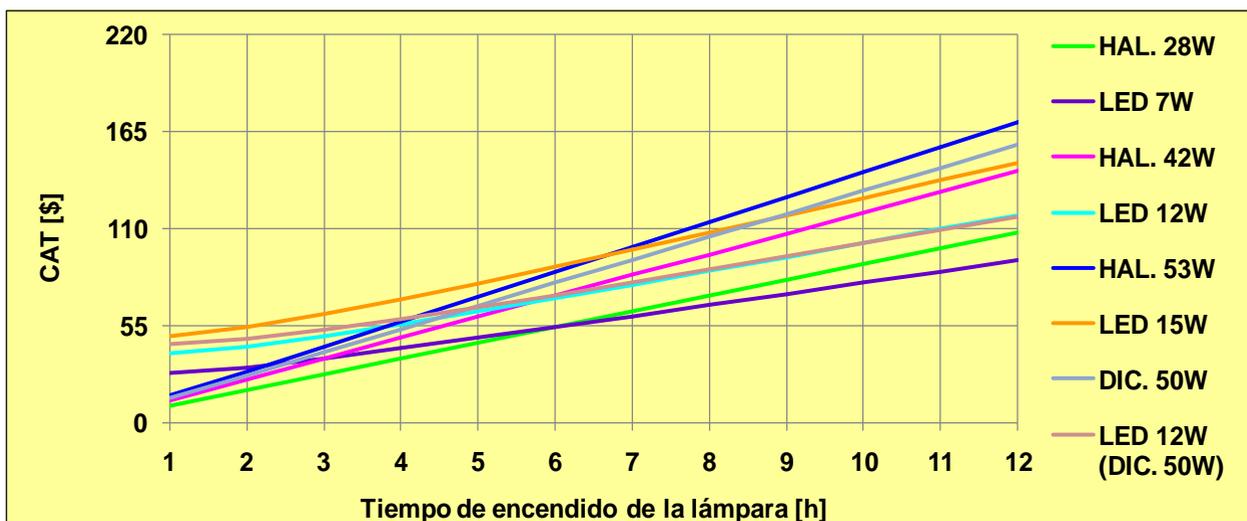


Figura 8.2.6. CAT de las lámparas LED. Tarifa sin subsidio.

Del análisis realizado, se puede concluir:

- A mayor tiempo de encendido de la lámpara el tiempo de amortización se reduce. Se observa que el tiempo de amortización es significativamente mayor en el caso de tener una tarifa subsidiada.
- Evaluando el período simple de repago, PSR (sin considerar el valor temporal del dinero), y tomando como ejemplo las lámparas LED de las Figuras 8.2.3 y 8.2.4, en el primer ejemplo se ve que cuando la tarifa es subsidiada, es decir energía más barata, la lámpara se amortiza en un tiempo mayor a su vida útil. Mientras que con tarifa no subsidiada, es decir energía más cara, se amortiza en un tiempo mayor al

50% de su vida útil. En el segundo ejemplo, con tarifa subsidiada la lámpara se amortiza entre uno y dos años antes de su vida útil. Y en el caso sin subsidio se amortiza en menos del 50% de la vida útil.

- Si se realiza el cálculo del costo anualizado total, CAT (teniendo en cuenta el valor futuro del dinero), se concluye que con subsidio el costo anualizado total es mayor en las lámparas LED, esto evidencia que el reemplazo no es rentable, porque a pesar de que las lámparas halógenas tienen un mayor consumo, la energía es más económica que el costo de la lámpara LED. Con tarifa sin subsidio el reemplazo comienza a ser rentable para tiempos de encendido que se encuentran entre 3 y 7 horas diarias de encendido según el modelo de lámpara.
- Si bien por el momento se concluye que el uso de lámparas LED en una vivienda no es rentable, es de esperarse que en un futuro con el avance tecnológico, uso masivo y reestructuración del cuadro tarifario, este escenario cambie. A pesar de esto se debe considerar el impacto ambiental positivo que representa el uso de lámparas LED, por el ahorro energético y reducción de las emisiones de CO₂ y mercurio al ambiente, entre otros impactos ambientales positivos, como se verá en el Capítulo 9.

CAPÍTULO 9

Aspectos Ambientales

9.1. Introducción

El desarrollo que se experimentó a partir de la mitad del Siglo XX a nivel mundial incrementó la demanda energética que ha sido satisfecha con la oferta de mayores cantidades de energía. Esto condujo a un rápido agotamiento de los recursos no renovables y los inevitables impactos sobre el medio ambiente.

La crisis energética es una situación actual que tiene múltiples causas, tales como, el creciente aumento de la población, el alto consumo de energía per cápita, la ineficiencia energética, la falta de fuentes masivas de energía renovable y la disminución de los recursos energéticos.

El calentamiento global es el impacto más significativo de la explotación de los combustibles fósiles, recursos energéticos más utilizados en la actualidad. Se evidencia en el aumento de los resultados observados en los promedios mundiales de la temperatura del aire y del océano, del deshielo generalizado y del nivel del mar [28]. La causa más directa de éste fenómeno es la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera.

El debate internacional sobre las medidas para contrarrestar el cambio climático y la crisis energética están sectorizados en modelos económicos, donde las políticas externas e internas compiten para establecer diversas medidas, entre ellas, las que apuntan a cambiar las formas de desarrollo de la sociedad, hacia las energías alternativas y la eficiencia energética.

La experiencia de los países desarrollados ha demostrado que el ahorro energético y la utilización racional de la energía son la base de la estrategia que pueden adoptar los países en desarrollo frente a un escenario de recursos energéticos limitados y con preocupaciones crecientes respecto a la protección del medio ambiente. La utilización racional de la energía implica una disminución de costos y un menor impacto negativo sobre el medio ambiente, sin alterar los niveles de bienestar económico y social.

Europa tiene experiencia de eficiencia energética a nivel nacional y comunitario, tanto en el ámbito público como privado. La política energética de la Unión Europea lleva una estrategia basada en las siguientes directrices:

- 1) uso de la eficiencia y el ahorro energético para reducir el consumo al máximo,
- 2) utilización creciente de las energías renovables para cubrir la mayor demanda posible, y
- 3) cobertura del suministro restante desde fuentes convencionales [29].

En diciembre de 2007, el Gobierno de Argentina lanzó el Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PRONUREE, Decreto 140/2007). Este decreto declaró el uso racional y eficiente de la energía de interés nacional, lo que representó también una estrategia energética para enfrentar el desbalance entre la oferta y la demanda. El PRONUREE, que se encuentra dentro de la responsabilidad de la Secretaría de Energía, pretende impulsar mecanismos para mejorar la eficiencia energética en los sectores consumidores de energía y para que esta sea promovida en el país como un compromiso real y con visión a largo plazo.

En este sentido la organización no gubernamental Greenpeace presentó en el marco de la campaña “Revolución Energética”, la necesidad de reemplazar las lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes compactas. El recambio de lámparas se planteó como una forma de reducción del consumo eléctrico doméstico, como respuesta a la presente crisis de suministro de energía. La organización elevó al Honorable Senado de la Nación un proyecto de ley para la prohibición de la comercialización de lámparas incandescentes, siguiendo las políticas implementadas en otros países [31].

Frente a esta propuesta, en diciembre de 2008, el Senado y la Cámara de Diputados de la Nación Argentina sancionaron la Ley N° 26473, que prohibió, a partir del 31 de diciembre de 2010, y entró en vigencia a partir del 1 de junio de 2011, la importación y comercialización de lámparas incandescentes de uso residencial general de potencia mayor a 25 [W] en todo el territorio de la República Argentina.

Más allá de los beneficios que plantean las lámparas fluorescentes compactas en cuanto a eficiencia energética y prolongada vida útil en comparación con la lámpara incandescente, es necesario considerar el contenido de mercurio de estas lámparas, característica que permite catalogarlas como residuo peligroso según lo establece la Ley Nacional N° 24051 [32].

Las lámparas fluorescentes compactas como parte de la corriente de residuos representan los impactos ambientales negativos asociados con los elementos y sustancias que las componen. La rotura de lámparas es una fuente antropogénica dispersa de emisiones de mercurio que se adicionan al ciclo global, y aunque el contenido de mercurio por lámpara es muy pequeño, la tendencia a un consumo cada vez mayor de ellas está asociado a la generación de mayores volúmenes de residuos a gestionar.

9.2. Impacto ambiental de las lámparas LFC.

Siendo el único metal líquido, el mercurio se conoce desde hace miles de años, y se utiliza en un gran número de productos y procesos que aprovechan sus singulares características. El mercurio es un excelente material para muchas aplicaciones porque es líquido a temperatura ambiente, es un buen conductor eléctrico, tiene densidad muy alta y alta tensión superficial, se expande/contrae uniformemente en toda su gama líquida respondiendo a cambios de presión y temperatura, y es tóxico para los microorganismos y otras plagas. Las propiedades y comportamiento del mercurio dependen del estado de oxidación. En muy pequeñas cantidades, el mercurio conduce la electricidad, responde a cambios en la temperatura y la presión, y forma aleaciones con casi todos los otros metales. El mercurio juega un importante papel como materia prima de procesos o como componente de productos de varios sectores industriales. En la industria eléctrica, es usado como componente de lámparas fluorescentes, sistemas de transmisión de electricidad e interruptores y pilas de óxido de mercurio. Una lámpara fluorescente típica (ya sea tubo o LFC) está constituida por un tubo de vidrio, previamente evacuado, que se llena con un gas inerte (habitualmente argón) y una cierta cantidad de mercurio líquido.

El ciclo del mercurio y su partición en el ambiente son fenómenos complejos que dependen de numerosos parámetros ambientales. La forma del mercurio en el aire afecta tanto a la velocidad como al mecanismo mediante los cuales se deposita en la tierra. Una vez en el sistema acuático, el mercurio puede existir disuelto o en forma de partículas y puede sufrir transformaciones químicas. Los sedimentos contaminados del fondo de las aguas de superficie pueden servir como un importante reservorio de mercurio, aportando al ciclo durante décadas. El mercurio tiene un largo tiempo de retención en suelos, como resultado, el mercurio acumulado en el suelo puede continuar migrando, por ejemplo a aguas, por largos períodos. Un factor muy importante de los efectos del mercurio en el ambiente es su capacidad para acumularse en organismos y ascender por la cadena alimenticia. La toxicidad del mercurio depende de su forma química y, por lo tanto de sus compuestos orgánicos o inorgánicos. El metilmercurio es un neurotóxico muy bien documentado, que puede provocar efectos perjudiciales particularmente en el cerebro en formación [33].

Los impactos ambientales de las lámparas fluorescentes compactas se producen a través de todo su ciclo de vida, en este sentido deben distinguirse las distintas fases: a) producción de materias primas, b) fabricación de lámparas, c) uso de lámparas y d) disposición al final de la vida útil.

-
- a) El impacto ambiental que reviste mayor interés al considerar las fuentes de provisión de materias primas para la fabricación de lámparas LFC y tubulares, es el asociado a las emisiones de mercurio al ambiente provenientes tanto de la producción primaria de mercurio, como de la producción secundaria (reciclaje).
- b) Cuando se discuten los aspectos ambientales de los materiales usados en la construcción de lámparas se debe considerar principalmente las sustancias que son percibidas como causantes de un significativo impacto ambiental, sin embargo esas sustancias están íntimamente ligadas a su óptimo rendimiento durante el ciclo de vida y a una máxima eficiencia energética. Por ejemplo, hay estudios que demuestran que una lámpara fluorescente sin mercurio consumiría aproximadamente 3 (tres) veces más energía que una conteniendo mercurio para producir la misma iluminación. A través de los años los esfuerzos han sido dirigidos a lograr un óptimo rendimiento y a minimizar el uso de sustancias que han sido identificadas como peligrosas, tales como el mercurio contenido en lámparas de descarga. Avances técnicos en los procesos productivos y en los materiales aplicados permitieron reducir la cantidad de mercurio utilizada sin comprometer la eficiencia lumínica o la vida útil de la lámpara en su totalidad.
- c) Durante su fase de uso las lámparas no representan ningún impacto ambiental negativo, sí más bien un potencial impacto ambiental positivo en términos de consumo de energía. En relación al uso de LFC en sustitución de lámparas incandescentes y halógenas, los impactos ambientales positivos resultan potenciales si se atienden dos aspectos fundamentales: la calidad de la lámpara y su forma de utilización. En cuanto a la calidad, distintas magnitudes deben considerarse: el flujo luminoso (lm) sirve como guía para el reemplazo de lámparas incandescentes por sus equivalentes compactas fluorescentes; la eficacia luminosa (lm/w) que permite la comparación del efectivo ahorro de energía producido a partir del uso de fluorescentes compactas en lugar de incandescentes; y la vida útil, es decir las horas de servicio que se espera entregue la lámpara antes de falla o agotamiento. La implementación de eficaces programas de promoción de uso eficiente de energía requieren de mecanismos de control y certificación de cada producto presente en el mercado, así como la adopción de una norma de etiquetado que contenga información completa y confiable sobre las magnitudes antedichas.
- d) Las lámparas fluorescentes compactas como parte de la corriente de residuos representan los impactos ambientales negativos asociados con los elementos y sustancias que los componen. En particular, a los efectos de este trabajo, interesan los impactos ambientales inherentes al mercurio, elemento indispensable para el

funcionamiento y las características de bajo consumo energético de este tipo de lámparas. La alta probabilidad de rotura de lámparas, en cualquier etapa de manipuleo y antes de llegar a su destino final, implica cierta emisión de mercurio a la atmósfera. [33]

De los datos encuestados [34-35], Figuras 9.2.1 y 9.2.2, surge que más del 75% de los hogares de la ciudad de Mar del Plata, tienen al menos algún conocimiento sobre el potencial peligro de contaminación que provoca el residuo de las lámparas fluorescentes (Tubos, LFC, etc), sin embargo, el 77,05% las descarta a la basura como residuo domiciliario. El 22,95 % no las descarta y de ese pequeño porcentaje el 14,75% intenta algún tipo de disposición adecuada como llevarla a comercios de venta de materiales eléctricos. Por lo tanto se observa que si bien existe conocimiento sobre el impacto ambiental que genera dicho residuo, no está presente en los hogares la información adecuada sobre dónde y cómo disponer las lámparas obsoletas.

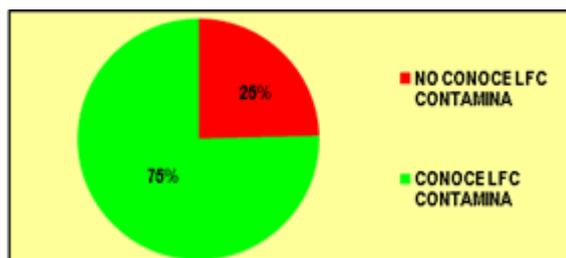


Figura 9.2.1. Conocimiento sobre contaminación de lámparas fluorescentes en Mar del Plata.

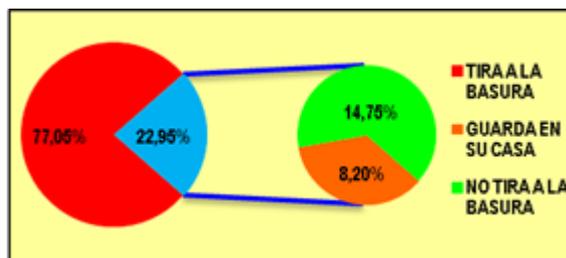


Figura 9.2.2. Gestión del residuo de lámparas fluorescentes en Mar del Plata.

En términos de complejidad en la gestión de residuos, por un lado la fragilidad de las lámparas las hace susceptibles de rotura en las distintas etapas de recolección, transporte, transferencia, procesamiento y disposición; por otro lado la dispersión en la generación resulta un desafío a la hora de diseñar sistemas de recolección diferenciada.

La alta probabilidad de roturas de lámparas, en cualquier etapa de manipuleo y antes de llegar a su destino final, implica cierta emisión de mercurio a la atmósfera. El 18% del mercurio contenido en lámparas fluorescentes es emitido en un período de 8 horas durante las etapas de trituración [36]. El estudio de Lindberg indica que a temperaturas entre 4 y 30 °C, aproximadamente entre el 17 y 40 % del mercurio contenido en

lámparas fluorescentes rotas será emitido durante un período de dos semanas, con mayores tasas de volatilización correspondientes a mayores temperaturas. Un tercio de esas emisiones ocurrirán durante las primeras 8 horas posteriores a la rotura.

Internacionalmente, los destinos de los residuos sólidos urbanos son la disposición en tierra, la combustión y el reciclaje. Si el tratamiento elegido para las lámparas fluorescentes es la disposición en tierra, debe hacerse en un relleno sanitario adecuado para este tipo de residuos. Hasta hace poco tiempo, en donde existen instalaciones para la incineración de residuos municipales no se hacían provisiones con respecto a las emisiones de mercurio. Hoy en día, se entiende que para una mejor gestión de lámparas fluorescentes es indispensable su desviación de cualquier práctica de combustión. El reciclaje de lámparas fluorescentes involucra la separación de vidrios, partes metálicas y polvo fluorescente (en el cuál se encuentra la mayor parte del mercurio contenido en una lámpara usada). Existen tecnologías para destruir las lámparas y separar los materiales de manera efectiva para ser reincorporados al mercado. Después de la extracción del mercurio, el vidrio recuperado se vende a fabricantes de fibra de vidrio, los metales se envían a fundición, y el polvo de fósforo y el mercurio (después de ser destilado) pueden reinsertarse nuevamente en el proceso de fabricación de lámparas. Aún sin contar con tecnología para el reciclaje, la trituración de las lámparas resulta una buena opción para reducir el volumen de residuos a manejar. Los equipos trituradores modernos cuentan con sistemas para el control de emisiones de mercurio. La trituración reduce los costos de transporte y almacenamiento, a la vez que minimiza las emisiones provenientes de roturas accidentales. El material triturado puede ser embalado en condiciones de seguridad hasta que las instalaciones para el reciclaje estén disponibles localmente, o bien para ser transportado hacia otros mercados consumidores. Debido a que, en el mercado, el valor de los productos recuperados es bajo, el reciclaje de LFC no resulta económicamente rentable, por lo cual los usuarios o el sector gubernamental deben pagar por el apropiado tratamiento de estos residuos.

En la ciudad de Mar del Plata ha comenzado en el año 2012 un programa de recolección diferenciada de residuos domiciliarios en dos bolsas conteniendo residuos húmedos y secos reciclables (plástico, papel, vidrios y latas). No existe ningún programa de recolección para residuos peligrosos o especiales de origen domiciliario. Lamentablemente la Ley de Presupuestos Mínimos de Gestión de Residuos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), que se encontraba con media sanción del Senado desde el 5 de mayo de 2011, perdió estado parlamentario en diciembre de 2012. El Proyecto de Ley de Basura Electrónica buscaba dar tratamiento a la fracción más tóxica y que más rápido está creciendo de la basura domiciliaria. Prohibía el uso de sustancias tóxicas

en la fabricación y obligaba a las Empresas a hacerse responsables legal y financieramente de la gestión, reutilización y reciclado de los residuos de sus aparatos.

Por el momento y hasta que se sancione una nueva Ley, alguna de estas disposiciones no podrá ser implementada pero sí cada Municipio podría realizar un Programa que haga hincapié en la educación y concientización de manera de reducir la generación, implementar una recolección diferenciada para este tipo de residuo y evitar su inadecuada disposición, considerando que las lámparas fluorescentes constituyen el 44% en el stock de lámparas en las viviendas.

Para determinar las emisiones de mercurio al ambiente se utilizaron las siguientes expresiones:

$$Cv \text{ años} = \frac{Vu \text{ h}}{Te \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot Da \frac{\text{días}}{\text{año}}} \quad (9.2.1)$$

Donde:

Cv =Ciclo de vida promedio de las lámparas [años]

Vu =Vida útil [h]

Te =Tiempo de encendido [h/día]

Da =Días del año [d/año]

Considerando que las lámparas LFC tienen una vida útil promedio de 10.000 [h] y teniendo en cuenta que el tiempo de encendido promedio de acuerdo a los datos de la encuesta, es de 3,8 [h/día], el ciclo de vida promedio de las lámparas es de 7,2 [años] Ec. (9.2.1).

$$\text{Emis. Hg. } \frac{\text{mg}}{\text{día}} = \frac{Lu \frac{\text{lámp.}}{\text{usuario}} \cdot U \text{ usuarios} \cdot \text{Hg lámp. } \frac{\text{mg}}{\text{lámp.}}}{Cv \text{ años} \cdot Da \frac{\text{días}}{\text{año}}} \quad (9.2.2)$$

Donde:

Emis. de Hg = Emisiones diarias de mercurio [mg /día]

Lu = Lámparas LFC por usuario [lámp./usuario]

U = Usuarios de la Ciudad [Usuarios]

Hg lámp.= Contenido de mercurio por lámpara [mg/lámp]

Teniendo en cuenta que en promedio hay 9 lámparas LFC por usuario (Capítulo 6), que contienen alrededor de 3 mg de mercurio y que son cambiadas cada 7,2 años en el mejor de los casos, en Mar del Plata con 295.757 usuarios residenciales, se generan por lo menos 3 kg de mercurio por día.

De la encuesta surge que el 77,07 % de los usuarios residenciales las descarta a la basura representando esto 2,3 kg de mercurio como mínimo, que es liberado al ambiente por día, es decir 840 kg al año.

Desde que se confirmó la relación entre las altas emisiones de carbono y el calentamiento del planeta hace unas décadas, los distintos gobiernos han ido tomando, sobre todo en los últimos años, medidas para intentar frenar el cambio climático. Las grandes políticas internacionales están dejando paso a las pequeñas acciones locales e individuales. Ya no se trata de esperar pasivamente a que las industrias reduzcan sus emisiones. El nuevo concepto de huella de carbono indica que los consumidores emiten tanto o más que los fabricantes al hacer uso de los productos manufacturados. La huella de carbono se refiere a la cantidad de emisiones que recae sobre un individuo al consumir un producto o servicio, incluyendo las emisiones indirectas vinculadas a su fabricación. Para citar un ejemplo al respecto, la estimación de las emisiones por consumo de electricidad, requiere aplicar un factor de emisión de la red eléctrica que en el caso de Argentina tiene un valor de 500 kg CO₂/MWh y en el de los Estados Unidos aproximadamente de 800 kg CO₂/MWh. La huella de carbono de un argentino con consumo promedio es de 5,71 ton CO₂ al año Fig. 9.2.3 y 9.2.4. Las diferencias en las huellas de carbono con estos países se pueden deber tanto al nivel de emisiones de los sectores productivos del país, así como, al estilo de vida de sus ciudadanos [37].



Figura 9.2.3. Huellas de CO₂.

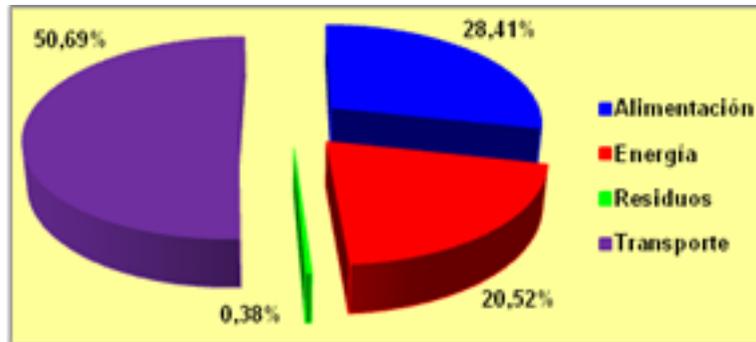


Figura 9.2.4. Huellas de CO₂ para Argentina.

Para determinar las emisiones de CO₂ debidas al consumo de energía eléctrica en iluminación se utilizó la expresión:

$$\text{Emisiones } \text{ton} \frac{\text{CO}_2}{\text{usuario}} = \frac{\text{CONel} \cdot \text{FEred}}{1000} \quad (9.2.3)$$

Donde:

CONel = Consumo anual de electricidad en iluminación [KWh]

FEred = Factor de emisión de la red = 0,5 [kg CO₂/KWh]

Con las lámparas utilizadas en la actualidad en una vivienda promedio (Capítulo 6) se generan 0,350 [Ton. de CO₂/año] por usuario o 0,117 [Ton. de CO₂/año] por habitante del uso de electricidad para iluminación, considerando que en la ciudad de Mar del Plata habitan 3 habitantes promedio por vivienda. Si se considera la situación futura de reemplazo por lámparas LED, la producción de CO₂ se reduciría a la tercera parte, siendo esta de 0,117 [Ton. de CO₂/año] por usuario o 0,039 [Ton. de CO₂/año] por habitante.

9.3. Consumo de energía durante el ciclo de vida de lámparas incandescentes, LFC y LED

Al abordar esta temática surgen tres cuestiones fundamentales:

- 1) ¿Cuánta energía se consume durante el ciclo de vida de una lámpara en las fases de producción, transporte y uso?
- 2) ¿Cuáles serán los resultados si se comparan entre sí las lámparas incandescentes convencionales y las de tecnología LFC y LED?
- 3) ¿Cómo podría cambiar en el futuro el consumo de energía durante el ciclo de vida de las lámparas LED?

Actualmente, en el mundo hay pocos estudios realizados al respecto. Uno de ellos es el informe “Review of the Life Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps” elaborado por el Programa de Iluminación de Estado Sólido del Departamento de Energía de los Estados Unidos [38].

Este informe analiza el consumo de energía asociado con tres fases del ciclo de vida: producción, transporte y uso. La mayor parte de la información recolectada para la evaluación energética está reunida en informes y publicaciones académicas así como en referencias de fabricantes e investigadores independientes. Como se observa en la Tabla 9.3.1, un total de diez publicaciones proveen los datos y niveles de desagregación necesarios para desarrollar un análisis comprensivo de la energía consumida en el ciclo de vida de cada tipo de lámpara. Los ciclos de vida analizados consideran una gran cantidad de lámparas que tienen diferentes especificaciones para cada tecnología.

Las lámparas incandescentes, LFC y LED representan diferentes tecnologías de iluminación, cada una con características de desempeño distintas. Las estimaciones de la producción de lámparas incandescentes y LFC derivaron de estudios cuya base de análisis es por lámpara. Se asumió que la energía involucrada en esta fase del ciclo de vida para estas tecnologías simples no podría variar en gran medida con el flujo luminoso, potencia o vida útil de cada lámpara. Así, para las lámparas incandescentes y LFC, la energía estimada en este informe representa la energía consumida en el ciclo de vida por productos con un flujo luminoso, potencia y vida útil equivalente a las características promedio de las lámparas analizadas en los estudios citados.

Determinar el desempeño de la lámpara LED del 2011 es más difícil puesto que la mayor parte de las lámparas evaluadas en los estudios previos son representativas de productos anteriores al año 2009. Esta cuestión es menos importante en el caso de las incandescentes y LFC, puesto que las mejoras en el desempeño están relativamente

detenidas, sin embargo la tecnología de iluminación LED ha mejorado significativamente año tras año. Además las lámparas LED consideradas en los estudios previos no son reemplazos adecuados de las tecnologías convencionales. El flujo medio de estos productos es de 400 [lm], mucho menor al promedio de 900 [lm] brindado por las lámparas incandescentes y LFC. Por lo tanto, se realizaron esfuerzos para desarrollar un perfil de consumo de energía que sea equivalente a una lámpara LED del 2011. Las especificaciones provistas en la Tabla 9.3.2 representan el desempeño medio de los productos actuales y fueron provistos por el Solid State Lighting Multi Year Program Plan (MYPP) del año 2011.

Tabla 9.3.1. Listado de estudios utilizados para la comparación del consumo de energía del ciclo de vida.

	Publication Title	Organization/ Author	Year	Lamp Types Evaluated		
				Incandescent	CFL	LED
1	Life-cycle Analyses of Integral Compact Fluorescent Lamps Versus Incandescent Lamps	Technical University of Denmark	1991	X	X	
2	Comparison Between Filament Lamps and Compact Fluorescent Lamps	Rolf P. Pfeifer	1996	X	X	
3	The Environmental Impact of Compact Fluorescent Lamps and Incandescent Lamps for Australian Conditions	University of Southern Queensland	2006	X	X	
4	Comparison of Life-Cycle Analyses of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps Based on Rated Life of Compact Fluorescent Lamp	Rocky Mountain Institute	2008	X	X	
5	Energy Consumption in the Production of High-Brightness Light-Emitting Diodes ¹	Carnegie Mellon University	2009			X
6	Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies	Ian Quirk	2009	X	X	X
7	Life-cycle Assessment of Illuminants - A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps	OSRAM, Siemens Corporate Technology	2009	X	X	X
8	Life-cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps	Navigant Consulting Europe, Ltd.	2009	X	X	X
9	Reducing Environmental Burdens of Solid-State Lighting through End-of-Life Design ²	Carnegie Mellon University	2010			X
10	Life-cycle Energy Consumption of Solid-State Lighting ³	Carnegie Mellon University, Booz Allen Hamilton	2010			X

1. The Carnegie Mellon (2009) study only provides energy estimates for an LED package.

2. The Carnegie Mellon (2010) study only provides data on the bulk lamp materials of an LED lamp.

3. Data from this publication was presented at the 2011 DOE SSL R&D Workshop.⁴

Tabla 9.3.2. Desempeño de las tecnologías de iluminación convencionales y LED..

Lamp Type	Watts	Lumens	Operating Lifetime (hrs)
Incandescent	60	900	1,000
CFL	15	900	8,500
LED (2011)	12.5	800	25,000
LED - future (2015)	5.8	800	40,000

Los productos LED de mejor clase como la lámpara Philips L-Prize, ganadora de varios premios por tener una eficacia que excede los 90 [lm/W], denominada por la prensa como la lámpara del futuro, no se consideraron en este informe para evaluar el desempeño de la lámpara LED del 2011. Sin embargo, para demostrar el potencial ahorro de energía que representa la tecnología LED, así como la importancia en las mejoras continuas de eficacia y vida útil, se estimó la energía del ciclo de vida para las lámparas LED del futuro. Las especificaciones de la lámpara LED del futuro (2015) fueron determinadas utilizando proyecciones de eficacia provistas por la MYPP 2011. De acuerdo a este programa, se espera que hacia el año 2015 aumente la eficacia del LED a 202 [lm/W]. Asumiendo esto, las proyecciones realizadas aseguran que la potencia se reducirá de 12,5 a 5,8 [W], a igual desempeño lumínico. De la misma forma, las predicciones aseguran que la vida útil se incrementará de 25.000 [h] a 40.000 [h].

Considerando el flujo luminoso y la vida útil de cada lámpara se distingue que las mismas no son perfectamente equivalentes entre sí. Para proveer la uniformidad necesaria que permita un buen análisis comparativo del ciclo de vida de cada tecnología, se adoptó una unidad funcional de “20 millones de lumen-horas”. Esta unidad funcional representa el servicio de iluminación provisto por una simple lámpara LED de 12,5 [W] que reemplaza a una incandescente de 60 [W] durante su vida útil. Como la vida útil de la tecnología incandescente y LFC es significativamente menor a la vida útil de la tecnología LED, una simple lámpara incandescente o LFC provee mucho menos servicio de iluminación que el valor funcional unitario, motivo por el cuál la energía estimada del ciclo de vida se multiplica por el número de lámparas necesarias para alcanzar esta equivalencia, como se observa en la Figura 9.3.1.

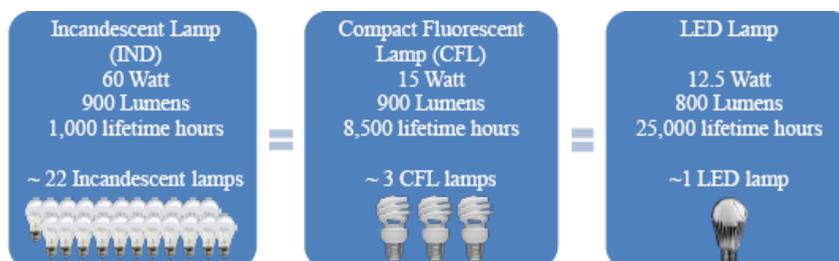


Figura 9.3.1. Numero de lámparas necesarias para suministrar 20 millones de lumen-horas.

Una Evaluación del Ciclo de Vida, más conocida por sus siglas en inglés, Life-Cycle Assessment (LCA), es una herramienta usada para evaluar el consumo de energía y materia prima, emisiones, y otros desechos relacionados al ciclo de vida entero de un producto o sistema. Esto caracteriza y cuantifica las entradas, salidas, e impactos ambientales de un producto específico o sistema en cada etapa del ciclo de vida. El procedimiento general para conducir un análisis LCA es definido por la Organización Internacional de Normalización - International Organization for Standards (ISO) serie 14000. Como se muestra en la Figura 9.3.3, las fases principales de un LCA de acuerdo a la normativa ISO son: Objetivo, Alcance y Definición de Límites; Análisis del Inventario del Ciclo de Vida; Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida; e Interpretación.

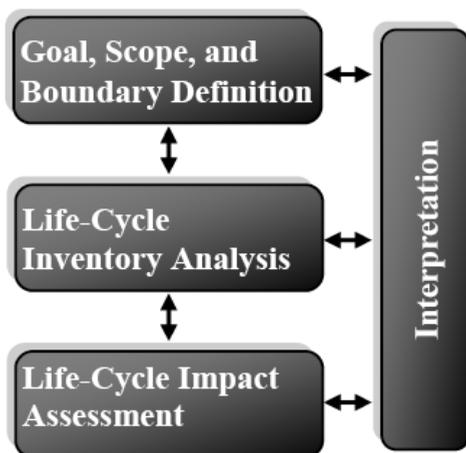


Figura 9.3.3. Diagrama de bloques basado en las Normas ISO serie 14000.

Típicamente, las unidades de proceso de un producto se simplifican y agrupan en cinco fases principales, como se describe en la Figura 9.3.4. Esto incluye la fase de adquisición de recursos primarios, procesamiento de materia prima, manufactura y ensamble, uso, y final de la vida útil. Es común incluir el transporte entre cada fase.

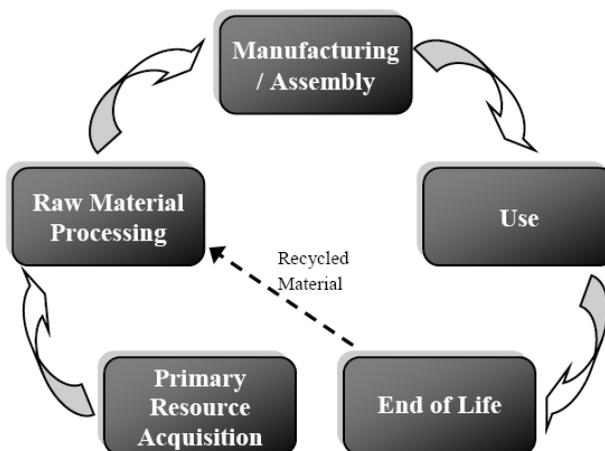


Figura 9.3.4. Fases del ciclo de vida general de un producto o sistema.

En la primera parte del informe utilizado como referencia, se concluye principalmente lo expuesto en la Figura 9.3.2, la cual indica que el consumo medio de energía durante el ciclo de vida de las lámparas LED y LFC es similar, aproximadamente 3.900 [MJ] en 20 millones de lumen-horas. Esto es alrededor de la cuarta parte del consumo de energía de la lámpara incandescente- 15.100 [MJ] por unidad funcional. Hacia el año 2015, si las lámparas LED reúnen las características esperadas en cuanto a rendimiento energético, se espera que la energía consumida en su ciclo de vida se reduzca aproximadamente a la mitad. Además, basado en estos análisis, la fase de uso de las lámparas incandescentes, LFC y LED es la de mayor energía, representando aproximadamente el 90% de la energía total de su ciclo de vida. Le siguen las fases de producción y transporte respectivamente, donde el transporte representa menos del uno por ciento de la energía total del ciclo de vida de todos los tipos de lámparas.

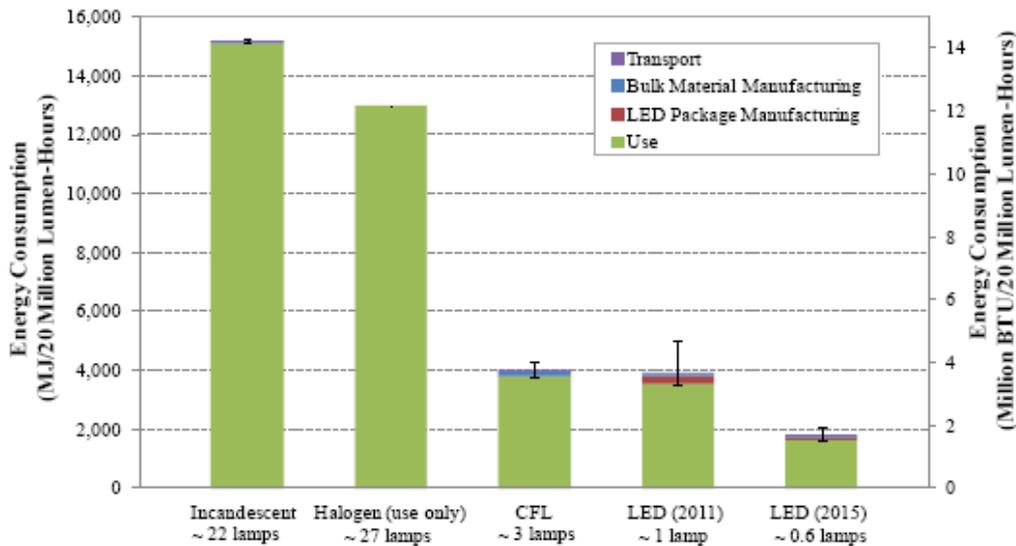


Figura 9.3.2. Energía del ciclo de vida de lámparas incandescentes, LFC y LED.

En la segunda parte del informe [39] se utilizan los parámetros de desempeño de la Tabla 9.3.3 para analizar la fase de producción de los cuatro tipos de lámparas analizadas.

La anteúltima fila de la tabla presenta el flujo lumínico emitido durante la vida útil de cada lámpara analizada. Este parámetro representa la luz emitida acumulada durante la vida entera en servicio de la lámpara y se mide en megalumen-horas de luz [Mlm-h]. La luz total emitida por la lámpara LED 2012, 20,3 [Mlm-h] representa la unidad funcional adoptada en la parte 1 del informe utilizado de referencia, y es utilizado en este análisis como un factor de normalización para ajustar los impactos por equivalencia. El escalar mostrado en la última fila de la tabla se calcula haciendo el

cociente entre la luz total emitida por la lámpara LED 2012 y la emitida por la lámpara bajo análisis, y representa cuantas lámparas de este tipo equivalen a la LED 2012, de manera tal que brinden la misma cantidad de luz total acumulada.

Tabla 9.3.3. Parámetros de desempeño de las lámparas consideradas en el análisis.

Characteristics	Incandescent	CFL	LED lamp – 2012	LED lamp – 2017
Power Consumption	60 watts	15 watts	12.5 watts	6.1 watts
Lumen Output	900 lumens	825 lumens	812 lumens	824 lumens
Efficacy	15 lm/W	55 lm/W	65 lm/W	134 lm/W
Lamp Lifetime	1500 hours	8000 hours	25,000 hours	40,000 hours
Total Lifetime Light Output	1.35 Mlm-hr	6.6 Mlm-hr	20.3 Mlm-hr*	33.0 Mlm-hr
Impacts Scalar	15.04	3.08	1.00	0.61

* In Part 1 of DOE's study (*Review of the Lifecycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent and LED Lamps*), 20 megalumen-hours was selected as the functional unit for comparison of the energy use. In this study (Part 2), we use the same functional unit as a normalizing scalar to ensure the impacts are comparable.

9.3.1. Análisis de inventario del ciclo de vida

Para cuantificar los impactos ambientales de las lámparas incandescentes, LFC y LED, los autores utilizaron la base de datos de evaluación del ciclo de vida Ecoinvent [40]. Esta base de datos contiene información sobre impacto ambiental sobre alrededor de 4000 procesos de producción o relacionados, tales como los impactos asociados con la producción de 1 kilogramo de fundición de aluminio desde el mineral de bauxita o el transporte de una tonelada de material a lo largo de un kilómetro. Para cada material y proceso de esta base de datos hay estimaciones del impacto ambiental por alrededor de 250 indicadores ambientales normalizados. Por ejemplo, la base de datos estima que el impacto potencial del calentamiento global asociado con un kilogramo de fundición de aluminio es equivalente a 3,0614 kilogramos de dióxido de carbono.

A continuación se presentan tablas que proveen detalles sobre los inventarios de procesos y materiales asociados con la producción de las lámparas bajo estudio. Estos procesos y materiales fueron seleccionados de la base de datos Ecoinvent y utilizados para modelar los materiales y procesos reales. Algunos de ellos tienen grandes similitudes a los utilizados en las lámparas, mientras que otros son aproximaciones. La significancia relativa de estas aproximaciones queda clara cuando se resumen los resultados al final de este capítulo.

9.3.2. Producción de lámparas LED, incandescentes y LFC

La producción del LED es un proceso muy complejo y altamente técnico que realizan muy pocas compañías en el mundo. En un esfuerzo por simplificar el proceso para producir un LED encapsulado y alinearlos mejor con las áreas de especialización que existen en la industria, se desglosó la cadena de valor para la producción del LED en tres grandes segmentos: 1) producción del sustrato, 2) fabricación de la matriz de LED, 3) ensamble del LED empaquetado. El diagrama de flujo de la Figura 9.3.2.1 menciona estas etapas y los principales pasos contenidos en cada etapa. Se debe notar que las emisiones directas del proceso de producción no están incluidas en este análisis debido a la falta de información disponible.

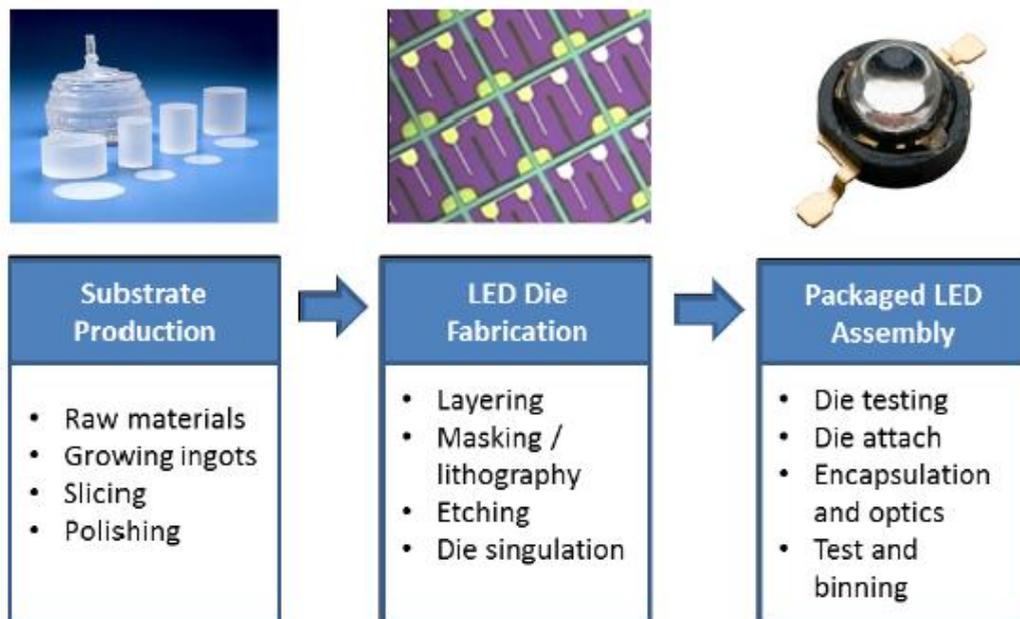


Figura 9.3.2.1. Tres grandes etapas de la producción de LED encapsulados.

La etapa de producción del sustrato se centra en la preparación de obleas de zafiro pulido, limpiado para su uso en un reactor para la fabricación de la matriz de LED. La fabricación de obleas comienza con el crecimiento de los granos de cristal de zafiro. Para producir esto, se funde una gran cantidad de óxido de aluminio y se introduce un cristal de siembra a la solución fundida. El crecimiento se produce de manera uniforme en todas las direcciones, la sección transversal del cristal resultante es circular. El diámetro del cristal depende de la masa fundida, la temperatura, la velocidad de rotación y la velocidad en la que la semilla se extrae de la masa fundida. Una vez obtenida la masa con el diámetro deseado se corta en obleas, se pulen y se limpian para la posterior fabricación del LED.

Sin profundizar en el proceso de producción de las lámparas que está muy bien detallado en el informe citado, se muestran a continuación los inventarios de la evaluación del ciclo de vida para los diferentes tipos de lámparas, donde se describen los materiales utilizados en las diferentes etapas del ciclo y la descripción de la base de datos Ecoinvent.

9.3.2.1. Análisis de la lámpara LED

Para el propósito de este estudio se seleccionó la lámpara Philips EnduraLED, Figura 9.3.2.1.1, que se introdujo en el mercado en el año 2011.



Figura 9.3.2.1.1. Lámpara Philips EnduraLED de 12,5 [W], reemplazo de una lámpara incandescente de 60 [W].

La Tabla 9.3.2.1.1 presenta los materiales utilizados en la fabricación y la energía involucrada en las etapas de fabricación y ensamble. El peso final de la lámpara es de 178 [g] y su envoltorio pesa 37 [g], resultando en un peso total dentro de la caja de 215 [g]. En la tabla se estima el transporte desde la fábrica situada en China al continente americano por mar y distribución por tierra de 1000 [km] dentro del continente. La tabla presenta la energía consumida por la lámpara en su vida útil, específicamente 12,5 [W] durante 25.000 [h], es decir, 312,5 [kWh]. Por último, al final de su vida útil, la tabla presenta algunas estimaciones de la proporción de lámparas y envoltorios que se reciclan y la proporción que se dispone en relleno sanitario.

Como se mencionó al principio, además de considerar los impactos de la evaluación del ciclo de vida de las lámparas incandescentes, LFC y LED de 2012, los autores también examinaron los impactos de las lámparas LED cuyo desempeño fue proyectado al año 2017. Para determinar el desempeño de la lámpara LED del 2017,

Tabla 9.3.2.1.1. Inventario de la evaluación del ciclo de vida para la lámpara LED de 12,5 [W] en 2012.

Stage	Material Used	Amount	Eco-ID	Ecoinvent Description
Material	LEDs (blue light)	12 units		LED impacts taken from the above section
Material	Remote phosphor	1.0g	6954	rare earth concentrate, 70% rare earth oxide (REO), from bastnasite, at beneficiation
Material	Plastic phosphor host	11.1g	6954	rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite, at beneficiation
Material	Aluminum heat sink	68.2g	1057	aluminum, production mix, cast alloy, at plant
Material	Copper	5.0g	1084	copper, primary, at refinery
Material	Nickel	0.003g	1121	nickel, 99.5%, at plant
Material	Brass	1.65g	1066	brass, at plant
Material	Cast iron	4.0g	1069	cast iron, at plant
Material	Chromium	0.0002g	1072	chromium steel 18/8, at plant
Material	Inductor	5 pcs.	1074	copper, at regional storage
Material	IC chip	2.0g	7016	integrated circuit, IC, logic type, at plant
Material	Capacitor SMD	8 pcs.	7010	capacitor, SMD type, surface-mounting, at plant
Material	Electrolytic Capacitor	6 pcs.	7011	capacitor, electrolyte type, < 2cm height, at plant
Material	Diode	6 pcs.	7075	diode, glass-, SMD type, surface mounting, at plant
Material	Printed Wiring Board	15.0g	10995	printed wiring board, surface mount, lead-free surface, at plant
Material	Resistor SMD	35 pcs.	7068	resistor, SMD type, surface mounting, at plant
Material	Resistor	3 pcs.	7109	resistor, wirewound, through-hole mounting, at plant
Material	Transistor	6 pcs.	7113	transistor, wired, big size, through-hole mounting, at plant
Material	Resin Glue	4.5g	1802	epoxy resin, liquid, at plant
Material	Solder paste	0.3g	10800	flux, wave soldering, at plant
Production	Power	5.0 MJ	6693	electricity mix for China
Production	Manufacturing	178g	10169	assembly, LCD screen
Material	Packaging	37g	1698	packaging, corrugated board, mixed fiber, single wall, at plant
Transport	Sea - 215g	10000 km	1968	transport, transoceanic freight ship
Transport	Road - 215g	1000 km	1943	transport, truck >16t, fleet average
Use	Energy in use	312.5 kWh	6694	electricity mix for the U.S.
End of Life	Lamp, Recycling	20%	10977	disposal, treatment of CRT glass
End of Life	Lamp, Landfill	80%	2071	disposal, glass, 0% water, to inert material landfill
End of Life	Package, Recycling	30%	1693	corrugated board, recycling fiber, single wall, at plant
End of Life	Package, Landfill	70%	2077	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to inert material landfill

se modificó el análisis de la lámpara LED del 2012, teniendo en cuenta los siguientes detalles:

- Se mejora la eficacia desde 65 [lm/W] a 134 [lm/W].
- Se reduce la potencia de la lámpara de 12,5 [W] a 6,1 [W] manteniendo el flujo luminoso equivalente al de una lámpara incandescente de 60 [W].
- Se incrementa la vida útil de la lámpara desde 25.000 a 40.000 [h], considerando que las mejoras en los LED`s y drivers electrónicos reducirá la generación de calor.
- Se reduce la cantidad de LED encapsulados por lámpara de 18 a 12 teniendo en cuenta el aumento en el rendimiento de los mismos.
- Debido a que se reduce el consumo de potencia y la generación de calor, se utilizan disipadores más pequeños.
- De acuerdo a las mejoras esperadas en el proceso de producción se reducen los productos químicos utilizados en un 20%.
- Para la construcción de los drivers se espera que se utilicen 50% más de circuitos integrados y 33% menos de componentes discretos como resistencias, capacitores, diodos, etc.
- El modelo proyectado a futuro también considera que mejorará la gestión de los residuos generados por este tipo de tecnología y aumentará significativamente el reciclado de las lámparas LED, incrementándose la proporción de lámparas recicladas de un 20% en 2012 a un 30% en 2017 y la proporción de envases reciclados de un 30% en 2012 a un 50% en 2017.

Para brindar más detalles sobre estos cambios en la tecnología LED y en el diseño de las lámparas LED`s, se realiza una comparación entre el año 2012 y 2017 en la Tabla 9.3.2.1.2.

Tabla 9.3.2.1.2. Cambios en la evaluación del ciclo de vida de la lámpara LED del 2017.

Material for Manufacturing	Quantity in 2012	Quantity in 2017	Units	Percentage Reduction / Increase
Acetone	0.59	0.472	l/wafer	20%
AuSn solder	14.8	11.817	mm ³ /wafer	20%
Developer	115	92	ml/wafer	20%
Etchant Ag	30	24	ml/wafer	20%
Etchant Metal	60	48	ml/wafer	20%
GaN Etchant	0.192	0.154	l/wafer	20%
H ₂ gas	1.62	1.296	m ³ /wafer	20%
N ₂ gas	4.42	3.536	m ³ /wafer	20%
NH ₃ gas	0.447	0.358	kg/wafer	20%
O ₂ gas	2	1.6	l/wafer	20%
Photoresist	19	15.2	ml/wafer	20%
Power	42.57	34.06	kWh/wafer	20%
SF ₆	0.1	0.08	l/wafer	20%
SiH ₄	0.242	0.194	g/wafer	20%
Slurry	2.3	1.84	l/wafer	20%
Target Ag	0.44	0.352	mm ³ /wafer	20%
Target Al	1.27	1.016	mm ³ /wafer	20%
Target Ni	0.417	0.334	mm ³ /wafer	20%
Target Ti	0.467	0.374	mm ³ /wafer	20%
Target W	3.089	2.471	mm ³ /wafer	20%
TMAI	0.003	0.002	g/wafer	33%
TMGa	1.47	1.176	g/wafer	20%
TMIn	0.01	0.008	g/wafer	20%
UPW	240	192	l/wafer	20%
LEDs (blue light)	18	12	packaged LEDs	33%
Aluminum heat sink	0.0682	0.032736	kg	49%
IC chip	0.002	0.003	kg	-50% (increase)
Electrolytic Capacitor	6	4	pieces	33%
Diode	6	4	pieces	33%
Resistor SMD	35	23	pieces	34%
Resistor	3	2	pieces	33%
Transistor	6	4	pieces	33%
Lamp Weight	0.178	0.143	kg	20%
Total Lamp+Pack Weight	0.215	0.18	kg	16%
Manufacturing	0.178	0.143	kg	20%
Energy in Use	312	240	kWh	23%
End of Life - lamp	20%	30%	Recycling	-50% (increase)
End of Life - lamp	80%	70%	Landfill	13%
End of Life - packaging	30%	50%	Recycling	-67% (increase)
End of Life - packaging	70%	50%	Landfill	29%

9.3.2.2. Análisis de la lámpara incandescente

En la Tabla 9.3.2.2.1 se presentan los materiales utilizados en la producción de lámparas incandescentes y la energía involucrada en las distintas etapas de fabricación.

Tabla 9.3.2.2.1. Inventario de la evaluación del ciclo de vida para la lámpara incandescente de 60 [W].

Stage	Material Used	Amount	Eco-ID	Ecoinvent Description
Material	Argon gas	0.137g	252	argon, liquid, at plant
Material	Nitrogen gas	0.845g	300	nitrogen, liquid, at plant
Material	Oxygen gas	7.290g	301	oxygen, liquid, at plant
Material	Hydrogen gas	0.001g	286	hydrogen, liquid, at plant
Material	Ammonia	0.085g	246	ammonia, liquid, at regional storehouse
Material	Aluminum	1.150g	1056	aluminum, production mix, at plant
Material	Brass	0.050g	1066	brass, at plant
Material	Resin Glue	1.550g	1802	epoxy resin, liquid, at plant
Material	Solder paste	0.150g	10800	flux, wave soldering, at plant
Material	Glass Bulb	22.54g	810	glass tube, borosilicate, at plant
Material	Getter	0.002g	311	phosphoric acid, industrial grade, 85% in H ₂ O
Material	Glass Flare	2.097g	810	glass tube, borosilicate, at plant
Material	Exhaust Tube	2.165g	810	glass tube, borosilicate, at plant
Material	Lead wire	0.100g	1178	wire drawing, copper
Material	Molybdenum support wire	0.013g	1116	molybdenum, at regional storage
Material	Filament - Tungsten	0.010g	1142	rhodium, at regional storage
Production	Power	0.372g	6693	electricity mix for China
Production	Manufacturing	38.2g	10169	assembly, LCD screen
Material	Packaging	40.0g	1698	packaging, corrugated board, mixed fiber, single wall, at plant
Transport	Sea – 78.2g	10,000 km	1968	transport, transoceanic freight ship
Transport	Road – 78.2g	1000 km	1943	transport, truck >16t, fleet average
Use	Energy in use	90.0 kWh	6694	electricity mix for the U.S.
End of Life	Lamp, Recycling	10%	10977	disposal, treatment of CRT glass
End of Life	Lamp, Landfill	90%	2071	disposal, glass, 0% water, to inert material landfill
End of Life	Package, Recycling	30%	1693	corrugated board, recycling fiber, single wall, at plant
End of Life	Package, Landfill	70%	2077	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to inert material landfill



Figura 9.3.2.2.1. Lámpara incandescente de 60 [W].

La lámpara pesa 38,2 [g] y su envase 40 [g] representando en conjunto un peso de 78,2 [g]. En la tabla se estima el transporte desde la fábrica situada en China al continente americano por mar y distribución por tierra de 1000 [km] dentro del continente. La tabla presenta la energía consumida por la lámpara en su vida útil, específicamente 60 [W] durante 1500 [h], es decir, 90 [kWh]. Por último, al final de su vida útil, la tabla presenta algunas estimaciones de la proporción de lámparas y envoltorios que se reciclan y la proporción que se dispone en relleno sanitario.

9.3.2.3. Análisis de la lámpara LFC

Además de comparar la lámpara LED con la incandescente, es importante también comparar la lámpara LED con la fuente de luz energéticamente más eficiente utilizada actualmente, es decir la lámpara fluorescente compacta. La misma es una versión miniaturizada del tubo fluorescente lineal utilizado comúnmente en industrias y comercios, cuyo balasto electrónico se encuentra en la base de la lámpara.

El inventario de materiales y procesos utilizados en la fabricación de la lámpara -tubo y balasto- se presenta en la tabla 9.3.2.3.1.

La lámpara pesa 153 [g] y su envase 81 [g], resultando en un peso total dentro de la caja de 234 [g].

En la tabla se estima el transporte desde la fábrica situada en China al continente americano por mar y distribución por tierra de 1000 [km] dentro del continente. La tabla presenta la energía consumida por la lámpara en su vida útil, específicamente 15 [W]

durante 8000 [h], es decir, 120 [kWh]. Por último, al final de su vida útil, la tabla presenta algunas estimaciones de la proporción de lámparas y envoltorios que se reciclan y la proporción que se dispone en relleno sanitario.



Figura 9.3.2.2.1. Lámpara incandescente de 60 [W].

Tabla 9.3.2.3.1. Inventario de la evaluación del ciclo de vida para la lámpara LFC de 15 [W].

Stage	Material Used	Amount	Eco-ID	Ecoinvent Description
Material	Argon gas	0.004g	252	argon, liquid, at plant
Material	Nitrogen gas	0.119g	300	nitrogen, liquid, at plant
Material	Oxygen gas	0.159g	301	oxygen, liquid, at plant
Material	Hydrogen gas	0.002g	286	hydrogen, liquid, at plant
Material	Neon gas	0.0004g	294	krypton, gaseous, at plant
Material	Noble Earths	0.001g	6954	rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite, at beneficiation
Material	Yttrium Oxide	1.37g	6954	rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite, at beneficiation
Material	Ammonia	0.13g	246	ammonia, liquid, at regional storehouse
Material	Nitric acid	7.9g	299	nitric acid, 50% in H2O, at plant
Material	Sulfuric acid	1.67g	350	sulfuric acid, liquid, at plant
Material	Aluminum Oxide	0.008g	244	aluminum oxide, at plant
Material	Lead	0.19g	1103	lead, at regional storage

Tabla 9.3.2.3.1. Inventario de la evaluación del ciclo de vida para la lámpara LFC de 15 [W] – continuación.

Stage	Material Used	Amount	Eco-ID	Ecoinvent Description
Material	Copper	0.402g	1084	copper, primary, at refinery
Material	Nickel	0.003g	1121	nickel, 99.5%, at plant
Material	Brass	1.65g	1066	brass, at plant
Material	Cast iron	0.029g	1069	cast iron, at plant
Material	Chromium	0.0002g	1072	chromium steel 18/8, at plant
Material	Mercury	0.004g	1111	mercury, liquid, at plant
Material	Capacitor	40 pcs.	7010	capacitor, SMD type, surface-mounting, at plant
Material	Coil miniature	3 pcs.	10155	inductor, miniature RF chip type, MRFI, at plant
Material	Diode SMD	40 pcs.	7075	diode, glass-, SMD type, surface mounting, at plant
Material	PWB	3.7g	10995	printed wiring board, surface mount, lead-free surface, at plant
Material	Resistor SMD	40 pcs.	7068	resistor, SMD type, surface mounting, at plant
Material	Thermistor, NTC	0.19g	7068	resistor, SMD type, surface mounting, at plant
Material	Transistor power large	3.70g	7113	transistor, wired, big size, through-hole mounting, at plant
Material	Resin Glue	4.5g	1802	epoxy resin, liquid, at plant
Material	Solder paste	0.3g	10800	flux, wave soldering, at plant
Material	Glass Tube	1.20g	810	glass tube, borosilicate, at plant
Material	Housing top & bottom (PBTP)	2.39g	1827	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant
Production	Natural Gas	10.7kg	8338	metal working factory operation, heat energy from natural gas
Production	Power	3.13MJ	6693	electricity mix for China
Production	Manufacturing	153g	10169	assembly, LCD screen
Material	Packaging	81g	1698	packaging, corrugated board, mixed fiber, single wall, at plant
Transport	Sea - 234g	10000km	1968	transport, transoceanic freight ship
Transport	Road - 234g	1000km	1943	transport, truck >16t, fleet average
Use	Energy in use	120 kWh	6694	electricity mix for the U.S.
End of Life	Lamp, Recycling	20%	10977	disposal, treatment of CRT glass
End of Life	Lamp, Landfill	80%	2071	disposal, glass, 0% water, to inert material landfill
End of Life	Package, Recycling	30%	1693	corrugated board, recycling fiber, single wall, at plant
End of Life	Package, Landfill	70%	2077	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to inert material landfill

9.3.3. Indicadores de evaluación del impacto del ciclo de vida

Esta sección del informe discute los indicadores que fueron seleccionados de la base de datos Ecoinvent para realizar este estudio. Los inventarios presentados en la sección anterior se combinan con los datos de impacto la base de datos para determinar los niveles de impacto ambiental. Para este estudio, el Departamento de Energía de los Estados Unidos quiso cuantificar los impactos asociados con el aire, agua, suelo y diferentes recursos. Se eligieron quince indicadores para este estudio, como se muestra en la Tabla 9.3.4.1. A continuación de la tabla, se realiza una breve descripción de cada uno de estos indicadores.

Tabla 9.3.4.1. Indicadores ambientales seleccionados para este análisis del ciclo de vida.

	Abbr.	Name	Indicator	Ecoinvent Indicator	Units
Air / Climate	GWP	Global Warming Potential	greenhouse gas emissions	global warming potential (GWP100a) [CML2001]	kg CO ₂ -eq
	AP	Acidification Potential	air pollution	acidification potential [CML2001]	kg SO ₂ -eq
	POCP	Photochemical Ozone Creation Potential	air pollution	photochemical oxidation [CML2001]	kg O ₃ formed
	ODP	Ozone Depleting Potential	air pollution	stratospheric ozone depletion (ODP10a)	kg CFC11-eq
	HTP	Human Toxicity Potential	toxicity	human toxicity (HTP100a) [CML2001]	kg 1,4-DCB-eq
Water	FAETP	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential	water pollution	freshwater aquatic ecotoxicity (FAETP100a)	kg 1,4-DCB-eq
	MAETP	Marine Aquatic Ecotoxicity Potential	water pollution	marine aquatic ecotoxicity (MAETP100a) [CML2001]	kg 1,4-DCB-eq
	EP	Eutrophication Potential	water pollution	eutrophication potential [CML2001]	kg PO ₄ -eq
Soil	LU	Land Use	land use	land use [CML2001]	m ² a
	EDP	Ecosystem Damage Potential	biodiversity impacts	ecosystem damage potential [EDP]	points
	TAETP	Terrestrial Ecotoxicity Potential	soil degrad. & contamination	terrestrial ecotoxicity (TAETP100a) [CML2001]	kg 1,4-DCB-eq
Resources	ARD	Abiotic Resource Depletion	resource depletion	depletion of abiotic resources [CML2001]	kg Sb-eq
	NHWL	Non-Hazardous Waste Landfilled	non-hazardous waste	landfilling of bulk waste [EDIP2003]	kg waste
	RWL	Radioactive Waste Landfilled	hazardous waste	landfilling of hazardous waste [EDIP2003]	kg waste
	HWL	Hazardous Waste Landfilled	hazardous waste	landfilling of radioactive waste [EDIP2003]	kg waste

En la tabla de arriba, la columna del extremo derecho identifica las unidades en que se mide cada uno de los indicadores ambientales. La abreviación “eq” representa las

equivalencias que se usan a menudo cuando más de un contaminante puede causar un impacto particular. Por ejemplo, el calentamiento global se atribuye a un número de gases entre los que están incluidos el dióxido de carbono- CO_2 y el metano- CH_4 ; sin embargo, las emisiones se reportan para este indicador simplemente en unidades de “kg de CO_2 equivalentes”. Sobre esta base, se dice que el CO_2 representa un potencial de calentamiento global (GWP) igual a uno, porque 1 [kg de CO_2] tiene el potencial de calentamiento de sí mismo, pero el metano tiene un GWP igual a 25, puesto que 1 [kg de CH_4] tiene el potencial de calentamiento de 25 [kg de CO_2]. Al usar valores equivalentes, se simplifican los resultados de la evaluación del ciclo de vida y se facilita la comparación entre diferentes estudios. Del mismo modo se reportan otros indicadores, como el de toxicidad, que fue evaluado en forma relativa a la toxicidad del DiCloroBenceno-1,4 (1,4-DCB), una sustancia cancerígena conocida.

Breve descripción de cada uno de los 15 indicadores ambientales evaluados en el ciclo de vida de las lámparas incandescentes, LFC y LED:

- **Global Warming Potential – GWP** (Potencial de Calentamiento Global)

Unidad de medida: [kilogramos de dióxido de carbono – CO_2 equivalentes]

Descripción: Este indicador es una medida de las actividades asociadas con el ciclo de vida del producto que alteran la composición química de la atmósfera a través de la acumulación de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, metano y óxido de nitrógeno. Al aumentar la concentración en la atmósfera de estos gases que retienen el calor, la capacidad de retención de calor de la atmósfera terrestre también aumenta, activando el cambio climático global y los impactos ambientales asociados.

- **Acidification Potential – AP** (Potencial de acidificación)

Unidad de medida: [kilogramos de dióxido de azufre – SO_2 equivalentes]

Descripción: Este indicador es una medida de la contaminación del aire (principalmente amonio, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno) causada por el ciclo de vida del producto que contribuye a la deposición de sustancias ácidas. La lluvia ácida resultante es más conocida por el daño que causa a los bosques y lagos. Sin embargo, también genera impactos menos conocidos a peces, ecosistemas costeros, suelos, y monumentos históricos. La deposición ácida puede también incrementar la movilidad ambiental de metales, resultando en la contaminación de recursos de agua y absorción de metales, como el mercurio, en la biota.

- **Photochemical Ozone Creation Potential – POCP** (Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico)

Unidad de medida: [kilogramos de ozono – O₃ formado]

Descripción: Este indicador es una medida del smog fotoquímico generado durante el ciclo de vida del producto. La principal fuente de contaminación es la combustión de combustibles fósiles en el transporte, en la generación de electricidad y en la industria. Dos de los mayores contaminantes primarios emitidos en estas actividades son los compuestos orgánicos volátiles – VOC's y los óxidos de nitrógeno. Interactuando con la luz del sol, estos contaminantes primarios se convierten en varios químicos peligrosos conocidos como contaminantes secundarios, tales como nitratos de peroxiacetilo – PAN y ozono troposférico a nivel del suelo. Estos contaminantes secundarios causan el denominado comúnmente “smog urbano”.

- **Ozone Depleting Potential – ODP** (Potencial de Agotamiento de Ozono)

Unidad de medida: [kilogramos de CloroFluorCarbono – CFC-11 equivalentes]

Descripción: Esta medida cuantifica el potencial de agotamiento de ozono del producto durante su ciclo de vida. Aunque el ozono a nivel del suelo (troposférico) es un contaminante, el ozono estratosférico es benéfico, ya que protege a la Tierra de cantidades excesivas de luz ultravioleta. La capa de ozono estratosférico es atacada por catalizadores de radicales libres, algunos de los cuáles son producidos por muchos químicos producidos por el hombre, tales como los clorofluorcarbonos (CFC's) los cuáles fueron usados como agentes de soplado en aerosoles, y fluidos refrigerantes en heladeras. Este indicador representa a todos los químicos que agotan el ozono con el nivel equivalente de emisiones de estos químicos peligrosos.

- **Human Toxicity Potential – HTP** (Potencial de Toxicidad en Humanos)

Unidad de medida: [kilogramos de DiCloroBenceno-1,4 – DCB equivalentes]

Descripción: Este indicador intenta cuantificar las emisiones en el aire, agua y suelo asociadas con el ciclo de vida del producto, que pueden ser perjudiciales para la salud del ser humano. Los factores toxicológicos son calculados utilizando estimaciones científicas de la ingesta diaria admisible o tolerable de las sustancias tóxicas, pero están aún en una primera etapa de desarrollo, motivo por el cual solo pueden tomarse como una indicación y no como una medida absoluta del potencial de toxicidad. La unidad de medida es el peso equivalente de DiCloroBenceno-1,4, un cancerígeno conocido.

- **Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential – FAETP** (Potencial de Ecotoxicidad de Vegetación Acuática de Agua Dulce)

Unidad de medida: [kilogramos de DiCloroBenceno-1,4 – DCB equivalentes]

Descripción: Este indicador es muy similar al Potencial de Toxicidad en Humanos, pero combina factores asociados con las concentraciones máximas tolerables por organismos de agua dulce de diferentes sustancias químicas presentes en el agua.

- **Marine Aquatic Ecotoxicity Potential – MAETP** (Potencial de Ecotoxicidad de Vegetación Acuática Marina)

Unidad de medida: [kilogramos de DiCloroBenceno-1,4 – DCB equivalentes]

Este indicador es análogo al FAETP, pero combina factores asociados con las concentraciones máximas tolerables por organismos acuáticos marinos de diferentes sustancias químicas presentes en el agua.

- **Eutrophication Potential – EP** (Potencial de Eutrofización)

Unidad de medida: [kilogramos de fosfato – PO₄ equivalentes]

Descripción: Los nitratos y fosfatos son esenciales para la vida, pero grandes concentraciones en el agua pueden estimular el crecimiento excesivo de algas, reduciendo el oxígeno en el agua y dañando los ecosistemas, un fenómeno conocido como eutrofización.

- **Land Use – LU** (Uso de la Tierra)

Unidad de medida: [metros cuadrados año – m²a], producto del área por los años de uso.

Descripción: el uso de la tierra es una actividad económica que genera grandes beneficios para la sociedad humana, pero también tiene impactos negativos sobre el ambiente. La ocupación de suelo para una instalación industrial imposibilita que ese sitio vuelva a ser un ambiente natural, incluyendo la disponibilidad para la vida silvestre. Este indicador representa el impacto que involucra el área ocupada y el número de años en que esto ocurre.

- **Ecosystem Damage Potential – EDP** (Potencial de Daño al Ecosistema)

Unidad de medida: [puntos]

Descripción: la biodiversidad ha sido influenciada negativamente por la agricultura intensiva, la forestación y el incremento de áreas urbanas e infraestructura. Este indicador intenta medir este impacto. Combina el uso de la tierra y la transformación de la tierra para fines industriales, y asigna factores de caracterización para contabilizar el impacto relativo del uso de la tierra.

- **Terrestrial Ecotoxicity Potential – TAETP** (Potencial de Ecotoxicidad Terrestre)

Unidad de medida: [kilogramos de DiCloroBenceno-1,4 – DCB equivalentes]

Descripción: este indicador es muy similar a los potenciales de toxicidad previos, pero hace referencia a las concentraciones máximas tolerables por organismos terrestres de diferentes sustancias químicas.

- **Abiotic Resource Depletion – ARD** (Agotamiento de Recursos Abióticos)

Unidad de medida: [kilogramos equivalentes del elemento escaso antimonio – Sb]

Descripción: es ampliamente conocido que los niveles actuales de consumo global de recursos son insostenibles. Los recursos abióticos son natural y esencialmente limitados, recursos como el mineral de hierro, el petróleo crudo y el gas natural; en oposición a los renovables, recursos bióticos como la biomasa. Los impactos en el agotamiento de recursos abióticos se informan con el inventario global restante de antimonio – Sb, un elemento relativamente escaso en la Tierra.

- **Non-Hazardous Waste Landfilled – NHWL, Radioactive Waste Landfilled – RWL, and Hazardous Waste Landfilled – HWL** (Residuos No Peligrosos Vertidos, Residuos Radioactivos Vertidos y Residuos Peligrosos Vertidos)

Unidad de medida: [kilogramos de cada uno de estos tres residuos vertidos]

Descripción: para los productos que se consideran en esta evaluación del ciclo de vida, estos indicadores buscan cuantificar los materiales que se envían a vertederos, clasificados en tres categorías – residuos no peligrosos, residuo radioactivo y residuo peligroso.

9.3.4. Resultados de la Evaluación del Ciclo de Vida

Una vez identificados los materiales y procesos que son utilizados por cada tipo de lámpara y seleccionado los quince indicadores ambientales, se presentan los resultados del análisis.

El primer resumen es para determinar que etapas de la evaluación del ciclo de vida son significativas y cuáles son despreciables desde el punto de vista de los impactos ambientales.

Para cada tipo de lámpara se calculan los impactos en la evaluación del ciclo de vida en forma separada para la materia prima, la fabricación, el transporte, el consumo de energía durante la vida útil de operación de la lámpara, y finalmente para el fin de la vida útil. Las siguientes tablas y gráficos de barra presentan los resultados de la evaluación del ciclo de vida para cada tipo de lámpara, desglosados para las diferentes etapas del mismo. Los valores se muestran en las unidades mencionadas en la sección anterior (y repetidas abajo), pero normalizadas para representar los impactos asociados con 20 [Mlm-h] (megalumen-horas) de iluminación, recordando que esta es la luz total emitida por una lámpara LED de 12,5 [W] durante sus 25.000 [h] de vida útil, cuyo rendimiento lumínico es de 65 [lm/W].

GWP	Global Warming Potential	kg CO ₂ -eq
AP	Acidification Potential	kg SO ₂ -eq
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential	kg O ₃ formed
ODP	Ozone Depleting Potential	kg CFC11-eq
HTP	Human Toxicity Potential	kg 1,4-DCB-eq
FAETP	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential	kg 1,4-DCB-eq
MAETP	Marine Aquatic Ecotoxicity Potential	kg 1,4-DCB-eq
EP	Eutrophication Potential	kg PO ₄ -eq
LU	Land Use	m ² a
EDP	Ecosystem Damage Potential	points
TAETP	Terrestrial Ecotoxicity Potential	kg 1,4-DCB-eq
ARD	Abiotic Resource Depletion	kg Sb-eq
NHWL	Non-Hazardous Waste Landfilled	kg waste
RWL	Radioactive Waste Landfilled	kg waste
HWL	Hazardous Waste Landfilled	kg waste

Figura 9.3.5.1. Impactos ambientales del ciclo de vida de la lámpara incandescente de 60 [W].

Incandescent LCA Stage	GWP	AP	Air			HTP	FAETP	Water	
			POCP	ODP				MAETP	EP
Raw Materials	6.28	0.90049	0.000604	0.0000069		3.224	2.9873	11.026	0.05847
Manufacturing	7.77	0.06905	0.000796	0.0000030		4.373	0.0405	0.901	0.02756
Transport	0.28	0.00387	0.000043	0.0000004		0.098	0.0017	0.107	0.00053
Energy in Use	1017.12	6.93390	0.044379	0.0001008		197.746	18.5601	99.647	1.85966
Disposal	0.19	0.00059	0.000035	0.0000003		0.045	0.0011	0.017	0.00031
TOTAL	1031.64	7.90790	0.045857	0.00001114		205.486	21.5907	111.698	1.94653

Incandescent LCA Stage	LU	Soil		Resources			
		EDP	TAETP	ARD	NHWL	RWL	HWL
Raw Materials	1.7476	1.1385	0.002262	0.0499	2.060	0.0003923	0.0007504
Manufacturing	0.7402	0.5534	0.001446	0.0447	2.321	0.000822	0.0002103
Transport	0.0033	0.0026	0.000051	0.0020	0.019	0.000044	0.0000038
Energy in Use	20.2769	15.2903	0.120488	7.5409	30.601	0.0421082	0.0224757
Disposal	0.0198	0.0122	0.000134	0.0014	0.949	0.000024	0.0000032
TOTAL	22.7878	16.9970	0.124381	7.6389	35.950	0.0425895	0.0234434

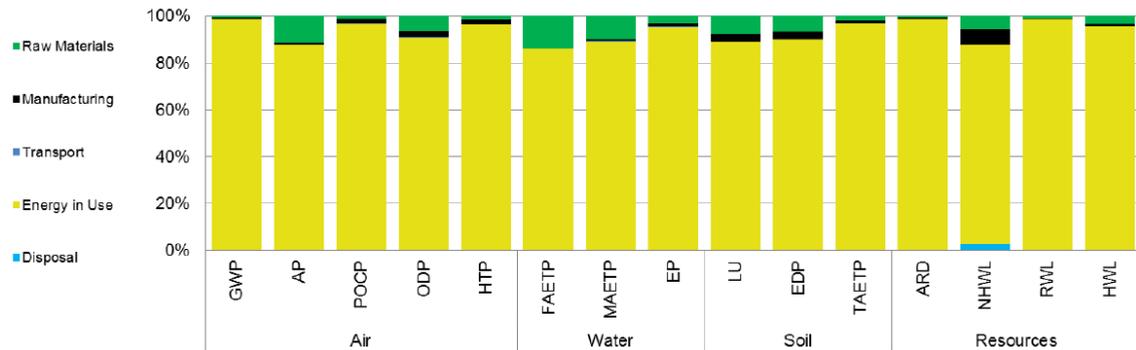


Figura 9.3.5.2. Impactos ambientales del ciclo de vida de la lámpara LFC de 15 [W].

CFL LCA Stage	GWP	AP	Air			HTP	FAETP	Water	
			POCP	ODP				MAETP	EP
Raw Materials	10.680	0.29225	0.002879	0.00000117		9.007	0.5182	6.9088	0.10631
Manufacturing	16.560	0.08449	0.001215	0.00000120		4.677	0.3486	2.2256	0.03657
Transport	0.173	0.00237	0.000026	0.00000002		0.060	0.0010	0.0654	0.00032
Energy in Use	277.380	1.89095	0.012103	0.00000275		53.928	5.0615	27.1750	0.50715
Disposal	0.086	0.00029	0.000016	0.00000001		0.020	0.0005	0.0077	0.00014
TOTAL	304.879	2.27035	0.016239	0.00000515		67.692	5.9298	36.3825	0.65049

CFL LCA Stage	LU	Soil		Resources			
		EDP	TAETP	ARD	NHWL	RWL	HWL
Raw Materials	1.0292	0.7001	0.013140	0.08395	1.382	0.000801	0.001169
Manufacturing	0.7215	0.5433	0.002536	0.08566	2.995	0.000239	0.000350
Transport	0.0020	0.0016	0.000031	0.00121	0.012	0.000003	0.000002
Energy in Use	5.5297	4.1698	0.032858	2.05648	8.345	0.011483	0.006129
Disposal	0.0085	0.0052	0.000057	0.00063	0.555	0.000001	0.000001
TOTAL	7.2909	5.4200	0.048622	2.22793	13.289	0.012527	0.007651

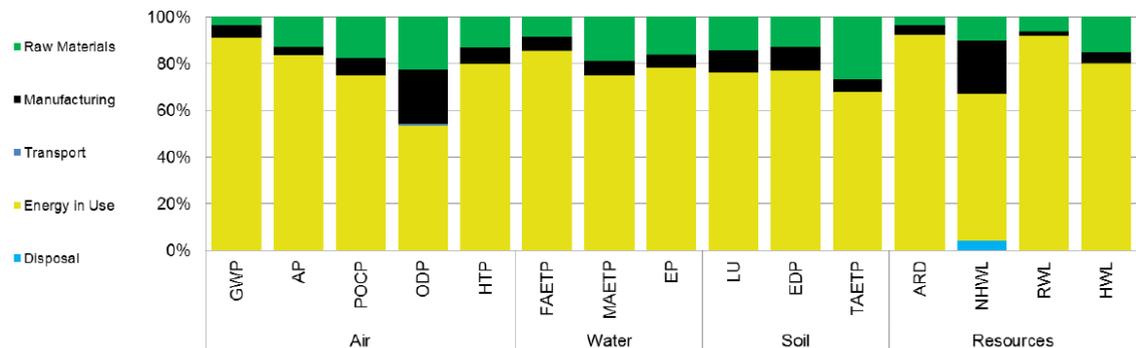


Figura 9.3.5.3. Impactos ambientales del ciclo de vida de la lámpara LED de 12,5 [W] de 2012.

LED-2012 LCA Stage	Air					Water			
	GWP	AP	POCP	ODP	HTP	FAETP	MAETP	EP	
Raw Materials	12.752	0.118812	0.0020015	0.000013575	13.2821	0.376537	6.4255	0.09046	
Manufacturing	3.450	0.031194	0.0003134	0.000000989	1.4660	0.015090	0.3198	0.00939	
Transport	0.052	0.000708	0.0000078	0.000000064	0.0180	0.000310	0.0196	0.00010	
Energy in Use	234.756	1.600375	0.0102428	0.0000023255	45.6406	4.283750	22.9991	0.42922	
Disposal	0.015	0.000059	0.0000027	0.000000025	0.0035	0.000091	0.0014	0.00002	
TOTAL	251.025	1.751148	0.0125682	0.0000037908	60.4102	4.675778	29.7654	0.52919	

LED-2012 LCA Stage	LU	Soil		Resources			
		EDP	TAETP	ARD	NHWL	RWL	HWL
Raw Materials	0.45011	0.33650	0.0069973	0.08918	4.3440	0.0008670	0.0028337
Manufacturing	0.26894	0.20316	0.0005715	0.02003	0.7873	0.0000281	0.0000658
Transport	0.00060	0.00048	0.0000093	0.00036	0.0035	0.0000008	0.0000007
Energy in Use	4.68000	3.52906	0.0278091	1.74047	7.0628	0.0097188	0.0051875
Disposal	0.00140	0.00085	0.0000089	0.00011	0.1692	0.0000002	0.0000003
TOTAL	5.40105	4.07005	0.0353961	1.85015	12.3668	0.0106149	0.0080880

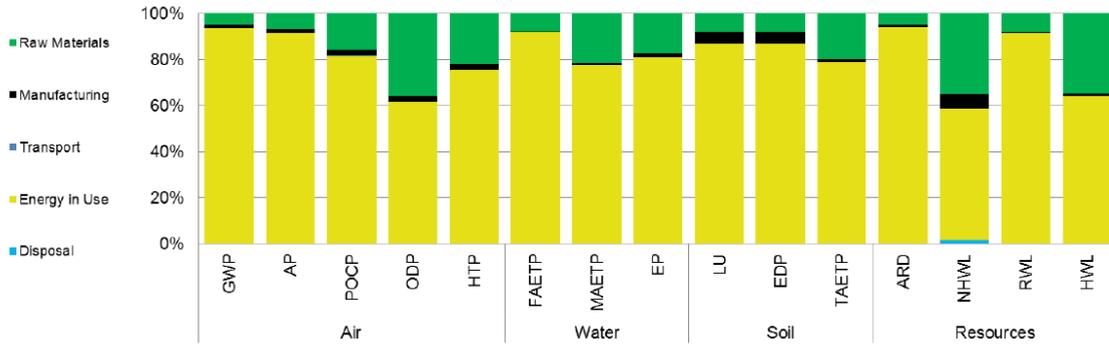
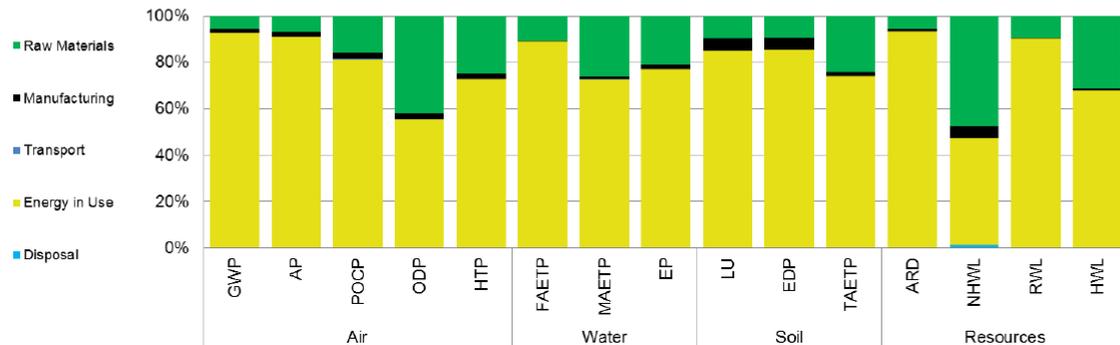


Figura 9.3.5.4. Impactos ambientales del ciclo de vida de la lámpara LED de 6,1 [W] de 2017.

LED-2017 LCA Stage	Air					Water			
	GWP	AP	POCP	ODP	HTP	FAETP	MAETP	EP	
Raw Materials	6.995	0.059638	0.000980	0.000000856	7.5722	0.24578	4.0410	0.056569	
Manufacturing	1.900	0.017255	0.000167	0.000000050	0.7461	0.00794	0.1658	0.004804	
Transport	0.027	0.000365	0.000004	0.000000003	0.0093	0.00016	0.0101	0.000050	
Energy in Use	113.837	0.776046	0.004967	0.000001128	22.1318	2.07726	11.1526	0.208135	
Disposal	0.013	0.000046	0.000002	0.000000002	0.0031	0.00008	0.0012	0.000022	
TOTAL	122.772	0.853350	0.006120	0.000002039	30.4625	2.33122	15.3707	0.269580	

LED-2017 LCA Stage	LU	Soil		Resources			
		EDP	TAETP	ARD	NHWL	RWL	HWL
Raw Materials	0.2547	0.18857	0.004386	0.04949	3.5353	0.0004879	0.0011664
Manufacturing	0.1404	0.10642	0.000306	0.01106	0.4023	0.0000144	0.0000327
Transport	0.0003	0.00025	0.000005	0.00019	0.0018	0.0000004	0.0000004
Energy in Use	2.2694	1.71130	0.013485	0.84398	3.4249	0.0047128	0.0025155
Disposal	0.0013	0.00080	0.000009	0.00010	0.0826	0.0000002	0.0000002
TOTAL	2.6661	2.00734	0.018191	0.90482	7.4469	0.0052157	0.0037152



Los cuatro conjuntos de resultados muestran claramente que el factor que domina la mayoría de los indicadores ambientales considerados es “energía en uso”, el cual se representa con las barras amarillas. La proporción de impacto atribuible a energía en uso es particularmente alta en la lámpara incandescente de 60 [W], donde la energía en uso constituye en promedio el 93% en los quince impactos ambientales durante la vida útil de la misma. La siguiente etapa más significativa de la evaluación es la de materia prima que constituye en promedio el 5% del impacto total. Le siguen la etapa de producción con un 1,8% promedio en los quince indicadores; y las etapas de disposición y transporte, con un promedio de 0,2% y 0,1% respectivamente.

Para la lámpara LFC, la mayor contribución a los impactos ambientales es de energía en uso, que representa en promedio alrededor del 78% del impacto. La próxima etapa más significativa es la de materia prima que representa en promedio un 13,6% del impacto y le sigue la etapa de producción con un impacto promedio del 8,2% del total. Las dos etapas restantes son disposición y transporte con un 0,3% y 0,1% respectivamente.

Para la lámpara LED del 2012, la mayor contribución es energía en uso, que representa alrededor del 81% promedio de los quince indicadores. Le siguen las etapas de materia prima con el 16,8%, producción con el 2,3% y disposición y transporte, ambos con menos del 0,1%.

Para la lámpara LED del 2017, el perfil es similar a la del 2012, sin embargo la significancia del uso de energía está disminuída por el hecho de tener considerablemente mayor eficacia energética. En este análisis, energía en uso representa el 78,2% del impacto, le sigue materia prima con el 19,3% y producción con el 2,3%. Disposición y transporte son despreciables.

A fin de simplificar la interpretación de los resultados con respecto a las cuatro lámparas y los quince indicadores ambientales, se sintetizan los resultados en dos gráficos de araña mostrados en las Figuras 9.3.5.5 y 9.3.5.6. Cada línea radial representa un impacto ambiental diferente y los impactos están agrupados en cuatro categorías – aire (naranja), agua (azul), suelo (verde) y recursos (amarillo). Para cada impacto se grafica en la circunferencia externa el mayor valor correspondiente a una determinada lámpara, y para las lámparas siguientes, se normalizan los valores respecto a ese impacto mayor.

En la figura 9.3.5.5 queda claro que la lámpara incandescente tiene el mayor impacto por unidad de servicio de iluminación de todas las lámparas consideradas (sus impactos ocupan todos los puntos de la circunferencia externa). Este resultado es intuitivo puesto que esta lámpara tiene el menor rendimiento de todas las analizadas y

su energía en uso fue identificado como el mayor de todos los impactos ambientales analizados.

Le sigue la lámpara LFC, luego la LED del 2012 y por último, la lámpara que menos impacto ambiental representa es la LED del 2017. Se debe observar que la lámpara LED del 2012 representa mayor impacto que la LFC únicamente en el vertido de residuos peligrosos. Esta diferencia se debe a que en la etapa de producción, la lámpara LED del 2012 tiene un impacto ligeramente mayor que la LFC debido a la fabricación del disipador de aluminio de gran tamaño utilizado para disipar el calor generado por los LED, que representa el 20% del impacto total medido por este indicador.

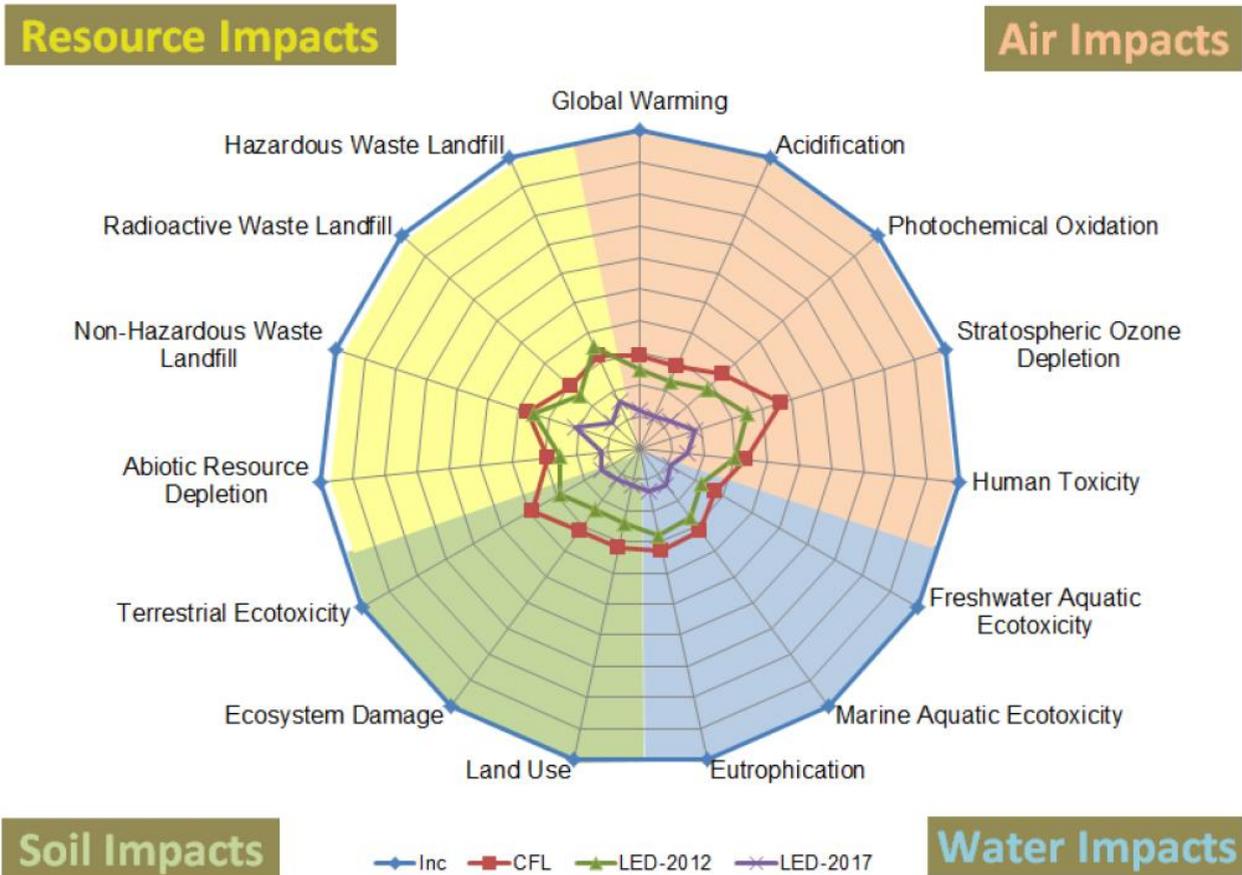


Figura 9.3.5.5. Impactos ambientales en la evaluación del ciclo de vida de las lámparas analizadas, relativos a la lámpara incandescente.

Como se observa en la Figura 9.3.5.5, en su totalidad, los impactos de la lámpara LED del 2017 son significativamente menores a los de la lámpara incandescente, y como se detalla en la Figura 9.3.5.6, sus impactos son un 70% menores a los de la lámpara LFC. Y aproximadamente un 50% menor a los de la mejor lámpara LED disponible en el 2012.

El descubrimiento importante de estos gráficos no es necesariamente la diferencia relativa entre las lámparas LFC y LED, sino la reducción muy significativa en los impactos ambientales que resulta al reemplazar una lámpara incandescente. Las reducciones en los impactos ambientales están en el orden de 3 a 10 veces. Estas reducciones se deben principalmente a la reducción en el consumo de energía por unidad de luz emitida. Así, debido al rol dominante del consumo de energía al evaluar los impactos, es apropiado continuar haciendo foco en mejorar la eficiencia energética de las instalaciones e incentivar el uso masivo de estas nuevas tecnologías.

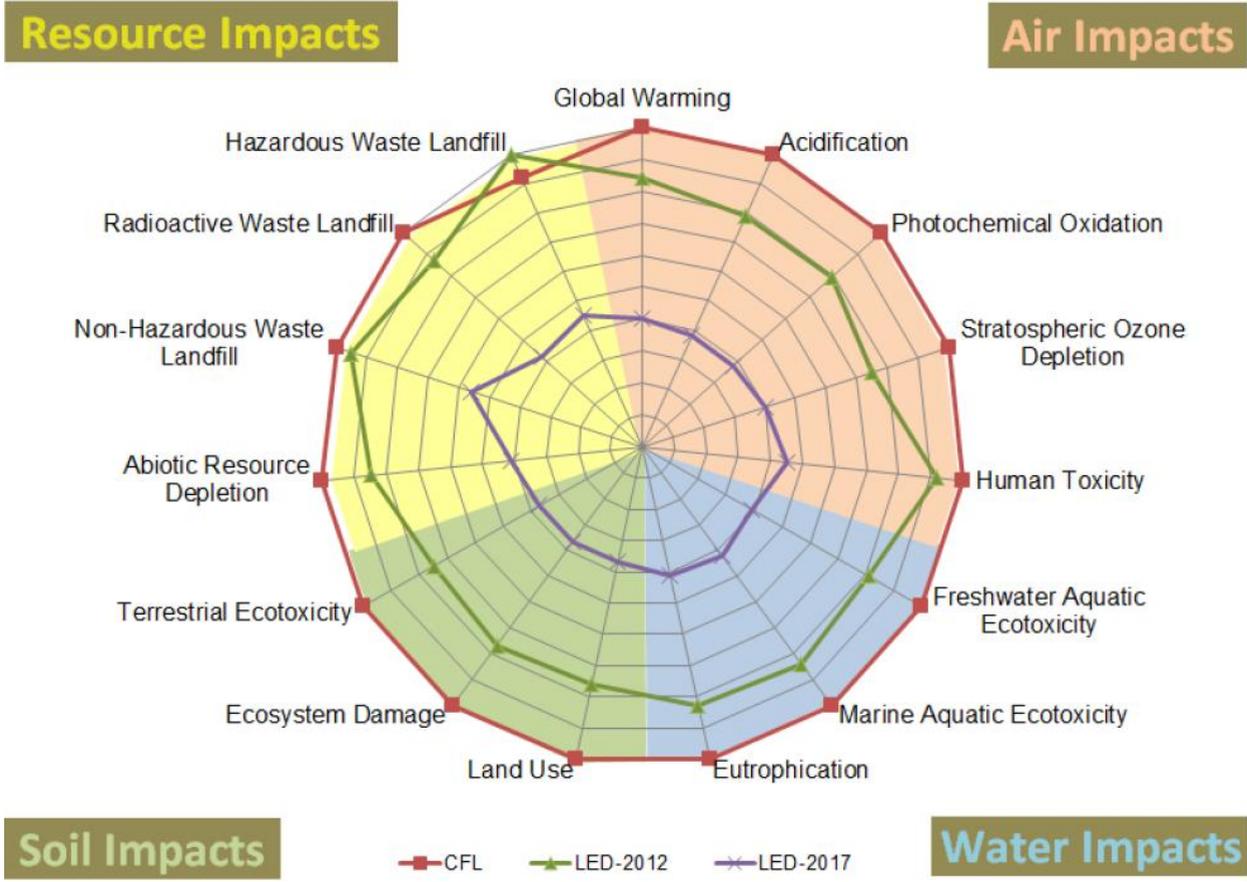


Figura 9.3.5.6. Impactos ambientales en la evaluación del ciclo de vida de las lámparas LFC y LED analizadas relativas a la lámpara LFC (detalle).

CAPÍTULO 10

Conclusiones

Se han analizado distintos tipos de lámparas y artefactos electrodomésticos usualmente encontrados en hogares residenciales a partir de una encuesta realizada por nuestro Grupo de Investigación en 61 hogares de la ciudad de Mar del Plata.

Se han ensayado en el laboratorio lámparas LFC y LED, midiendo tensión, corriente, potencia, factor de potencia verdadero y tasa de distorsión armónica, y capturando la forma de onda de tensión y corriente. Posteriormente se obtuvieron los espectros de frecuencia de tensión y corriente realizando la Transformada Rápida de Fourier. Complementariamente se realizaron los mismos tipos de mediciones en diferentes electrodomésticos y aparatos de electrónica usualmente encontrados en los hogares de usuarios residenciales.

Posteriormente se han modelado y simulado las cargas residenciales ensayadas en el programa ATPDraw, con el fin de inyectar luego corrientes armónicas provenientes de estas cargas residenciales, en redes de distribución de energía eléctrica.

Para evaluar finalmente la evolución de los índices de distorsión de tensión y corriente en redes de distribución a medida que se reemplacen en forma masiva las lámparas incandescentes por lámparas de bajo consumo (LFC y LED) como resultado de la prohibición de la importación y venta de lámparas incandescentes en territorio argentino (Ley 26.473), se han planteado tres escenarios en el tiempo. Un escenario actual, que representa la carga de un usuario residencial con la distribución promedio de lámparas y artefactos domésticos hallada en la encuesta energética; y dos escenarios futuros, en los que se mantienen los mismos artefactos domésticos, pero se reemplazan las lámparas convencionales (incandescentes y halógenas) por lámparas LFC y LED respectivamente.

Se ha modelado en el ATPDraw un tramo de la red de distribución de la zona urbana de la ciudad de Balcarce, la cual alimenta en forma predominante a usuarios residenciales. Luego, se han simulado en el dominio del tiempo los tres escenarios planteados, y se han evaluado las tasas de distorsión armónica de tensión y corriente en los distintos nodos de la misma.

Se han comparado estas tasas halladas con los niveles de compatibilidad electromagnética y límites de emisiones armónicas que establece la normativa nacional e internacional vigente, y con mediciones realizadas en subestaciones de la ciudad de Necochea, que alimenta preferentemente a usuarios residenciales.

Se realizó un análisis económico para evaluar la rentabilidad que representa para un usuario residencial, con tarifa con y sin subsidio, reemplazar las lámparas incandescentes, halógenas y dicroicas por lámparas LED que brinden el mismo nivel de iluminación.

Por último, se analizó el impacto ambiental durante el ciclo de vida de las lámparas incandescentes, LFC y LED; y las huellas de mercurio y dióxido de carbono en la ciudad de Mar del Plata debido al uso actual de lámparas LFC y uso futuro de lámparas LED respectivamente.

A continuación se enumeran las principales conclusiones:

- La potencia que actualmente es dedicada a la iluminación en un usuario residencial medio, se reduce significativamente si todas las lámparas incandescentes y halógenas se sustituyen por lámparas LFC y aún más si se sustituyen por las de tecnología LED, debido a su gran eficiencia energética.
- El nivel de THDi% en las lámparas LFC y LED, y en los electrodomésticos, es muy variable, dependiendo de la marca, modelo y potencia de la unidad, pero en general son niveles de distorsión armónica elevados, debido a la proliferación de la electrónica de potencia en estos tipos de tecnologías. En las lámparas LFC se han medido valores de THDi% que varían desde 61% hasta 130%, en las lámparas LED valores que varían desde 9 hasta 168%, y en los electrodomésticos valores comprendidos entre el 4% y 150%.
- Si bien los valores individuales de THDi% en lámparas LFC, lámparas LED y electrodomésticos es elevado, debido a la diversidad de los armónicos en cuanto a amplitudes y ángulos de fase, los valores de THDi% resultantes de la combinación de dichas cargas son menores, alcanzando valores de 19.07%, 25.60% y 27.06%, para un usuario residencial promedio correspondientes a los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.
- En las simulaciones de la red de distribución se obtuvieron tasas de distorsión armónica de corriente (THDi%) de hasta 15.4%, 20.7% y 21.2%, que se dan en las líneas de baja tensión en los escenarios 1, 2 y 3 respectivos. Estos valores son menores que los de un usuario individual, debido al efecto de atenuación de corrientes armónicas que se produce en las redes cuando hay una gran cantidad de cargas conectadas, debido a la distorsión de tensión que se produce por la propia impedancia de cortocircuito de las líneas y transformadores. Esta distorsión de tensión (THDu% alcanzó valores de 8.6%, 10.8% y 12.0% en los extremos de línea más alejados de los transformadores MT/BT de los tres escenarios respectivos.
- Con respecto a la normativa vigente, se observa que en los tres escenarios, en algunos puntos de la red se superan los límites de alguna de las normas, tanto en distorsión de tensión como de corriente. En el escenario 2, se alcanzan distorsiones mayores que en el escenario 1, y en el escenario 3, se alcanzan distorsiones aún mayores que en el escenario 2. Si bien en la realidad, los factores de diversidad y atenuación pueden ser mayores, y en consecuencia atenuarse aún más las tasas de distorsión, se concluye que es posible que, en un futuro no tan lejano, de realizarse un reemplazo masivo de lámparas incandescentes y halógenas por lámparas LFC y LED, se excedan los límites en valores tales, que justifiquen la implementación de filtros que mitiguen los efectos nocivos de los armónicos en las redes de distribución. De todas maneras, los niveles de distorsión de tensión y corriente, si bien podrían superar los límites establecidos por la normativa vigente, no alcanzarían valores muy excesivos, por los motivos mencionados.

-
- Cabe mencionar, que las tasas de distorsión de corriente medidas en subestaciones reales, durante la banda horaria 19.00- 23.00 hs son similares a las obtenidas en la simulación del escenario 1, el cual representa la situación de carga actual en dicho periodo de tiempo. Esto valida en cierto grado la consistencia de las simulaciones y de los datos provenientes de la encuesta energética y ensayos de laboratorio utilizados para la misma.
 - Con respecto al análisis económico, se puede concluir:
 - A mayor tiempo de encendido de la lámpara el tiempo de amortización se reduce. Se observa que el tiempo de amortización es significativamente mayor en el caso de tener una tarifa subsidiada.
 - Evaluando el período simple de repago, PSR (sin considerar el valor temporal del dinero), y tomando como ejemplo las lámparas LED de las Figuras 8.2.3 y 8.2.4, en el primer ejemplo se ve que cuando la tarifa es subsidiada, es decir energía más barata, la lámpara se amortiza en un tiempo mayor a su vida útil. Mientras que con tarifa no subsidiada, es decir energía más cara, se amortiza en un tiempo mayor al 50% de su vida útil. En el segundo ejemplo, con tarifa subsidiada la lámpara se amortiza entre uno y dos años antes de su vida útil. Y en el caso sin subsidio se amortiza en menos del 50% de la vida útil.
 - Si se realiza el cálculo del costo anualizado total, CAT (teniendo en cuenta el valor futuro del dinero), se concluye que con subsidio el costo anualizado total es mayor en las lámparas LED, esto evidencia que el reemplazo no es rentable, porque a pesar de que las lámparas halógenas tienen un mayor consumo, la energía es más económica que el costo de la lámpara LED. Con tarifa sin subsidio el reemplazo comienza a ser rentable para tiempos de encendido que se encuentran entre 3 y 7 horas diarias de encendido según el modelo de lámpara.
 - Si bien por el momento se concluye que el uso de lámparas LED en una vivienda no es rentable, es de esperarse que en un futuro con el avance tecnológico, uso masivo y reestructuración del cuadro tarifario, este escenario cambie. A pesar de esto se debe considerar el impacto ambiental positivo que representa el uso de lámparas LED, por el ahorro energético y reducción de las emisiones de CO₂ y mercurio al ambiente, entre otros impactos ambientales positivos, como se vio en el Capítulo 9.
-

-
- Con respecto al análisis ambiental se puede concluir:
 - Teniendo en cuenta que en promedio hay 9 lámparas LFC por usuario (Capítulo 6), que contienen alrededor de 3 mg de mercurio y que son cambiadas cada 7,2 años en el mejor de los casos, en Mar del Plata con 295.757 usuarios residenciales, se generan por lo menos 3 kg de mercurio por día.
 - De la encuesta surge que el 77,07 % de los usuarios residenciales las descarta a la basura representando esto 2,3 kg de mercurio como mínimo, que es liberado al ambiente por día, es decir 840 kg al año.
 - Con las lámparas utilizadas en la actualidad en una vivienda promedio (Capítulo 6) se generan 0,350 [Ton. de CO₂/año] por usuario o 0,117 [Ton. de CO₂/año] por habitante del uso de electricidad para iluminación, considerando que en la ciudad de Mar del Plata habitan 3 habitantes promedio por vivienda. Si se considera la situación futura de reemplazo por lámparas LED, la producción de CO₂ se reduciría a la tercera parte, siendo esta de 0,117 [Ton. de CO₂/año] por usuario o 0,039 [Ton. de CO₂/año] por habitante.
 - Con respecto al análisis del ciclo de vida extraído de la bibliografía, queda claro que la lámpara incandescente tiene el mayor impacto por unidad de servicio de iluminación de todas las lámparas consideradas. Este resultado es intuitivo puesto que esta lámpara tiene el menor rendimiento de todas las analizadas y su energía en uso fue identificado como el mayor de todos los impactos ambientales analizados. Le sigue la lámpara LFC, luego la LED del 2012 y por último, la lámpara que menos impacto ambiental representa es la LED del 2017.
 - Se debe observar que la lámpara LED del 2012 representa mayor impacto que la LFC únicamente en el vertido de residuos peligrosos. Esta diferencia se debe a que en la etapa de producción, la lámpara LED del 2012 tiene un impacto ligeramente mayor que la LFC debido a la fabricación del disipador de aluminio de gran tamaño utilizado para disipar el calor generado por los LED, que representa el 20% del impacto total medido por este indicador.
 - En su totalidad, los impactos ambientales de la lámpara LED del 2017 son significativamente menores a los de la lámpara incandescente, alrededor de 3 a 10 veces; un 70% menores a los de la lámpara LFC; y aproximadamente un 50% menor a los de la mejor lámpara LED disponible en el 2012.
 - Estas reducciones se deben principalmente a la reducción en el consumo de energía por unidad de luz emitida. Así, debido al rol dominante del consumo de energía al evaluar los impactos ambientales, es apropiado continuar haciendo foco en mejorar la eficiencia energética de las instalaciones e incentivar el uso masivo de estas nuevas tecnologías.
-

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] Waide P., “Phase out of incandescent lamps. Implications for international supply and demand for regulatory compliant lamps”, International Energy Agency. 2010.
- [2] Ley 26.473 consultada del sitio:
<http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/145000-149999/149591/norma.htm>
- [3] Decreto 2060/2010 consultado del sitio:
<http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/175000-179999/177150/norma.htm>
- [4] Tanides C. G., Iglesias Furfaro H. D., “Iluminación Eficiente en el Sector Residencial Argentino: Evolución y Perspectivas Futuras”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14. 2010.
- [5] Suárez J., di Mauro G. , Anaut D. , Agüero C., “Analysis of the Harmonic Distortion and the Effects of Attenuation and Diversity in Residential Areas” - Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina).- Volume 3, Issue 5, Dec. 2005 Page(s):53 – 59.
- [6] Suárez J., di Mauro G. , Anaut D., “Cancelación Parcial de Corrientes Armónicas Provocadas por Cargas Residenciales no lineales”. Información Tecnológica, ISSN 0716-8756-Vol. 16, Nº 3, 2005.
- [7] Suárez J. Di Mauro G., Anaut D., Agüero C., “Influencia de las Cargas Residenciales no lineales en un sistema de Distribucion Eléctrica”. Revista “Innovación”. Universidad de Antofagasta – Chile- Año 15, Nº 2 – Pág. 53-60- Diciembre 2003 – ISBN 0716-611.
- [8] Suárez J., di Mauro G. , Anaut D., “Predicción de la Distorsión Armónica de Tensión en un Sistema de Distribución”. Revista Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia,. Pág. 7-12. ISSN 0122-1701. Año XI-. Nº 2, .2005.
- [9] Suárez J., di Mauro G, Anaut D., Agüero C. “Parámetros que afectan la corriente de neutro en presencia de armónicos”- Información Tecnológica- Vol. 21(1), Pág. 77-89, Año 2010.

- [10] Pileggi D. J., Gulachenski E. M., Root C. E., Gentile T. J., Emanuel A. J., "Effect of modern compact fluorescent lights on voltage distortion" IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 8, no. 3, pp. 1451-1459. 1993.
- [11] Emmanuel A. E., Gentile T. J., Pileggi D. J., Gulachenski E. M., Root C. E., "The Effect of Modern Compact Fluorescent Lights on Voltage Distortion", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 8, N° 3, Julio 1993.
- [12] Khan A. K., Dwyer R., McGranaghan M., "Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 10, No 4, Noviembre 1995.
- [13] Mansoor A., Grady W. M., Chowdhury A. H., Samotyj M. J., "An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 10, no. 1, Enero 1995, pp. 467-473.
- [14] El-Saadany E., Salama M., "Reduction of the net harmonic current produced by single-phase non-linear loads due to attenuation and diversity effects," Electrical Power & Energy Systems, vol. 20, no.4, pp. 259–268, Mayo 1998.
- [15] Čuk V., Cobben J. F. G., Kling W. L., Timens R. B., "An analysis of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps", Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on, 26-29 Sept. 2010.
- [16] Blanco A. M., Parra E. E., "Effects of High Penetration of CFLs and LED's on the Distribution Networks", Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on, 26-29 Sept. 2010.
- [17] Kirschbaum C. F., "Que se debe hacer con la lámpara incandescente?", X Congreso Panamericano de Iluminación Lux América 2010.

-
- [18] Solivérez C. E., “Análisis de un objeto tecnológico: Lámpara Eléctrica Incandescente”, Enciclopedia de Ciencias y Tecnologías en Argentina (ECYT-AR). ISSN 1853-0613. 2012.
- [19] O’ Donell B. M., Sandoval J. D., Paukste F., “Fuentes Luminosas”, Manual de Iluminación Eficiente, Cap. 4. UTN y ELI Argentina. 2002.
- [20] Laszlo C., “Las Fuentes de Luz”, Curso de Iluminación Eficiente, Cap. 5. UTN-OSRAM. 2005.
- [21] “Luminotecnia, Manual Práctico de INDALUX”, Publicación Técnica. 2002
- [22] Marrufo E., Castillo J., “Luminotecnia. Dispositivos para alumbrado incandescente y fluorescente”, Instalaciones Eléctricas Interiores, Unidad 8. Ed. McGraw-Hill.
- [23] Caminos J. A., “Criterios de Diseño en Iluminación y Color”, Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe. ISBN 978-987-27897-2-5. 2011.
- [24] Eissler D., Illek S., Bogner G., “LED Technology Trends”, OSRAM Opto Semiconductors.
- [25] Steele R. V., “The story of a new light source”, Nature Photonics – Vol. 1- January 2007.
- [26] López J. R., “Normas y Regulaciones de Armónicos y Flicker”, Concapan XXXI, IEEE, Sección El Salvador. Nov. 2011.
- [27] Tanides C., “Auditorías Energéticas de la Iluminación Residencial”, Manual de Iluminación Eficiente, Cap. 14. UTN y ELI Argentina. 2002.
- [28] Panel Intergubernamental de Cambio Climático (I.P.C.C). Sitio web: <http://www.ipcc.ch/index.htm>
- [29] “Recursos naturales infraestructura. Primer Diálogo Europa- América Latina para la Promoción del Uso Eficiente de la Energía”. CEPAL-SERIE (1998). Bruselas, Bélgica.
- [30] Plan de Acción “Agenda 21- Compromiso ciudadano para la sostenibilidad”. Sitio web: http://www.bcn.cat/agenda21/A21_AGENDA_CAST.htm
- [31] Campaña de Eficiencia Energética, “Revolución Energética”, Greenpeace. (2008). Sitio web: <http://www.greenpeace.org/argentina/es/campanas/cambio-climatico/eficiencia-energetica/>
-

- [32] Martínez C., Äyrälä Quiroga M., Zurbriggen N., "Lineamientos Para La Gestión Integral de Lámparas con Contenido de mercurio Como Residuo Peligroso en la República Aargentina." VII Congreso de Medio Ambiente. 2013.
- [33] Brugnoli M., Iribarne R., "Estudio de impactos en Redes de Distribución y Medio Ambiente debido al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas". Secretaria de Energía. 2006.
- [34] Jacob S. B., Strack J. L., Branda J. C., Suárez J. A., "Evaluación del Consumo Eléctrico en el Sector Residencial de Mar Del Plata. Propuestas de Ahorro y Eficiencia Energética". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 16, 2012. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- [35] Jacob S. B., Strack J. L., Branda J. C., Murcia G. J., Suárez J. A., "Evaluación del Consumo Eléctrico en el Sector Residencial de Mar Del Plata. Aspectos Económicos Y Ambientales". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 17, 2013. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- [36] Lindberg S.E., Wallschläger D., Prestbo E.M., Bloom N.S., Price J., Reinhart, D., "Methylated mercury species in municipal waste landfill gas sampled in Florida". USA. Atmos. Environ. 35, 4011-4015. 2001.
- [37] "La Huella de Carbono del Argentino Promedio". Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Dirección Cambio Climático. 2008.
- [38] "Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 1: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent and LED Lamps", Solid State Lighting Program, Building Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U. S. Department of Energy. 2012.
- [39] "Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 2: LED Manufacturing and Performance", Solid State Lighting Program, Building Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U. S. Department of Energy. 2012.
- [40] Ecoinvent Life-Cycle Impact Assessment Database version 2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Sitio web: <http://www.ecoinvent.org>

ANEXO 1

Instrumentos utilizados

INSTRUMENTOS UTILIZADOS

1. Osciloscopio digital FLUKE 97 Scopemeter – 50 MHz.



2. Osciloscopio digital FLUKE 123 Industrial Scopemeter – 20 MHz.



3. Pinza transductora PROVA 15 AC/DC Current Probe.



4. Pinza multifunción PROVA 21 Power Harmonics & Leakage Tester.



ANEXO 2

Datos de los ensayos realizados

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC 1)



Características nominales:

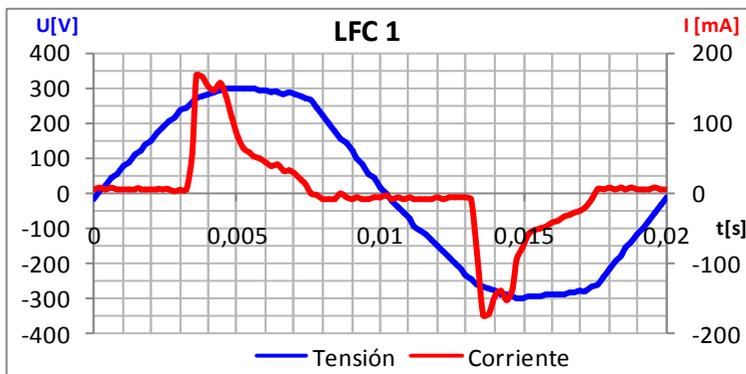
Marca: Osram **Modelo:** Mini Twist

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.

Flujo lumínico: 680 [lm] **Incandescente equivalente:** 60 [W]

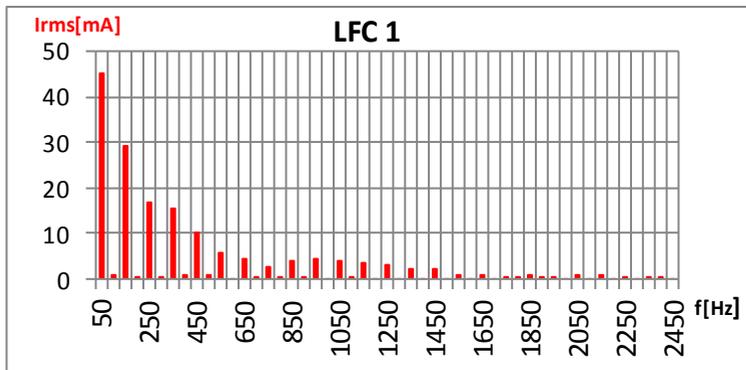
Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 6000 horas

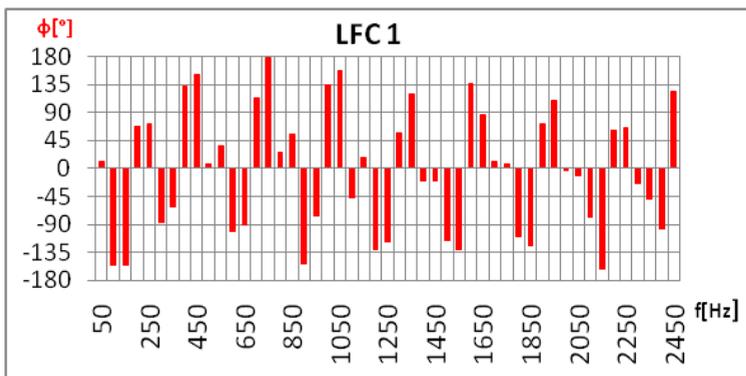


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
218.78	300.00
U1[V]	FCu
218.53	1.37
THDu%	
4.77	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
61.05	178.00
I1[mA]	Fci
45.21	2.92
THDi%	
90.75	



Potencia	
FD	cosφ1
0.74	0.96
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.71	9.45
Q1[VAr]	S1[VA]
2.87	9.88
P[W]	S[VA]
10.17	13.36
D[VAd]	N[Van]
8.99	13.04
F[Vaf]	
9.44	



Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC 1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

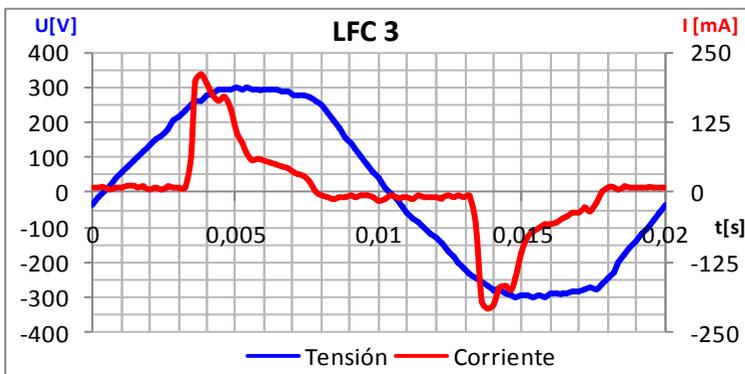
Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	218.53	-5.41	45.21	11.50	16.91
3	150	6.65	41.54	29.48	-156.14	162.32
5	250	7.06	118.35	17.03	71.09	-47.27
7	350	1.78	-98.36	15.82	-62.66	35.70
9	450	2.49	-34.84	10.26	150.80	-174.36
11	550	0.73	71.19	5.86	35.33	-35.86
13	650	1.20	126.04	4.54	-90.35	143.61
15	750	0.55	-156.48	3.02	177.28	-26.23
17	850	0.22	-11.00	4.36	55.64	66.64
19	950	0.31	-21.84	4.55	-75.46	-53.63
21	1050	0.11	10.34	4.22	158.23	147.90
23	1150	0.20	-89.77	3.63	17.76	107.52
25	1250	0.23	-90.00	3.09	-118.44	-28.44
27	1350	0.23	-62.11	2.51	119.26	-178.63
29	1450	0.17	6.04	2.21	-20.61	-26.64
31	1550	0.39	-160.43	1.23	-130.58	29.85
33	1650	0.21	8.71	0.94	85.58	76.86
35	1750	0.29	-60.28	0.74	6.84	67.12
37	1850	0.04	-77.55	0.87	-124.89	-47.35
39	1950	0.06	36.51	0.78	109.26	72.75
41	2050	0.40	2.20	0.86	-11.56	-13.75
43	2150	0.02	67.71	1.08	-161.37	130.91
45	2250	0.22	39.91	0.42	64.95	25.04
47	2350	0.59	91.87	0.61	-48.35	-140.22
49	2450	0.66	-90.50	0.38	123.42	-146.08

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC 3)



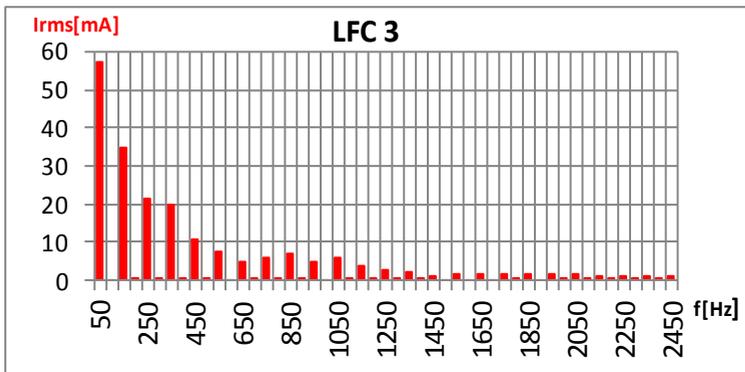
Características nominales:

Marca: Philips **Modelo:** Genie
Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.
Flujo lumínico: 600 [lm] **Incandescente equivalente:** 50 [W]
Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A
Vida útil a tensión nominal: 8000 horas

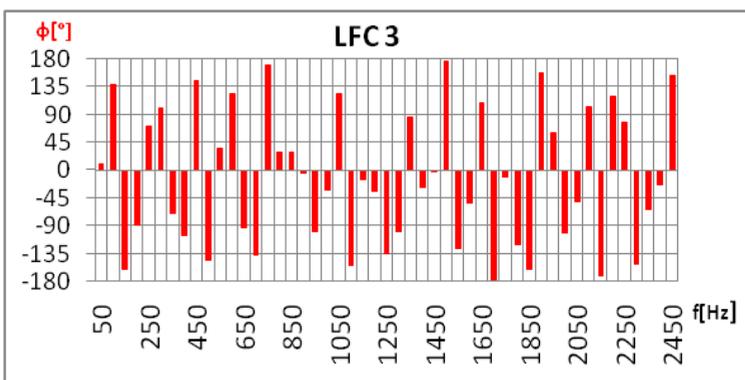


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.47	300.00
U1[V]	FCu
219.18	1.37
THDu%	
5.11	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
75.50	218.00
I1[mA]	Fci
57.29	2.89
THDi%	
85.83	



Potencia	
FD	cosφ1
0.76	0.94
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.72	11.86
Q1[VAr]	S1[VA]
4.12	12.56
P[W]	S[VA]
11.82	16.57
D[VAd]	N[Van]
10.81	16.05
F[VAF]	
11.57	



Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC 3)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

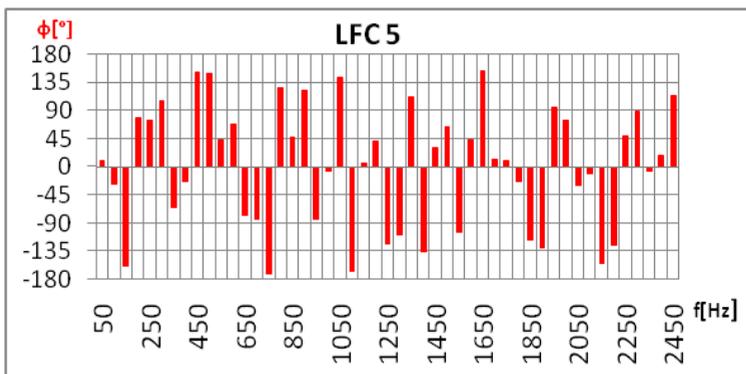
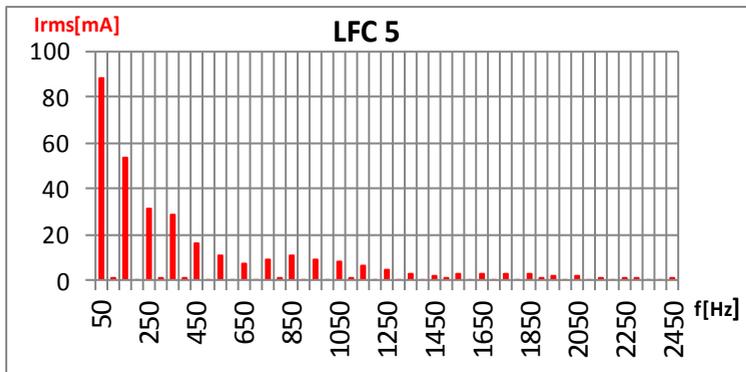
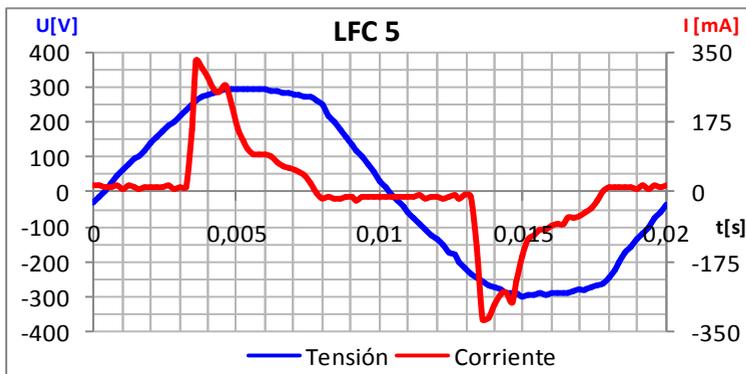
Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.18	-9.41	57.29	9.72	19.13
3	150	6.78	30.95	34.86	-160.74	168.31
5	250	8.05	95.19	21.15	70.30	-24.89
7	350	1.36	-140.40	19.48	-70.40	70.00
9	450	2.28	-76.29	10.74	144.33	-139.37
11	550	1.15	-44.50	7.22	35.09	79.59
13	650	1.20	49.23	4.70	-93.40	-142.64
15	750	0.62	121.37	5.62	170.23	48.86
17	850	0.54	166.97	6.74	29.61	-137.36
19	950	0.29	-34.43	4.98	-99.41	-64.97
21	1050	0.32	110.64	5.63	123.15	12.50
23	1150	0.07	-98.45	3.97	-15.91	82.54
25	1250	0.28	143.13	2.82	-134.59	82.28
27	1350	0.48	-22.67	2.35	84.93	107.60
29	1450	0.33	16.33	1.10	-0.91	-17.23
31	1550	0.33	-10.75	1.66	-126.67	-115.92
33	1650	0.43	-96.47	1.57	109.11	-154.42
35	1750	0.07	59.40	1.79	-11.80	-71.20
37	1850	0.19	55.55	1.62	-159.58	144.87
39	1950	0.19	-134.08	1.37	61.17	-164.75
41	2050	0.07	82.39	1.50	-51.60	-133.99
43	2150	0.40	-122.97	1.22	-171.52	-48.55
45	2250	0.47	36.13	1.20	77.46	41.33
47	2350	0.22	-120.04	0.97	-63.48	56.55
49	2450	0.31	126.68	0.79	153.69	27.02

Lámpara Fluorescente Compacta de 18 W (LFC 5)



Características nominales:

Marca: Philips **Modelo:** Genie
Potencia: 18 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.
Flujo lumínico: 1100 [lm] **Incandescente equivalente:** 80 [W]
Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A
Vida útil a tensión nominal: 8000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
218.68	296.00
U1[V]	FCu
218.38	1.35
THDu%	
5.25	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
115.82	328.00
I1[mA]	Fci
88.03	2.83
THDi%	
85.50	
Potencia	
FD	cosφ1
0.76	0.95
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.72	18.20
Q1[VA]	S1[VA]
6.18	19.22
P[W]	S[VA]
16.07	25.33
D[VAd]	N[Van]
16.49	24.56
F[VAf]	
17.61	

Lámpara Fluorescente Compacta de 18 W (LFC 5)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	218.38	-8.73	88.03	10.01	18.74
3	150	7.49	28.87	54.02	-158.85	172.28
5	250	7.62	97.37	31.49	73.78	-23.59
7	350	1.58	-132.34	29.09	-65.62	66.72
9	450	2.43	-78.13	16.24	150.21	-131.66
11	550	1.25	-7.01	10.89	43.08	50.09
13	650	1.51	45.37	7.55	-77.25	-122.62
15	750	0.93	122.25	9.01	-170.77	66.97
17	850	0.83	142.93	10.70	47.49	-95.44
19	950	0.33	-16.66	8.78	-82.78	-66.13
21	1050	0.58	-4.02	8.59	143.13	147.15
23	1150	0.05	159.19	6.71	5.78	-153.41
25	1250	0.17	90.00	4.47	-122.08	147.92
27	1350	0.03	-150.44	3.02	111.06	-98.50
29	1450	0.54	-56.07	2.29	30.44	86.52
31	1550	0.41	91.89	2.48	-104.57	163.54
33	1650	0.15	45.30	2.54	153.31	108.01
35	1750	0.13	-57.44	3.02	10.56	68.00
37	1850	0.11	55.73	2.48	-117.18	-172.92
39	1950	0.20	-45.50	1.57	94.79	140.29
41	2050	0.43	86.54	1.97	-30.51	-117.05
43	2150	0.31	84.41	1.34	-155.16	120.43
45	2250	0.28	17.03	1.00	48.32	31.29
47	2350	0.38	156.32	0.18	-6.50	-162.82
49	2450	0.23	-92.83	0.70	113.61	-153.56

Lámpara Fluorescente Compacta de 18 W (LFC 7)



Características nominales:

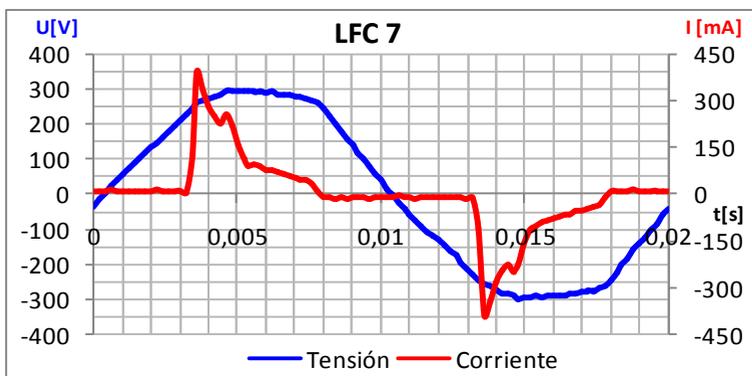
Marca: Osram **Modelo:** Duluxstar Mini Twiist

Potencia: 18 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.

Flujo lumínico: 1200 [lm] **Incandescente equivalente:** 100 [W]

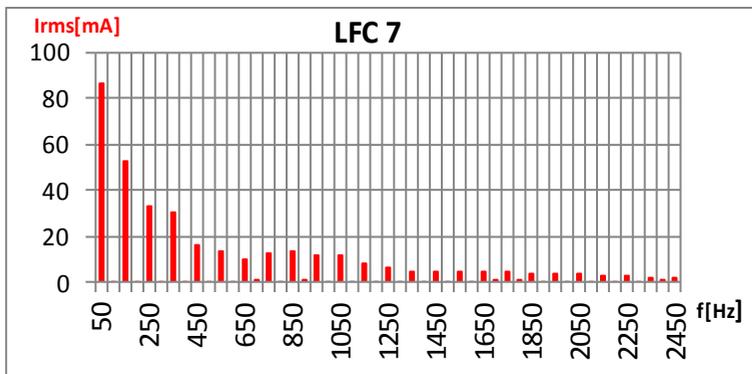
Color: Luz blanca cálida **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 6000 horas

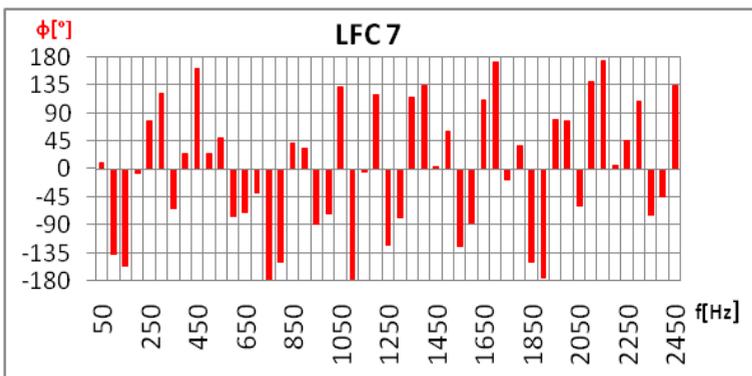


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
217.06	300.00
U1[V]	FCu
216.76	1.38
THDu%	
5.26	

Corriente	
Irms[ma]	Imax[ma]
116.81	388.00
I1[ma]	Fci
86.17	3.32
THDi%	
91.52	



Potencia	
FD	cosφ1
0.74	0.94
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.70	17.63
Q1[VAr]	S1[VA]
6.16	18.68
P[W]	S[VA]
20.61	25.36
D[VAd]	N[Van]
17.15	24.60
F[Vaf]	
18.22	



Lámpara Fluorescente Compacta de 18 W (LFC 7)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	216.76	-9.29	86.17	9.96	19.25
3	150	7.14	33.03	53.00	-155.58	171.39
5	250	8.08	89.59	33.11	78.13	-11.46
7	350	1.60	-112.03	30.05	-64.22	47.81
9	450	2.19	-78.87	16.32	161.39	-119.74
11	550	0.45	-17.82	13.29	49.81	67.64
13	650	1.24	44.56	9.58	-70.20	-114.77
15	750	0.46	152.14	12.24	-178.64	29.23
17	850	0.30	71.49	13.04	41.86	-29.63
19	950	0.57	-78.34	11.91	-89.59	-11.25
21	1050	0.22	101.17	11.27	132.03	30.85
23	1150	0.17	84.20	7.85	-4.99	-89.19
25	1250	0.24	135.00	6.43	-122.43	102.57
27	1350	0.24	-77.17	4.78	114.49	-168.34
29	1450	0.24	108.65	4.83	4.56	-104.09
31	1550	0.40	-105.76	4.71	-124.40	-18.64
33	1650	0.35	74.87	4.79	109.99	35.12
35	1750	0.08	47.49	4.60	-18.06	-65.56
37	1850	0.26	-134.53	3.84	-150.01	-15.48
39	1950	0.14	-134.05	3.98	79.75	-146.20
41	2050	0.31	-131.32	3.45	-58.61	72.72
43	2150	0.26	-77.20	2.70	173.63	-109.17
45	2250	0.60	-85.98	3.00	46.54	132.52
47	2350	0.24	-99.18	1.92	-73.79	25.39
49	2450	0.16	114.92	2.00	134.66	19.73

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A1)



Características nominales:

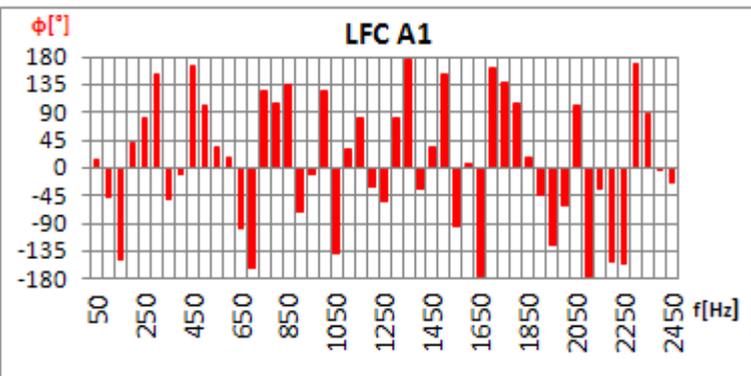
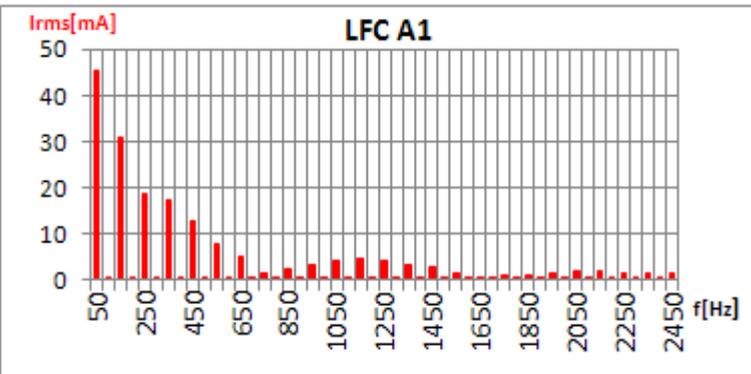
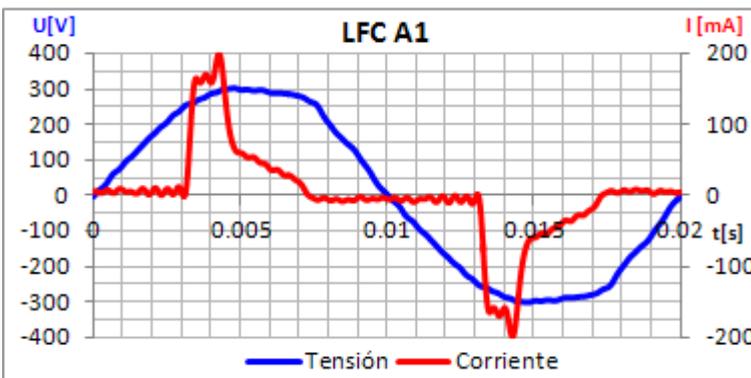
Marca: Alic **Modelo:** Standard 2U

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 417 [lm] **Incandescente equivalente:** 55 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.25	302.00
U1[V]	FCu
219.99	1.37
THDu%	
4.79	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
63.75	199.24
I1[mA]	Fci
45.42	3.13
THDi%	
98.51	
Potencia	
FD	cosφ1
0.71	0.96
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.68	9.55
Q1[VAr]	S1[VA]
2.92	9.99
P[W]	S[VA]
7.06	14.04
D[VA]	N[VA]
9.87	13.73
F[VA]	
10.29	

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.99	-3.29	45.42	13.70	17.00
3	150	7.46	41.53	31.18	-147.29	171.18
5	250	6.03	129.31	18.84	80.84	-48.47
7	350	1.55	-109.03	17.55	-49.12	59.91
9	450	2.26	19.36	12.71	166.24	146.88
11	550	1.34	98.79	7.68	33.39	-65.40
13	650	1.92	142.74	4.97	-96.77	120.49
15	750	0.95	-137.23	1.29	125.69	-97.08
17	850	1.00	-141.07	2.43	135.14	-83.79
19	950	0.14	-51.97	3.40	-9.87	42.10
21	1050	0.61	98.64	4.43	-136.95	124.41
23	1150	0.37	-161.02	4.90	81.43	-117.55
25	1250	0.17	180.00	4.20	-52.67	127.33
27	1350	0.02	-110.75	3.20	175.44	-73.80
29	1450	0.17	135.01	2.67	32.81	-102.20
31	1550	0.40	135.53	1.30	-93.12	131.34
33	1650	0.33	-100.19	0.62	-174.96	-74.78
35	1750	0.36	-12.26	1.03	137.90	150.16
37	1850	0.26	28.80	1.18	18.43	-10.37
39	1950	0.40	-11.26	1.41	-123.63	-112.37
41	2050	0.34	-71.71	1.85	102.05	173.75
43	2150	0.37	-58.64	1.74	-33.16	25.47
45	2250	0.39	50.27	1.71	-154.54	155.19
47	2350	0.26	-78.89	1.65	87.13	166.02
49	2450	0.47	-168.38	1.69	-23.75	144.63

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A3)



Características nominales:

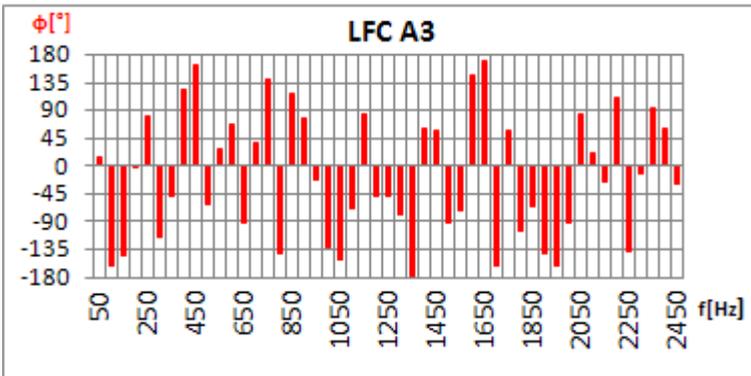
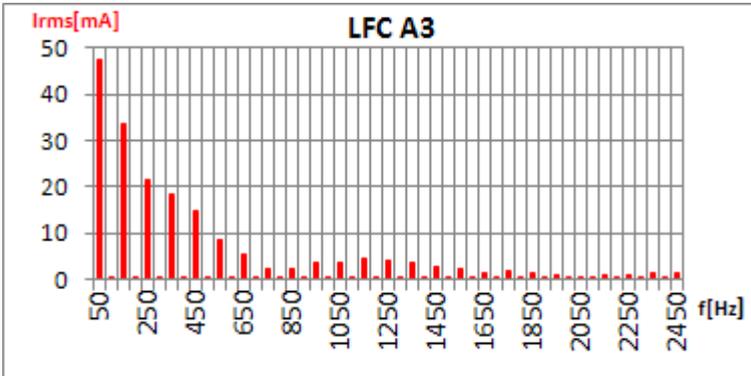
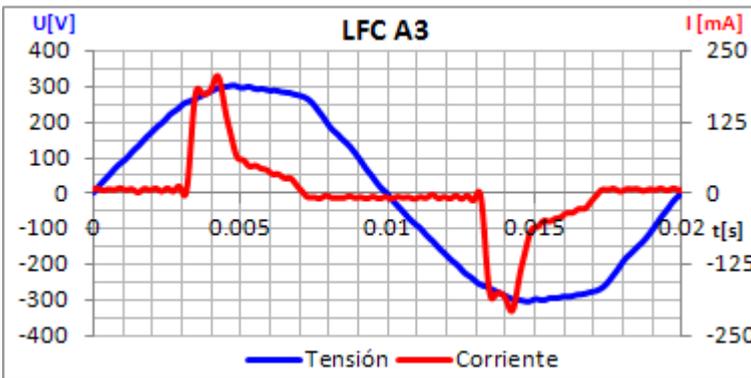
Marca: Alic **Modelo:** Mini 3U

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 511 [lm] **Incandescente equivalente:** 55 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.73	304.40
U1[V]	FCu
219.53	1.39
THDu%	
4.31	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
67.89	207.08
I1[mA]	Fci
47.29	3.05
THDi%	
102.99	
Potencia	
FD	cosφ1
0.70	0.95
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.66	9.90
Q1[VA]	S1[VA]
3.14	10.38
P[W]	S[VA]
9.18	14.92
D[VA]	N[VA]
10.71	14.58
F[VA]	
11.16	

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A3)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.53	-1.55	47.29	16.05	17.61
3	150	6.41	53.57	33.75	-145.19	161.24
5	250	5.65	138.51	21.30	79.86	-58.65
7	350	1.57	-97.85	18.60	-49.13	48.72
9	450	2.37	34.46	14.78	165.09	130.62
11	550	0.93	125.29	8.41	27.58	-97.71
13	650	1.50	171.26	5.32	-92.74	96.00
15	750	1.09	-84.03	2.38	141.48	-134.50
17	850	0.68	-75.70	2.08	118.41	-165.89
19	950	0.23	77.72	3.60	-22.74	-100.47
21	1050	0.19	171.76	3.44	-151.28	36.97
23	1150	0.09	-108.16	4.54	82.88	-168.96
25	1250	0.13	153.43	4.11	-48.63	157.94
27	1350	0.06	-13.46	3.60	-176.83	-163.37
29	1450	0.16	-179.04	2.83	57.41	-123.56
31	1550	0.14	4.32	2.39	-70.63	-74.94
33	1650	0.03	-128.87	1.62	171.25	-59.89
35	1750	0.36	-65.86	1.66	58.01	123.86
37	1850	0.31	-148.81	1.37	-66.65	82.16
39	1950	0.34	-7.40	0.89	-162.17	-154.78
41	2050	0.22	-164.35	0.71	85.14	-110.51
43	2150	0.19	-79.85	0.92	-23.98	55.87
45	2250	0.25	142.05	1.06	-139.28	78.67
47	2350	0.23	-29.11	1.19	94.23	123.34
49	2450	0.14	-12.88	1.44	-30.14	-17.26

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A5)



Características nominales:

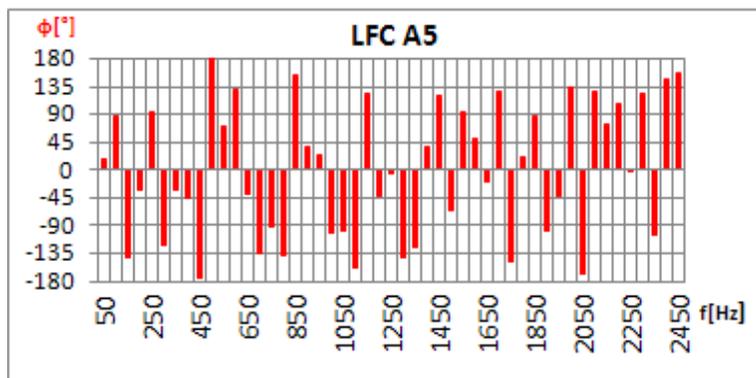
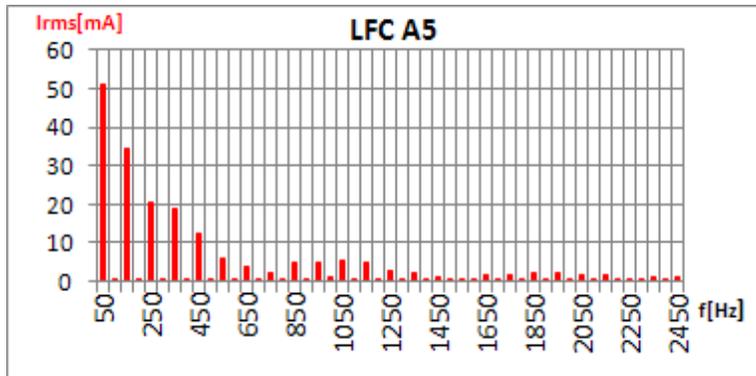
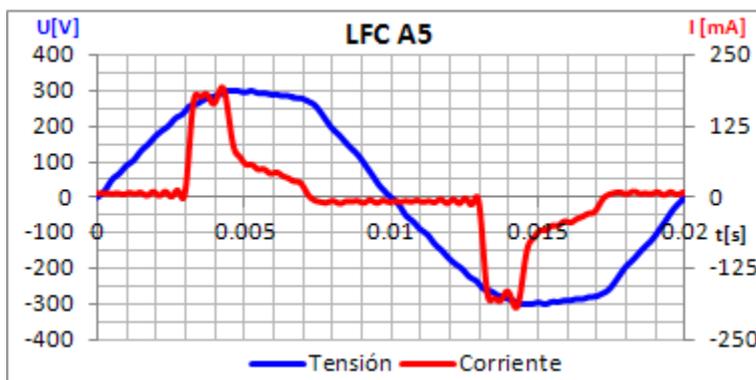
Marca: Alic **Modelo:** Espiral T2

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 622 [lm] **Incandescente equivalente:** 55 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.16	300.59
U1[V]	FCu
218.95	1.37
THDu%	
4.41	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
70.08	193.93
I1[mA]	Fci
51.23	2.77
THDi%	
93.35	
Potencia	
FD	cosφ1
0.73	0.95
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.69	10.64
Q1[VA]	S1[VA]
3.54	11.22
P[W]	S[VA]
12.54	15.36
D[VA]	N[VA]
10.49	14.95
F[VA]	
11.07	

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A5)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	218.95	-1.99	51.23	16.40	18.39
3	150	6.45	49.57	34.16	-141.29	169.14
5	250	5.84	137.85	20.28	94.62	-43.23
7	350	1.77	-89.60	18.95	-32.21	57.39
9	450	1.86	31.66	12.47	-175.07	153.27
11	550	1.48	122.21	5.96	69.44	-52.77
13	650	1.21	174.65	3.64	-40.02	145.34
15	750	1.41	-93.58	2.11	-93.47	0.11
17	850	0.77	-120.82	4.76	154.05	-85.14
19	950	0.22	150.11	5.11	24.65	-125.46
21	1050	0.74	-150.20	5.28	-97.26	52.93
23	1150	0.27	-113.70	4.87	123.30	-123.00
25	1250	0.25	-116.57	3.02	-6.99	109.57
27	1350	0.27	67.05	2.25	-124.04	168.91
29	1450	0.32	-168.73	0.94	120.36	-70.91
31	1550	0.32	130.77	0.66	95.10	-35.68
33	1650	0.30	-93.82	1.91	-17.84	75.98
35	1750	0.32	-125.77	1.68	-148.90	-23.13
37	1850	0.55	141.04	2.20	88.86	-52.17
39	1950	0.42	57.66	1.98	-40.83	-98.49
41	2050	0.09	43.64	1.62	-166.88	149.48
43	2150	0.25	66.58	1.57	75.17	8.58
45	2250	0.25	108.05	0.61	-3.52	-111.57
47	2350	0.47	-25.73	0.90	-103.62	-77.89
49	2450	0.21	147.44	1.04	157.65	10.21

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A7)



Características nominales:

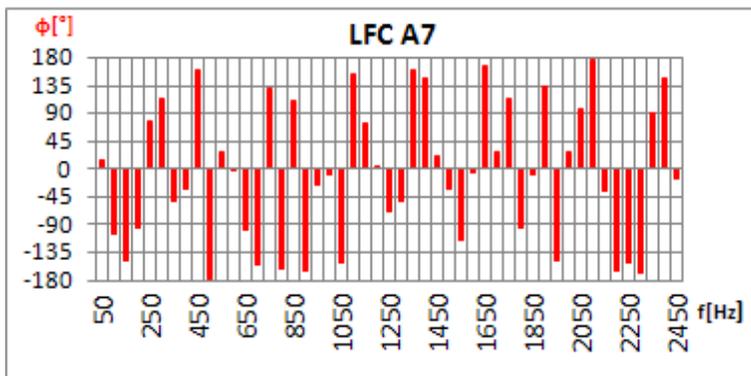
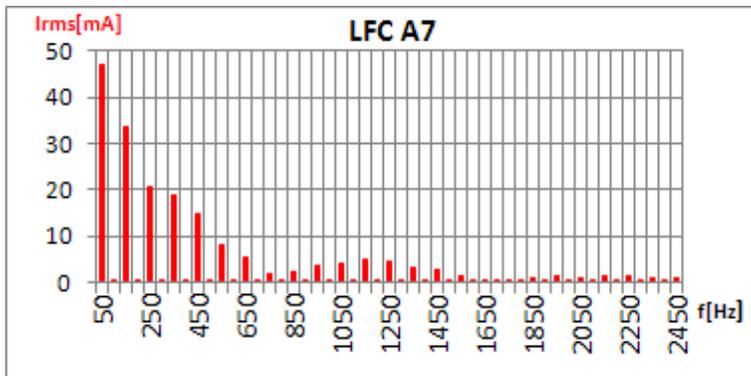
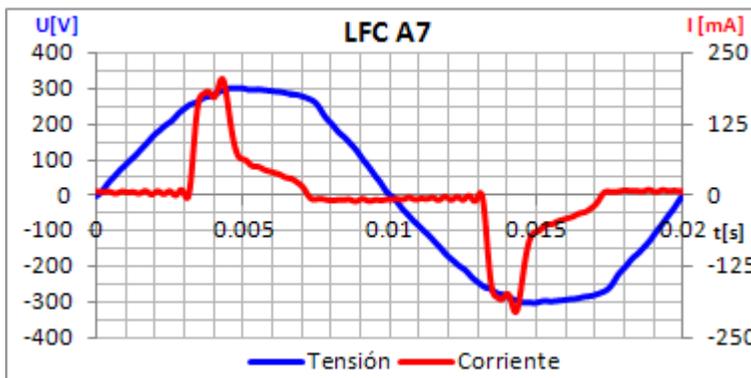
Marca: Alic **Modelo:** Gota

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 302 [lm] **Incandescente equivalente:** 55 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase B

Vida útil a tensión nominal: 8000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.83	302.52
U1[V]	FCu
220.62	1.37
THDu%	
4.38	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
67.58	205.35
I1[mA]	Fci
47.21	3.04
THDi%	
102.42	
Potencia	
FD	cosφ1
0.70	0.95
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.67	9.92
Q1[VA]	S1[VA]
3.19	10.42
P[W]	S[VA]
9.33	14.92
D[VA]	N[VA]
10.69	14.58
F[VA]	
11.15	

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A7)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	220.62	-3.05	47.21	14.79	17.84
3	150	7.19	43.83	33.78	-148.69	167.49
5	250	5.19	131.67	20.61	78.97	-52.70
7	350	1.40	-92.38	18.77	-52.03	40.35
9	450	2.06	26.94	14.64	161.70	134.76
11	550	1.23	109.04	8.06	26.78	-82.26
13	650	1.16	148.20	5.24	-98.28	113.51
15	750	1.37	-92.37	2.06	131.86	-135.78
17	850	0.24	-121.84	2.18	110.94	-127.21
19	950	0.51	97.39	3.66	-24.94	-122.34
21	1050	0.50	119.69	4.05	-151.84	88.47
23	1150	0.24	-107.31	4.80	74.41	-178.28
25	1250	0.18	161.57	4.40	-68.88	129.55
27	1350	0.36	121.64	3.03	159.77	38.13
29	1450	0.18	145.47	2.77	22.70	-122.77
31	1550	0.45	-153.89	1.42	-113.55	40.34
33	1650	0.12	20.11	0.59	167.14	147.03
35	1750	0.17	103.32	0.68	113.41	10.09
37	1850	0.28	146.33	0.91	-7.48	-153.81
39	1950	0.19	-173.13	1.32	-149.82	23.31
41	2050	0.05	-90.28	1.02	98.57	-171.16
43	2150	0.26	112.84	1.30	-34.74	-147.58
45	2250	0.17	38.33	1.26	-150.68	170.99
47	2350	0.31	177.56	1.12	90.25	-87.31
49	2450	0.21	146.97	0.85	-14.55	-161.53

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A9)



Características nominales:

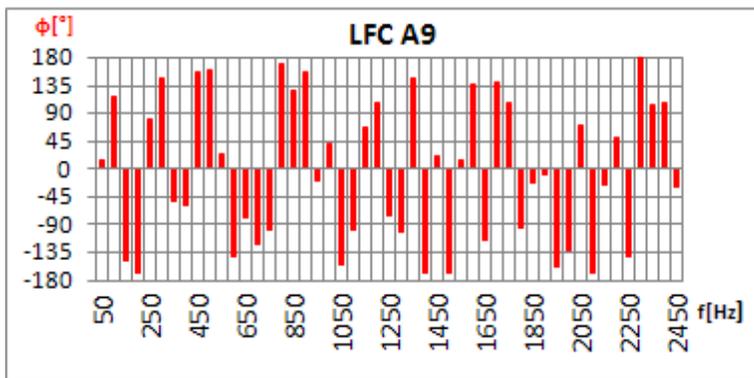
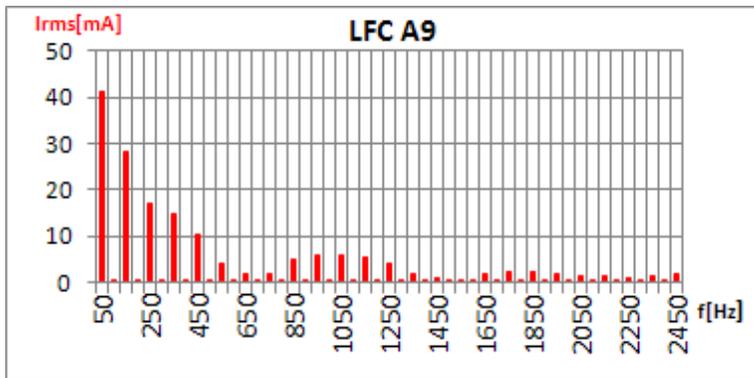
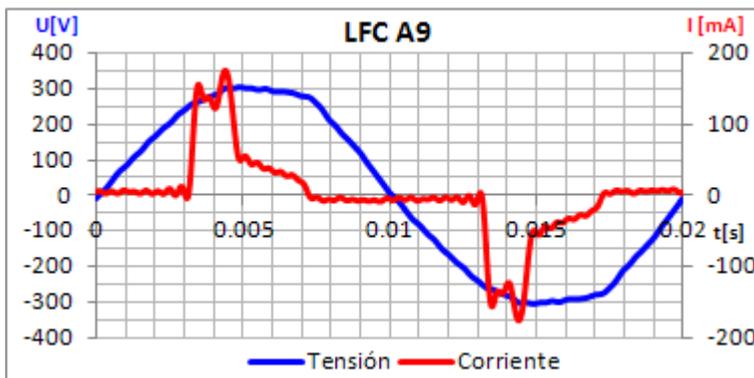
Marca: Alic **Modelo:** AR 111

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: no se indica (Reemplaza a una AR 111 halógena)

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 8000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
221.63	305.22
U1[V]	FCu
221.43	1.38
THDu%	
4.25	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
57.63	176.00
I1[mA]	Fci
41.21	3.05
THDi%	
97.76	
Potencia	
FD	cosφ1
0.72	0.95
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.68	8.68
Q1[VAr]	S1[VA]
2.82	9.12
P[W]	S[VA]
8.64	12.77
D[VA]	N[VA]
8.94	12.46
F[VA]	
9.37	

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC A9)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	221.43	-3.98	41.21	14.02	18.00
3	150	7.14	41.44	28.38	-149.10	169.46
5	250	4.72	124.89	16.94	79.27	-45.62
7	350	1.62	-100.21	14.92	-53.60	46.61
9	450	2.16	13.97	10.47	157.75	143.78
11	550	0.96	123.99	3.88	22.91	-101.08
13	650	1.24	135.17	1.97	-78.69	146.14
15	750	1.08	-98.05	1.84	-97.00	1.05
17	850	0.48	-148.75	5.05	127.38	-83.86
19	950	0.38	76.08	5.78	-18.09	-94.18
21	1050	0.49	143.13	5.82	-154.69	62.18
23	1150	0.14	-144.27	5.49	66.04	-149.69
25	1250	0.34	9.46	4.24	-76.89	-86.35
27	1350	0.61	108.71	2.07	145.87	37.17
29	1450	0.03	44.47	1.05	20.14	-24.32
31	1550	0.45	107.94	0.31	14.76	-93.18
33	1650	0.10	3.79	1.81	-114.11	-117.90
35	1750	0.07	103.14	2.14	108.53	5.40
37	1850	0.34	23.67	2.36	-21.02	-44.70
39	1950	0.35	-67.54	2.01	-158.89	-91.35
41	2050	0.43	160.53	1.61	72.12	-88.42
43	2150	0.24	-106.56	1.37	-25.50	81.06
45	2250	0.28	41.74	1.15	-143.10	175.16
47	2350	0.12	-2.06	1.40	105.32	107.38
49	2450	0.21	101.93	1.69	-30.12	-132.05

Lámpara Fluorescente Compacta de 15 W (LFC A11)



Características nominales:

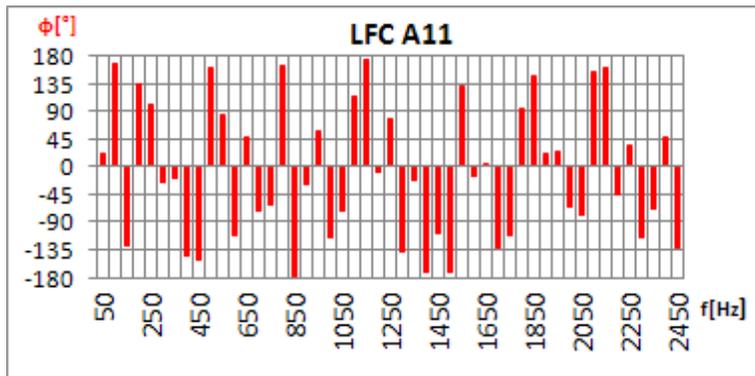
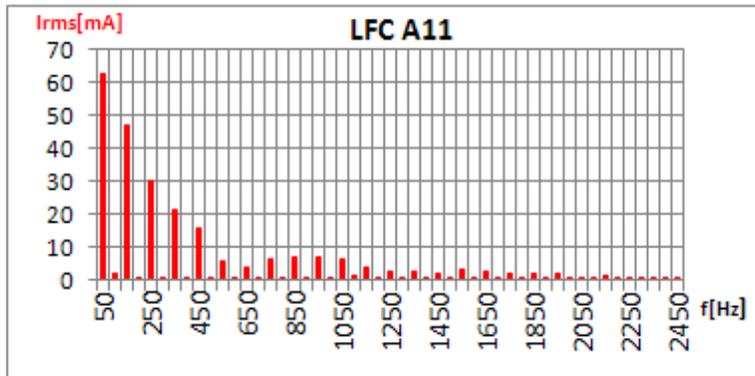
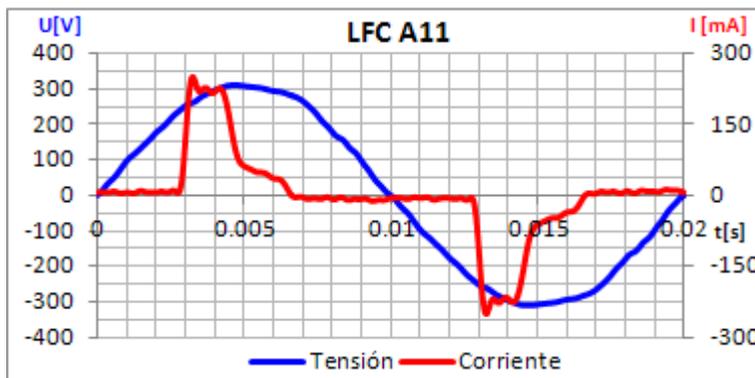
Marca: Alic **Modelo:** Espiral Mini

Potencia: 15 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 614 [lm] **Incandescente equivalente:** 75 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.04	310.21
U1[V]	FCu
219.98	1.41
THDu%	
2.37	
Corriente	
Irms[A]	Imax[A]
89.70	250.27
I1[A]	Fci
62.61	2.79
THDi%	
102.60	
Potencia	
FD	cosφ1
0.70	0.93
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.65	12.81
Q1[VAr]	S1[VA]
5.06	13.77
P[W]	S[VA]
14.06	19.74
D[VA]	N[VA]
14.14	19.08
F[VA]	
15.02	

Lámpara Fluorescente Compacta de 15 W (LFC A11)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.98	-0.64	62.61	20.91	21.55
3	150	2.21	107.15	47.12	-128.80	124.05
5	250	2.74	148.81	30.03	101.09	-47.72
7	350	1.40	-50.93	21.20	-20.28	30.65
9	450	1.62	76.91	15.64	-151.44	131.64
11	550	1.82	-170.91	6.01	84.95	-104.13
13	650	1.62	-165.62	3.88	47.39	-146.99
15	750	0.32	-119.47	6.34	-63.67	55.80
17	850	0.24	-143.59	7.08	-177.76	-34.17
19	950	0.20	154.53	7.14	57.71	-96.82
21	1050	0.28	98.38	6.54	-73.42	-171.80
23	1150	0.44	-23.23	3.88	173.87	-162.90
25	1250	0.28	-90.00	2.60	78.69	168.69
27	1350	0.22	-63.75	2.40	-22.63	41.12
29	1450	0.12	-38.98	2.15	-109.81	-70.83
31	1550	0.24	-171.17	3.29	130.47	-58.36
33	1650	0.08	-169.66	2.67	2.25	171.91
35	1750	0.28	-143.93	2.19	-113.44	30.49
37	1850	0.38	-139.97	2.09	147.12	-72.91
39	1950	0.12	54.15	1.89	25.01	-29.14
41	2050	0.28	41.86	1.00	-78.01	-119.87
43	2150	0.17	137.98	1.19	158.99	21.01
45	2250	0.34	152.51	0.51	33.91	-118.60
47	2350	0.20	-158.89	0.89	-70.23	88.66
49	2450	0.19	-142.44	0.16	-130.73	11.71

Lámpara Fluorescente Compacta de 18 W (LFC A14)



Características nominales:

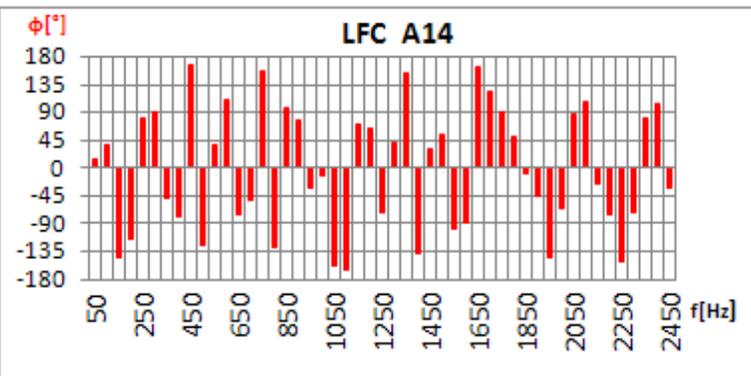
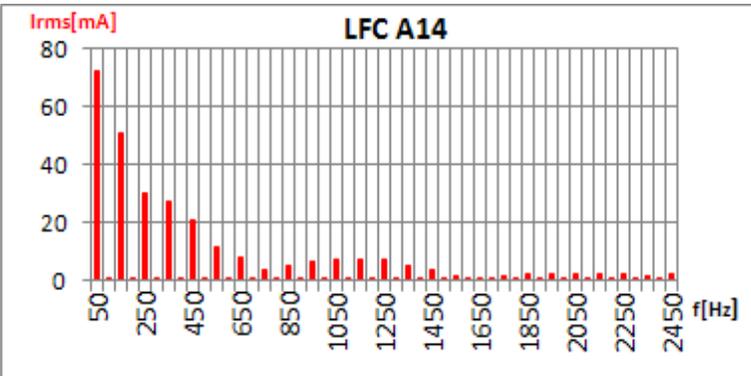
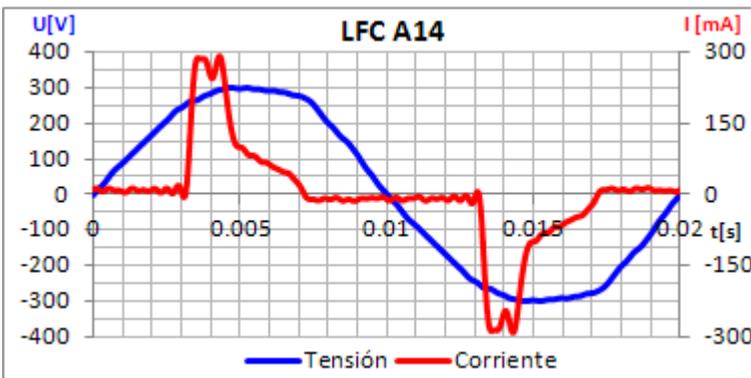
Marca: Alic **Modelo:** Mini 4U

Potencia: 18 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 777 [lm] **Incandescente equivalente:** 90 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 8000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.00	300.81
U1[V]	FCu
219.78	1.37
THDu%	
4.47	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
102.53	291.98
I1[mA]	Fci
72.34	2.85
THDi%	
100.43	
Potencia	
FD	cosφ1
0.71	0.95
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.67	15.17
Q1[VAr]	S1[VA]
4.75	15.90
P[W]	S[VA]
14.38	22.56
D[VA]	N[VA]
16.00	22.05
F[VA]	
16.69	

Lámpara Fluorescente Compacta de 18 W (LFC A14)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.78	-2.75	72.34	14.64	17.39
3	150	7.39	43.97	51.09	-146.71	169.32
5	250	5.42	128.48	30.41	79.87	-48.60
7	350	0.72	-73.51	27.58	-47.48	26.04
9	450	1.98	18.99	21.06	168.58	149.59
11	550	0.85	148.46	11.90	36.64	-111.82
13	650	1.49	168.19	8.23	-75.78	116.03
15	750	0.94	-95.79	3.73	157.44	-106.77
17	850	0.63	-84.13	4.95	97.14	-178.72
19	950	0.33	103.82	6.88	-32.76	-136.58
21	1050	0.34	-172.15	7.21	-158.21	13.94
23	1150	0.10	18.57	7.57	69.23	50.67
25	1250	0.29	101.31	7.01	-72.15	-173.46
27	1350	0.30	106.30	5.40	155.00	48.70
29	1450	0.40	146.02	3.92	30.03	-115.99
31	1550	0.09	40.38	1.70	-98.08	-138.47
33	1650	0.24	-98.71	0.58	162.80	-98.49
35	1750	0.06	24.05	1.20	90.34	66.29
37	1850	0.19	31.41	2.19	-9.69	-41.10
39	1950	0.15	-44.90	2.30	-146.00	-101.10
41	2050	0.39	-147.57	2.49	87.11	-125.32
43	2150	0.25	12.73	2.16	-25.63	-38.36
45	2250	0.22	-91.53	2.14	-152.25	-60.72
47	2350	0.13	-66.18	1.75	79.86	146.03
49	2450	0.24	41.97	1.90	-30.88	-72.84

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC A16)



Características nominales:

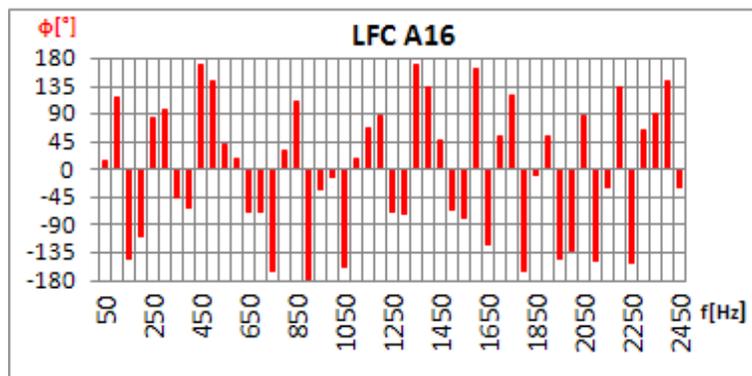
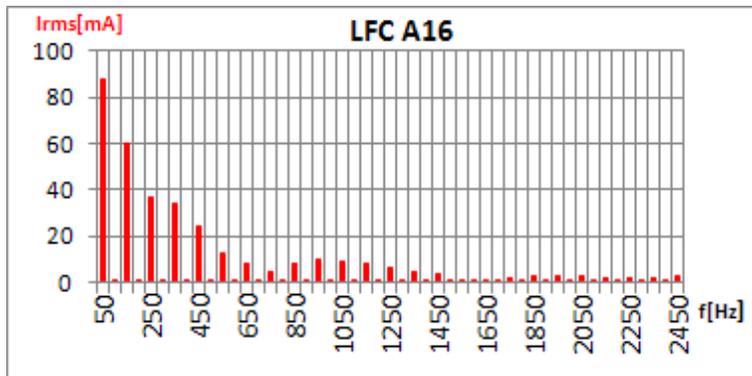
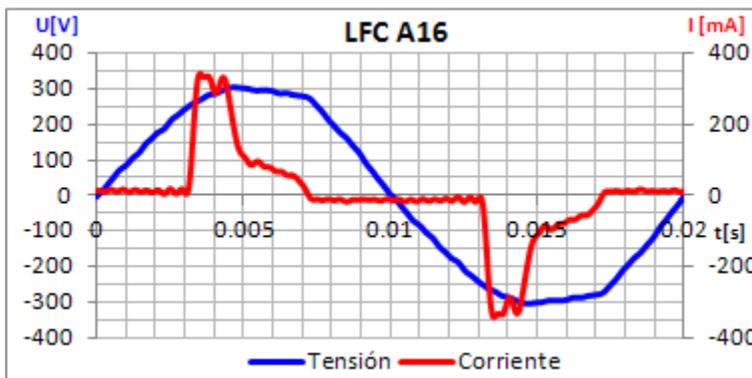
Marca: Alic **Modelo:** Standard 3U

Potencia: 20 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 1152 [lm] **Incandescente equivalente:** 100 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.69	304.56
U1[V]	FCu
220.49	1.38
THDu%	
4.18	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
122.17	342.73
I1[mA]	Fci
87.40	2.81
THDi%	
97.66	
Potencia	
FD	cosφ1
0.72	0.95
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.68	18.27
Q1[VAr]	S1[VA]
6.12	19.27
P[W]	S[VA]
16.83	26.96
D[VA]	N[VA]
18.86	26.26
F[VA]	
19.82	

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC A16)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	220.49	-3.15	87.40	15.37	18.52
3	150	6.53	41.94	59.78	-145.99	172.07
5	250	5.40	123.60	36.45	83.01	-40.59
7	350	1.65	-89.39	33.67	-45.56	43.83
9	450	1.86	27.92	24.18	168.94	141.02
11	550	1.05	126.81	12.20	40.71	-86.11
13	650	0.89	170.69	8.22	-68.51	120.80
15	750	1.42	-82.36	4.20	-165.75	-83.39
17	850	0.18	-28.27	7.94	110.36	138.63
19	950	0.36	-156.73	9.70	-33.50	123.23
21	1050	0.58	125.09	8.67	-159.27	75.64
23	1150	0.25	52.92	8.38	69.00	16.08
25	1250	0.24	45.00	6.57	-67.19	-112.19
27	1350	0.29	136.51	4.27	170.52	34.01
29	1450	0.25	-130.98	3.29	48.45	179.43
31	1550	0.61	80.66	1.41	-78.48	-159.14
33	1650	0.07	43.18	1.40	-121.08	-164.26
35	1750	0.17	-112.18	1.84	121.02	-126.79
37	1850	0.11	78.94	2.71	-8.33	-87.26
39	1950	0.09	-36.00	2.85	-143.44	-107.44
41	2050	0.20	-60.15	2.77	87.42	147.57
43	2150	0.14	-81.14	2.22	-28.73	52.41
45	2250	0.17	176.47	2.06	-151.79	31.74
47	2350	0.48	85.57	2.32	92.36	6.80
49	2450	0.26	95.38	2.37	-30.36	-125.73

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC A26)



Características nominales:

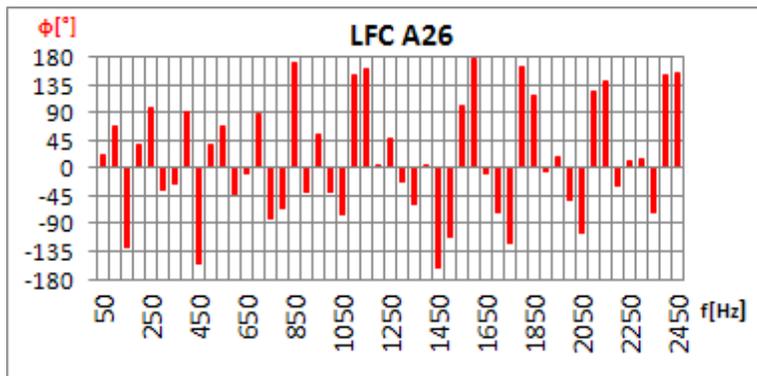
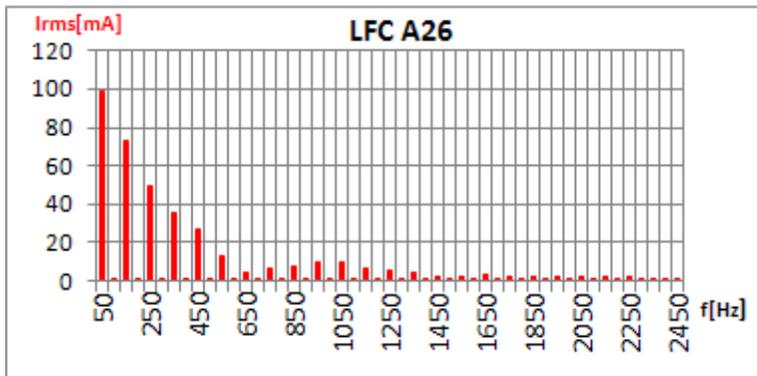
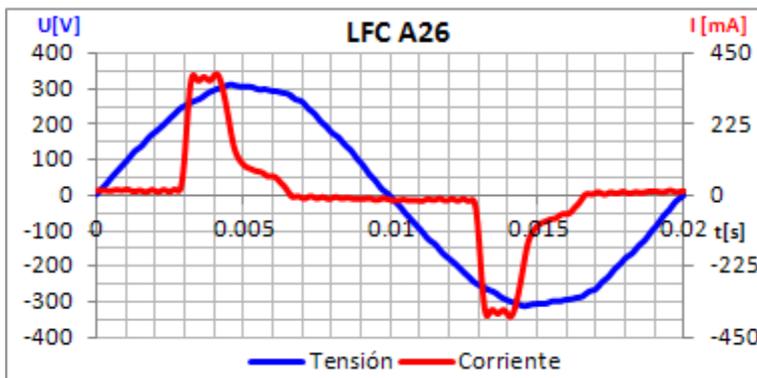
Marca: Alic **Modelo:** Mini 4U

Potencia: 20 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 865 [lm] **Incandescente equivalente:** 100 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.25	312.08
U1[V]	FCu
219.20	1.42
THDu%	
2.22	

Corriente	
Irms[A]	Imax[A]
141.85	384.76
I1[A]	Fci
98.68	384.76
THDi%	
103.26	

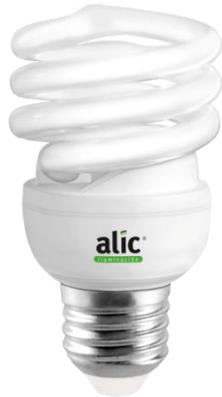
Potencia	
FD	cosφ1
0.70	0.93
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.65	20.20
Q1[VA]	S1[VA]
7.74	21.63
P[W]	S[VA]
20.47	31.10
D[VA]	N[VA]
22.35	30.12
F[VA]	
23.65	

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC A26)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.20	-0.06	98.68	20.91	20.97
3	150	2.47	108.92	72.90	-128.51	122.58
5	250	2.57	155.63	49.04	97.65	-57.99
7	350	1.27	-65.38	35.99	-24.70	40.68
9	450	1.63	93.72	26.68	-155.92	110.36
11	550	1.59	-143.70	13.36	69.21	-147.09
13	650	0.90	-175.76	4.39	-7.76	168.00
15	750	0.41	-28.66	6.97	-80.80	-52.14
17	850	0.31	-88.49	8.03	170.72	-100.79
19	950	0.36	159.08	9.99	55.41	-103.67
21	1050	0.15	158.74	9.47	-76.45	124.81
23	1150	0.35	-32.11	6.79	159.26	-168.63
25	1250	0.32	-135.00	5.08	46.35	-178.65
27	1350	0.04	173.75	4.14	-59.94	126.31
29	1450	0.31	-142.08	2.59	-162.32	-20.25
31	1550	0.43	105.35	2.61	101.49	-3.86
33	1650	0.25	-114.47	3.41	-7.41	107.05
35	1750	0.35	14.87	2.61	-122.49	-137.36
37	1850	0.14	-46.33	2.49	119.00	165.33
39	1950	0.23	-107.97	2.37	16.08	124.05
41	2050	0.13	-126.56	1.83	-105.63	20.93
43	2150	0.09	87.30	2.06	142.23	54.92
45	2250	0.20	-129.04	1.92	10.90	139.93
47	2350	0.36	-50.50	1.42	-70.99	-20.49
49	2450	0.49	23.29	1.66	153.95	130.66

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC A28)



Características nominales:

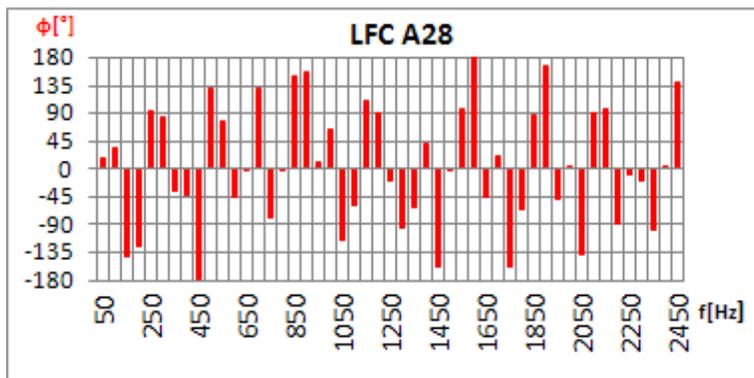
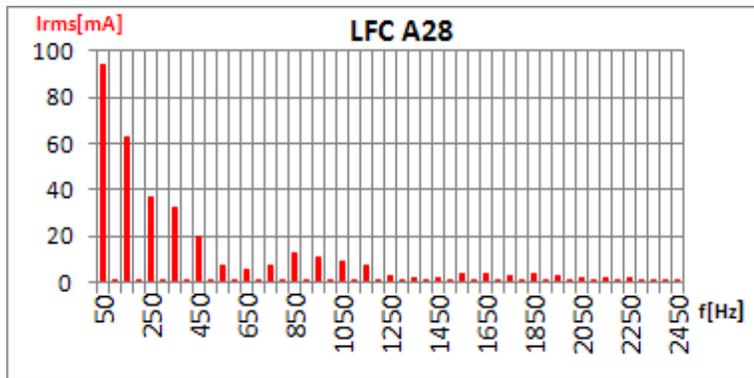
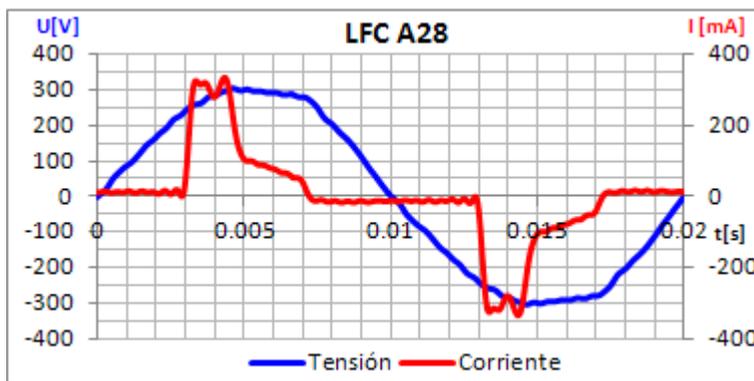
Marca: Alic **Modelo:** Espiral T2

Potencia: 20 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 1060 [lm] **Incandescente equivalente:** 100 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.40	304.24
U1[V]	FCu
219.20	1.39
THDu%	
4.28	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
126.72	334.74
I1[mA]	Fci
93.61	2.64
THDi%	
91.26	
Potencia	
FD	cosφ1
0.74	0.94
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.70	19.35
Q1[VAr]	S1[VA]
6.82	20.52
P[W]	S[VA]
23.94	27.80
D[VA]	N[VA]
18.76	26.95
F[VA]	
19.96	

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC A28)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.20	-3.06	93.61	16.34	19.40
3	150	6.72	47.23	62.31	-141.97	170.80
5	250	5.18	122.86	36.53	93.09	-29.77
7	350	1.24	-77.09	32.58	-35.15	41.94
9	450	2.31	43.90	19.65	-178.25	137.85
11	550	1.11	156.81	6.93	76.51	-80.30
13	650	1.11	-160.15	5.50	-1.83	158.32
15	750	1.24	-64.78	7.42	-78.66	-13.88
17	850	0.19	-90.18	12.26	149.17	-120.65
19	950	0.64	166.52	11.17	9.88	-156.64
21	1050	0.76	-174.95	8.99	-113.51	61.44
23	1150	0.18	116.53	7.41	110.60	-5.94
25	1250	0.62	95.19	3.06	-19.44	-114.63
27	1350	0.48	81.95	1.65	-63.07	-145.02
29	1450	0.64	-149.87	1.86	-157.59	-7.73
31	1550	0.32	74.31	3.53	97.47	23.16
33	1650	0.34	-3.82	3.85	-46.40	-42.58
35	1750	0.40	169.18	3.15	-159.50	31.32
37	1850	0.34	99.07	3.39	85.89	-13.18
39	1950	0.29	86.02	2.46	-48.26	-134.28
41	2050	0.48	-81.70	2.09	-137.63	-55.92
43	2150	0.40	42.55	1.50	96.05	53.50
45	2250	0.12	160.65	1.57	-7.52	-168.17
47	2350	0.20	85.72	1.45	-97.98	176.30
49	2450	0.35	-31.91	1.36	141.64	173.55

Lámpara Fluorescente Compacta de 24 W (LFC A30)



Características nominales:

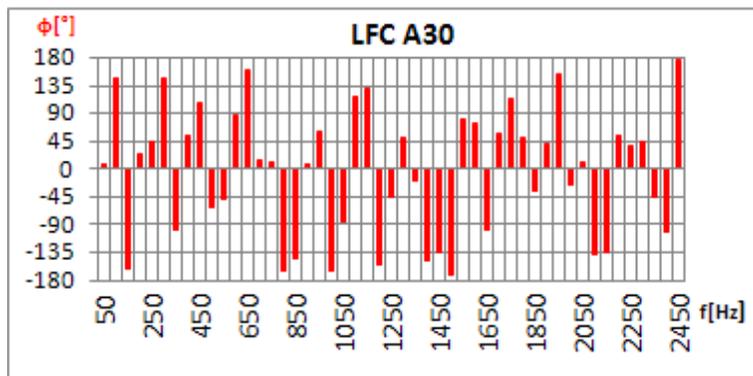
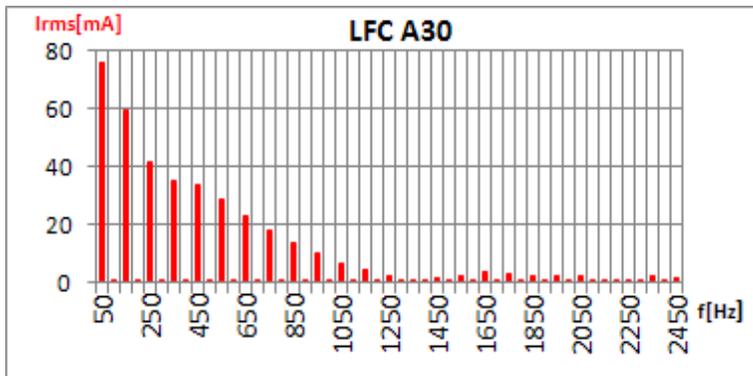
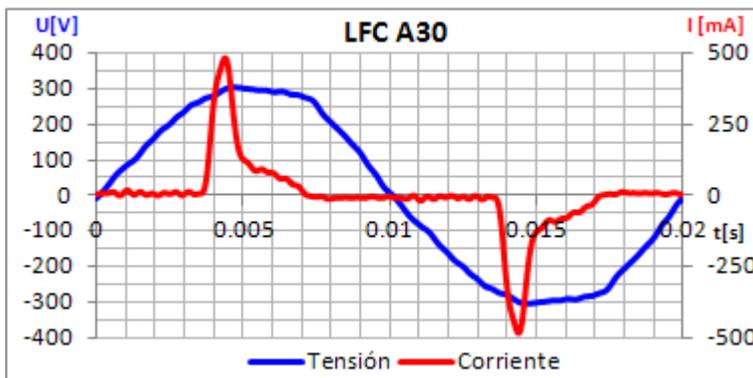
Marca: Alic **Modelo:** Globo

Potencia: 24 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 560 [lm] **Incandescente equivalente:** 120 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase B

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.89	304.25
U1[V]	FCu
219.70	1.38
THDu%	
4.17	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
124.61	484.14
I1[mA]	Fci
75.80	3.89
THDi%	
130.48	
Potencia	
FD	cosφ1
0.61	0.98
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.59	16.25
Q1[VA]	S1[VA]
3.63	16.65
P[W]	S[VA]
15.98	27.40
D[VA]	N[VA]
21.76	27.16
F[VA]	
22.06	

Lámpara Fluorescente Compacta de 24 W (LFC A30)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.70	-3.95	75.80	8.63	12.58
3	150	6.41	47.25	59.73	-163.01	149.74
5	250	5.07	119.67	41.30	42.98	-76.70
7	350	1.02	-87.17	35.50	-98.34	-11.17
9	450	2.51	39.34	33.76	107.72	68.39
11	550	0.94	134.74	28.81	-48.99	176.27
13	650	0.68	166.13	22.84	160.14	-5.99
15	750	1.75	-98.05	18.33	10.07	108.12
17	850	0.50	177.14	14.01	-144.80	38.06
19	950	0.58	127.47	9.94	60.25	-67.22
21	1050	0.93	175.61	6.46	-84.92	99.47
23	1150	0.08	-48.98	4.40	129.67	178.65
25	1250	0.30	68.20	2.40	-45.00	-113.20
27	1350	0.47	93.41	0.25	-18.82	-112.23
29	1450	0.11	-176.57	1.83	-135.78	40.79
31	1550	0.39	176.89	2.01	80.06	-96.83
33	1650	0.22	-112.14	3.31	-98.60	13.54
35	1750	0.44	146.53	2.81	115.60	-30.93
37	1850	0.40	149.00	2.13	-35.03	175.98
39	1950	0.55	-55.85	2.16	152.91	-151.24
41	2050	0.17	-101.24	2.40	9.47	110.71
43	2150	0.09	-152.60	0.78	-136.26	16.34
45	2250	0.12	-43.84	0.98	38.70	82.54
47	2350	0.10	-106.66	2.07	-45.45	61.21
49	2450	0.04	78.71	1.64	178.45	99.73

Lámpara Fluorescente Compacta de 24 W (LFC A32)



Características nominales:

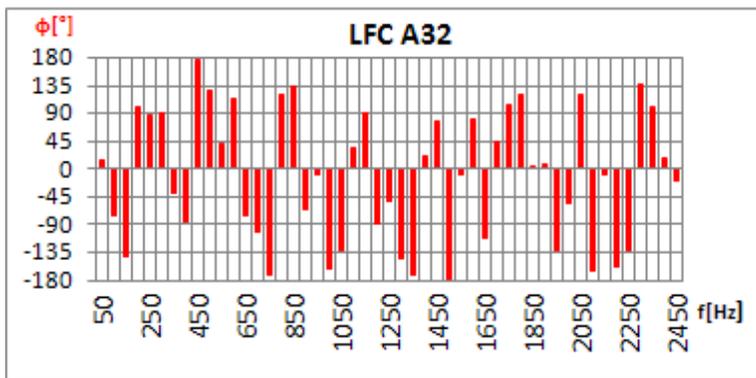
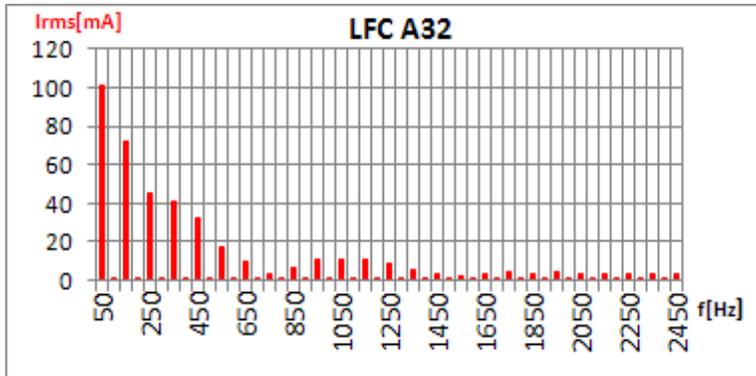
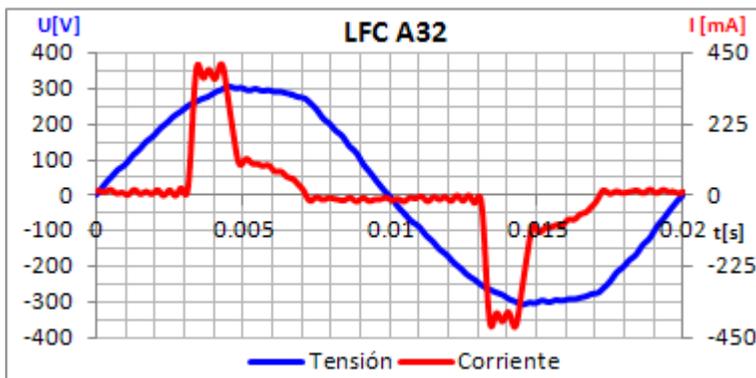
Marca: Alic **Modelo:** PAR 38

Potencia: 24 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: no se indica **PAR 38 halógena equivalente:** 120 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** no se indica

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.09	307.08
U1[V]	FCu
219.91	1.40
THDu%	
4.00	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
145.48	416.46
I1[mA]	Fci
100.71	2.86
THDi%	
104.26	
Potencia	
FD	cosφ1
0.69	0.96
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.66	21.17
Q1[VAr]	S1[VA]
6.50	22.15
P[W]	S[VA]
18.51	32.02
D[VA]	N[VA]
23.12	31.35
F[VA]	
24.02	

Lámpara Fluorescente Compacta de 24 W (LFC A32)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.91	-1.69	100.71	15.39	17.08
3	150	6.53	55.75	71.94	-142.30	161.95
5	250	4.74	130.89	45.61	87.50	-43.39
7	350	1.12	-83.31	40.78	-40.41	42.90
9	450	2.03	62.24	31.99	176.00	113.76
11	550	0.55	-159.32	17.64	39.99	-160.69
13	650	0.78	-178.31	9.43	-74.24	104.06
15	750	1.33	-45.49	2.86	-172.10	-126.61
17	850	0.13	41.17	7.03	132.75	91.58
19	950	0.10	16.63	11.21	-7.35	-23.98
21	1050	0.76	-132.15	10.57	-132.50	-0.35
23	1150	0.19	-53.81	10.60	90.81	144.62
25	1250	0.23	90.00	9.08	-50.56	-140.56
27	1350	0.21	148.11	5.80	-172.95	38.95
29	1450	0.15	172.76	3.80	76.53	-96.23
31	1550	0.12	140.01	2.62	-8.62	-148.63
33	1650	0.11	177.41	3.42	-111.19	71.40
35	1750	0.22	-113.13	4.33	102.75	-144.13
37	1850	0.25	-12.04	3.00	1.34	13.38
39	1950	0.34	-71.44	3.94	-130.57	-59.13
41	2050	0.47	-18.10	3.36	120.70	138.80
43	2150	0.30	-173.56	3.74	-7.52	166.04
45	2250	0.45	91.86	3.74	-131.91	136.23
47	2350	0.47	-177.69	3.88	102.26	-80.05
49	2450	0.13	-55.60	3.66	-17.87	37.73

Lámpara Fluorescente Compacta de 26 W (LFC A34)



Características nominales:

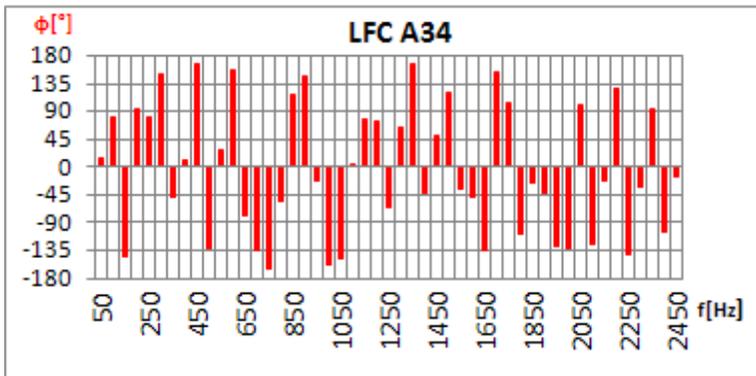
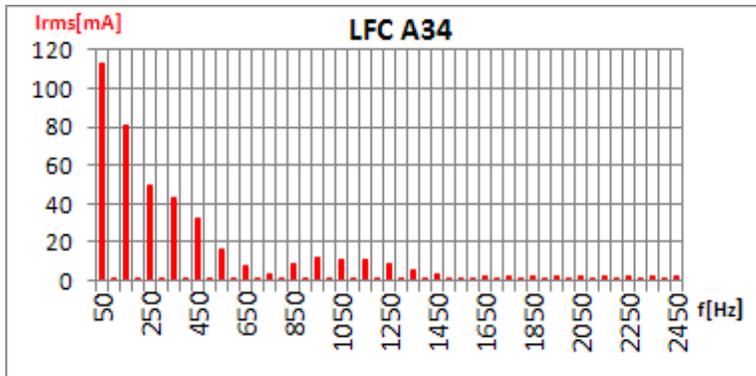
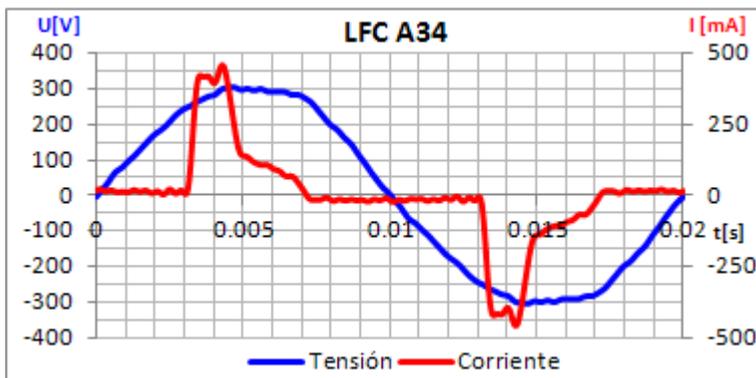
Marca: Alic **Modelo:** Standard 3U

Potencia: 26 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 1277 [lm] **Incandescente equivalente:** 130 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 10000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.03	304.75
U1[V]	FCu
219.84	1.39
THDu%	
4.19	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
159.83	458.45
I1[mA]	Fci
113.15	2.87
THDi%	
99.78	
Potencia	
FD	cosφ1
0.71	0.95
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.67	23.69
Q1[VA]	S1[VA]
7.57	24.87
P[W]	S[VA]
24.38	35.17
D[VA]	N[VA]
24.86	34.34
F[VA]	
25.99	

Lámpara Fluorescente Compacta de 26 W (LFC A34)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.84	-2.52	113.15	15.19	17.72
3	150	6.98	49.51	80.21	-146.13	164.36
5	250	4.56	127.13	49.53	80.07	-47.06
7	350	1.20	-66.23	42.86	-48.86	17.37
9	450	2.12	52.38	32.35	165.91	113.53
11	550	1.09	-176.70	15.95	28.99	-154.31
13	650	1.03	-163.89	8.08	-77.82	86.07
15	750	1.58	-56.46	3.02	-166.61	-110.15
17	850	0.52	-117.39	8.43	117.63	-124.98
19	950	0.24	-168.48	12.38	-22.70	145.78
21	1050	0.90	-179.11	10.34	-149.83	29.29
23	1150	0.39	-4.70	11.34	77.77	82.46
25	1250	0.32	-135.00	9.06	-64.08	70.92
27	1350	0.38	176.95	5.19	166.21	-10.74
29	1450	0.17	68.41	3.25	49.64	-18.77
31	1550	0.36	165.87	1.61	-36.72	157.42
33	1650	0.30	-35.00	2.00	-134.36	-99.36
35	1750	0.23	34.05	2.45	104.96	70.91
37	1850	0.07	34.49	2.70	-25.04	-59.53
39	1950	0.27	34.15	1.88	-128.00	-162.15
41	2050	0.13	-147.73	2.52	99.22	-113.05
43	2150	0.13	20.08	2.79	-20.55	-40.63
45	2250	0.56	-111.12	2.50	-140.64	-29.52
47	2350	0.30	13.31	2.07	92.53	79.23
49	2450	0.19	-120.40	2.50	-14.93	105.48

Lámpara Fluorescente Compacta de 36 W (LFC A36)



Características nominales:

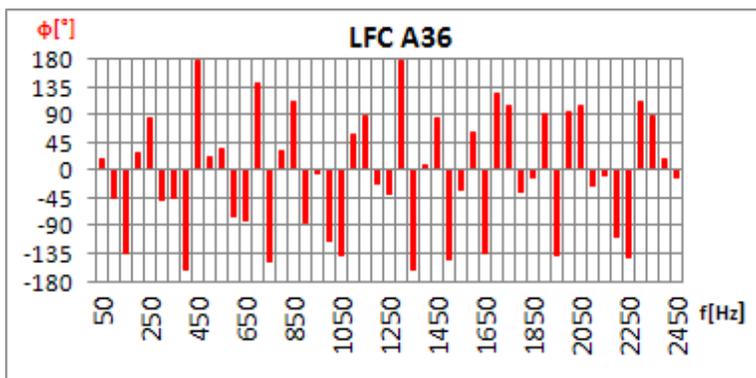
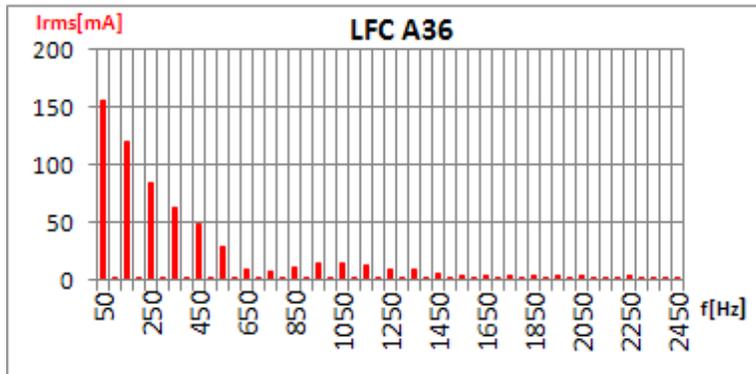
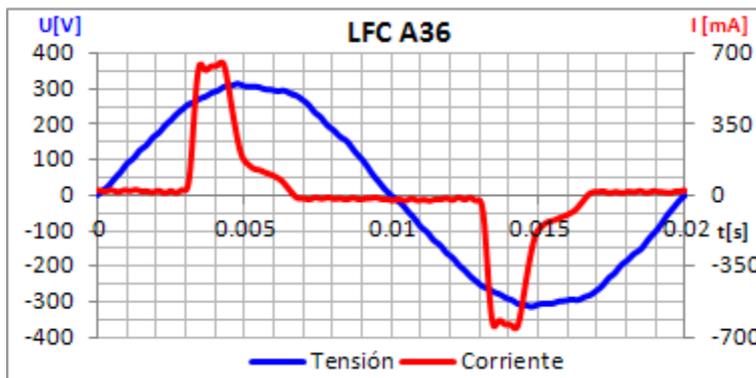
Marca: Alic **Modelo:** Standard 4U

Potencia: 36 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: 2069 [lm] **Incandescente equivalente:** 180 [W]

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** Clase A

Vida útil a tensión nominal: 8000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.12	314.11
U1[V]	FCu
220.05	1.43
THDu%	
2.61	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
232.72	656.91
I1[mA]	Fci
155.73	2.82
THDi%	
111.05	

Potencia	
FD	cosφ1
0.67	0.94
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.63	32.18
Q1[VAr]	S1[VA]
11.79	34.27
P[W]	S[VA]
32.25	51.23
D[VA]	N[VA]
38.08	49.85
F[VA]	
39.86	

Lámpara Fluorescente Compacta de 36 W (LFC A36)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	220.05	-1.54	155.73	18.58	20.12
3	150	2.53	118.16	120.98	-136.40	105.45
5	250	3.20	150.46	83.75	82.55	-67.92
7	350	0.61	-25.81	62.39	-46.43	-20.62
9	450	2.21	83.20	48.45	177.30	94.10
11	550	2.36	-164.14	29.17	35.11	-160.75
13	650	0.86	170.37	9.50	-81.31	108.33
15	750	0.09	-24.79	8.07	-148.49	-123.70
17	850	0.40	165.75	10.72	110.08	-55.67
19	950	0.23	95.96	13.91	-4.57	-100.53
21	1050	0.40	137.02	14.58	-140.07	82.91
23	1150	0.08	-16.43	12.74	87.38	103.81
25	1250	0.25	153.43	9.58	-38.77	167.80
27	1350	0.31	-51.18	8.38	-160.63	-109.45
29	1450	0.28	36.05	5.63	83.83	47.78
31	1550	0.07	72.87	4.45	-31.08	-103.94
33	1650	0.23	95.46	4.26	-134.53	130.02
35	1750	0.10	-34.39	3.83	105.39	139.78
37	1850	0.37	138.94	3.33	-10.99	-149.92
39	1950	0.28	-144.63	3.32	-136.82	7.82
41	2050	0.22	125.08	3.55	102.78	-22.30
43	2150	0.30	-27.46	2.81	-8.44	19.02
45	2250	0.36	16.47	3.08	-143.14	-159.61
47	2350	0.20	9.10	2.18	86.15	77.05
49	2450	0.50	-125.16	2.15	-13.12	112.04

Lámpara Fluorescente Compacta de 22 W (LFC J1)



Características nominales:

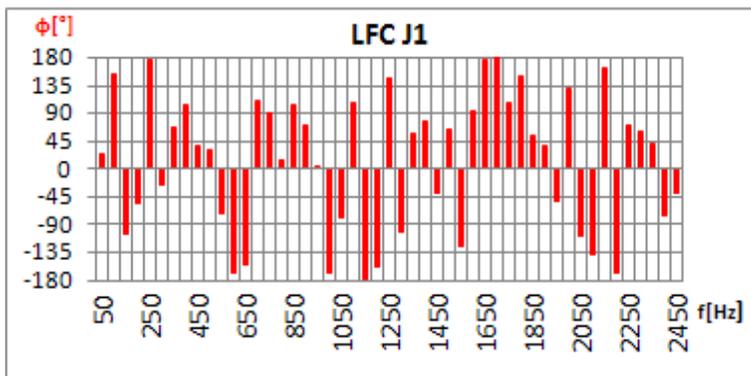
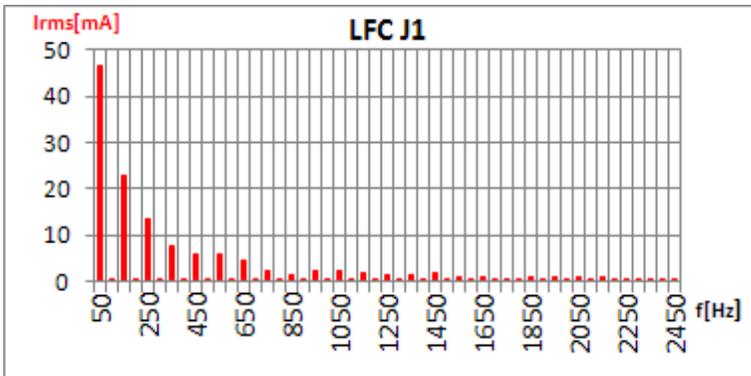
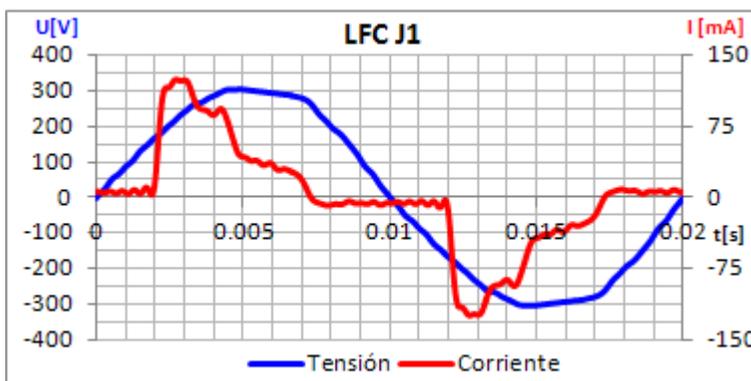
Marca: JL **Modelo:** 3U

Potencia: 22 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: no se indica **Incandescente equivalente:** no se indica

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** no se indica

Vida útil a tensión nominal: no se indica



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.13	304.30
U1[V]	FCu
219.96	1.38
THDu%	
3.93	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
55.04	124.58
I1[mA]	Fci
46.36	2.26
THDi%	
63.98	
Potencia	
FD	cosφ1
0.84	0.88
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.75	9.02
Q1[VAr]	S1[VA]
4.75	10.20
P[W]	S[VA]
8.25	12.12
D[VA]	N[VA]
6.54	11.14
F[VA]	
8.09	

Lámpara Fluorescente Compacta de 22 W (LFC J1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

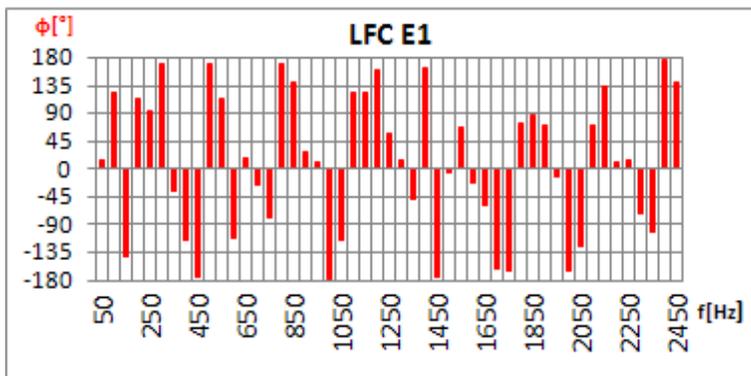
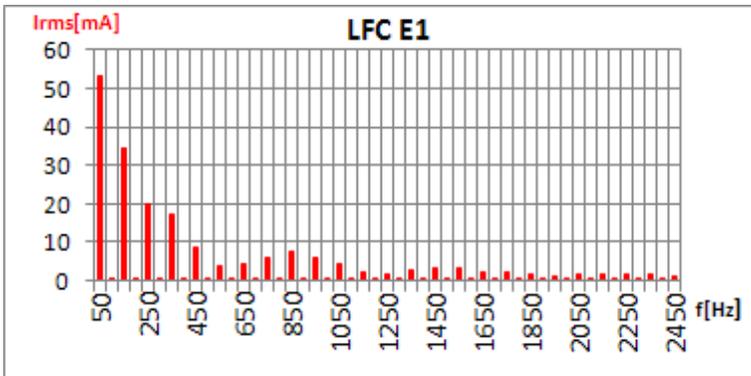
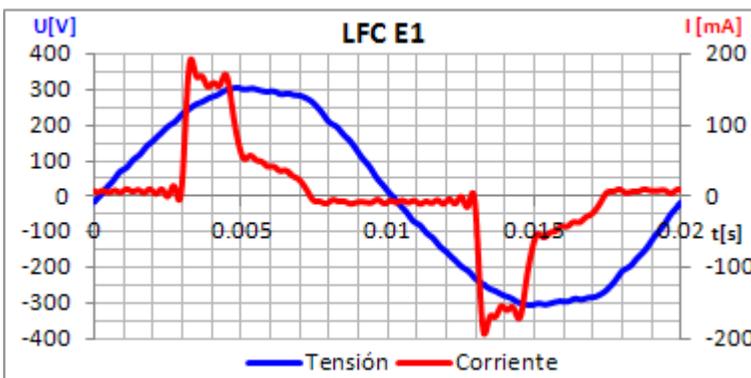
Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.96	-2.89	46.36	24.89	27.78
3	150	6.36	56.91	22.66	-106.26	-163.17
5	250	4.66	118.93	13.45	176.78	57.86
7	350	1.34	-70.16	7.58	69.17	139.33
9	450	1.86	51.91	5.93	37.34	-14.57
11	550	1.37	160.69	5.93	-73.50	125.81
13	650	0.27	-161.87	4.70	-156.29	5.58
15	750	1.57	-37.91	2.38	89.95	127.86
17	850	0.24	14.15	1.47	102.64	88.49
19	950	0.41	104.54	2.18	4.95	-99.59
21	1050	0.39	-145.29	2.19	-79.57	65.72
23	1150	0.27	154.39	1.65	-178.70	26.92
25	1250	0.33	120.96	1.39	146.63	25.67
27	1350	0.30	173.28	1.60	59.18	-114.10
29	1450	0.27	-147.44	1.63	-39.73	107.71
31	1550	0.17	113.69	1.11	-125.49	120.82
33	1650	0.20	-139.62	0.78	177.22	-43.17
35	1750	0.43	-159.21	0.45	108.60	-92.19
37	1850	0.16	-30.67	0.95	53.12	83.79
39	1950	0.13	-9.21	0.82	-51.77	-42.55
41	2050	0.44	57.47	0.88	-110.04	-167.51
43	2150	0.39	24.73	0.80	162.94	138.20
45	2250	0.21	-42.08	0.50	71.24	113.32
47	2350	0.12	-47.08	0.69	40.62	87.70
49	2450	0.11	38.11	0.49	-37.80	-75.90

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC E1)



Características nominales:

Marca: Eurolamp **Modelo:** 3U
Potencia: 20 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.
Flujo lumínico: 860 [lm] **Incandescente equivalente:** no se indica
Color: Luz blanca cálida **Eficiencia energética:** no se indica
Vida útil a tensión nominal: no se indica



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.27	306.40
U1[V]	FCu
220.09	1.39
THDu%	
4.10	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
70.64	193.29
I1[mA]	Fci
52.94	2.74
THDi%	
88.35	

Potencia	
FD	cosφ1
0.75	0.93
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.70	10.84
Q1[VA]	S1[VA]
4.26	11.65
P[W]	S[VA]
9.48	15.56
D[VA]	N[VA]
10.31	14.97
F[VA]	
11.16	

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC E1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	220.09	-5.44	52.94	16.02	21.45
3	150	6.70	47.19	34.23	-142.39	170.42
5	250	4.80	105.12	19.86	93.29	-11.82
7	350	1.05	-107.01	17.02	-35.62	71.39
9	450	1.93	22.13	8.90	-173.98	163.90
11	550	1.30	140.18	3.61	113.31	-26.86
13	650	0.70	-168.59	4.43	18.16	-173.25
15	750	1.32	-93.88	6.08	-80.03	13.85
17	850	0.23	81.47	7.72	141.25	59.78
19	950	0.38	83.78	6.04	11.49	-72.29
21	1050	0.57	150.81	4.45	-115.77	93.43
23	1150	0.23	-174.44	2.24	125.58	-59.97
25	1250	0.18	161.57	1.95	57.46	-104.10
27	1350	0.47	-1.02	2.81	-48.56	-47.54
29	1450	0.28	157.47	3.18	-173.40	29.13
31	1550	0.19	-108.32	3.22	67.60	175.92
33	1650	0.04	77.66	2.21	-57.99	-135.65
35	1750	0.59	-74.60	1.99	-165.49	-90.89
37	1850	0.50	-29.86	1.78	87.00	116.86
39	1950	0.21	163.02	1.28	-12.85	-175.87
41	2050	0.24	111.58	1.86	-124.28	124.14
43	2150	0.09	144.54	1.55	133.28	-11.25
45	2250	0.37	123.98	1.69	15.16	-108.82
47	2350	0.26	6.61	1.78	-101.55	-108.15
49	2450	0.33	28.14	1.38	141.80	113.66

Lámpara Fluorescente Compacta de 13 W (LFC AL1)



Características nominales:

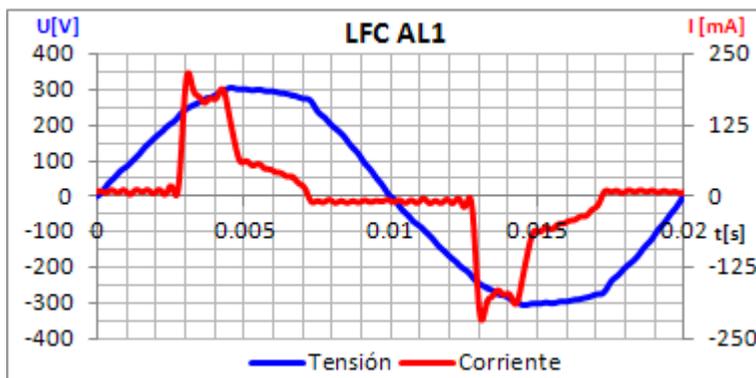
Marca: Alcaluz **Modelo:** XT-2U

Potencia: 13 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: no se indica **Incandescente equivalente:** no se indica

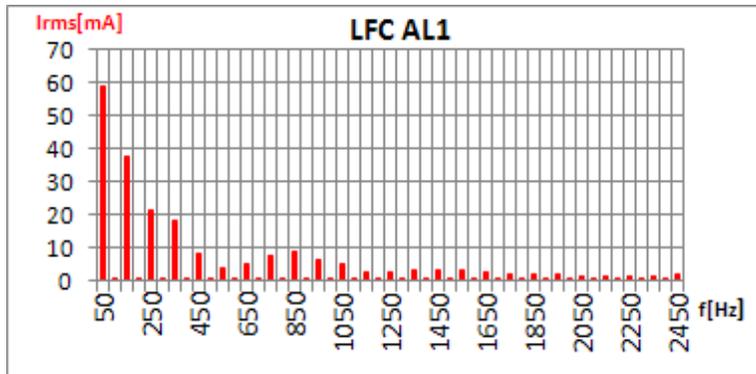
Color: Luz blanca cálida **Eficiencia energética:** no se indica

Vida útil a tensión nominal: no se indica

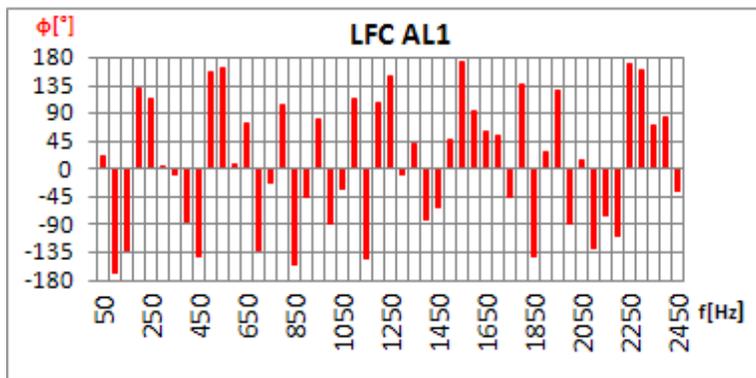


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.92	306.11
U1[V]	FCu
219.75	1.39
THDu%	
3.85	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
77.88	217.63
I1[mA]	Fci
59.12	2.79
THDi%	
85.74	



Potencia	
FD	cosφ1
0.76	0.93
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.70	12.02
Q1[VAr]	S1[VA]
4.93	12.99
P[W]	S[VA]
13.46	17.13
D[VA]	N[VA]
11.16	16.40
F[VA]	
12.20	



Lámpara Fluorescente Compacta de 13 W (LFC AL1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.75	-2.76	59.12	19.53	22.29
3	150	5.99	57.40	37.44	-131.71	170.89
5	250	4.76	123.08	21.20	112.98	-10.10
7	350	0.91	-52.93	18.19	-10.01	42.93
9	450	1.92	45.94	8.43	-142.26	171.81
11	550	0.71	150.67	3.76	165.49	14.82
13	650	0.36	164.57	5.00	75.48	-89.09
15	750	1.62	-42.60	7.69	-22.46	20.14
17	850	0.32	122.52	8.70	-154.71	82.77
19	950	0.50	134.69	6.08	80.62	-54.07
21	1050	0.62	-158.34	4.99	-33.66	124.68
23	1150	0.40	-5.84	2.77	-143.56	-137.72
25	1250	0.36	128.66	2.80	149.04	20.38
27	1350	0.45	116.55	3.22	40.12	-76.42
29	1450	0.36	-59.92	3.37	-62.56	-2.65
31	1550	0.09	145.01	3.26	173.58	28.58
33	1650	0.47	126.80	2.62	60.43	-66.37
35	1750	0.37	-142.97	2.20	-44.88	98.09
37	1850	0.44	-57.67	1.71	-142.43	-84.76
39	1950	0.23	74.06	1.86	125.99	51.93
41	2050	0.18	94.23	1.50	14.97	-79.25
43	2150	0.35	148.86	1.13	-73.82	137.33
45	2250	0.13	-67.61	1.60	172.12	-120.27
47	2350	0.42	131.49	1.51	71.63	-59.86
49	2450	0.32	131.86	1.91	-35.31	-167.17

Lámpara Fluorescente Compacta de 13 W (LFC AL2)



Características nominales:

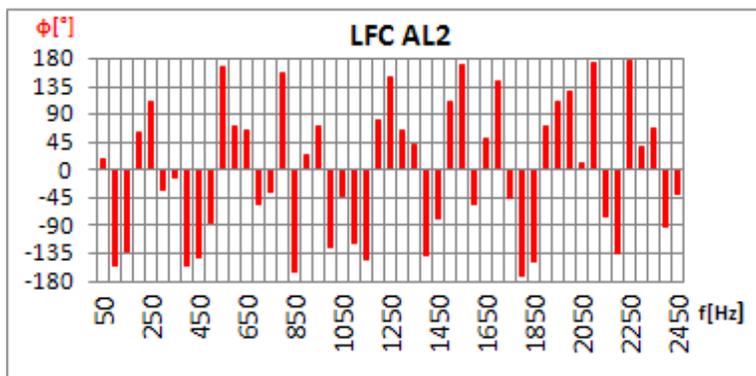
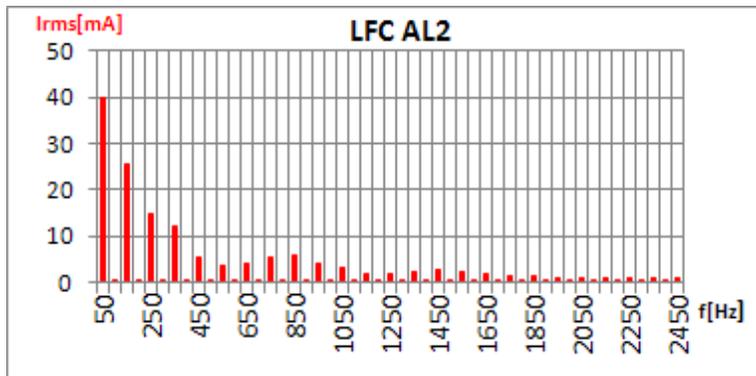
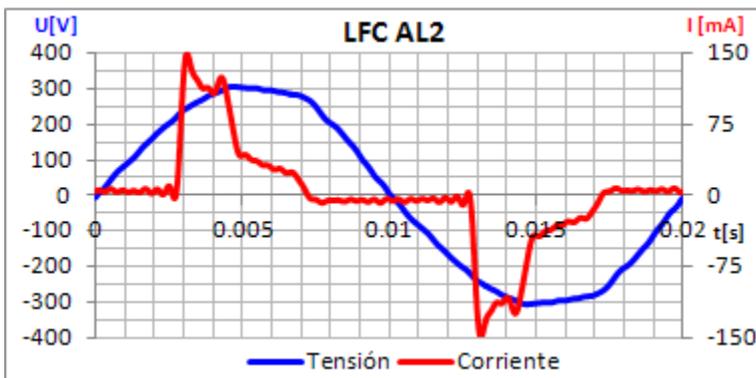
Marca: Alcaluz **Modelo:** XT-2U

Potencia: 13 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: no se indica **Incandescente equivalente:** no se indica

Color: Luz blanca fría **Eficiencia energética:** no se indica

Vida útil a tensión nominal: no se indica



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.40	306.67
U1[V]	FCu
220.24	1.39
THDu%	
3.82	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
52.72	149.30
I1[mA]	Fci
39.70	2.83
THDi%	
87.39	

Potencia	
FD	cosφ1
0.75	0.93
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.70	8.11
Q1[VAr]	S1[VA]
3.27	8.74
P[W]	S[VA]
7.54	11.62
D[VA]	N[VA]
7.65	11.15
F[VA]	
8.32	

Lámpara Fluorescente Compacta de 13 W (LFC AL2)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

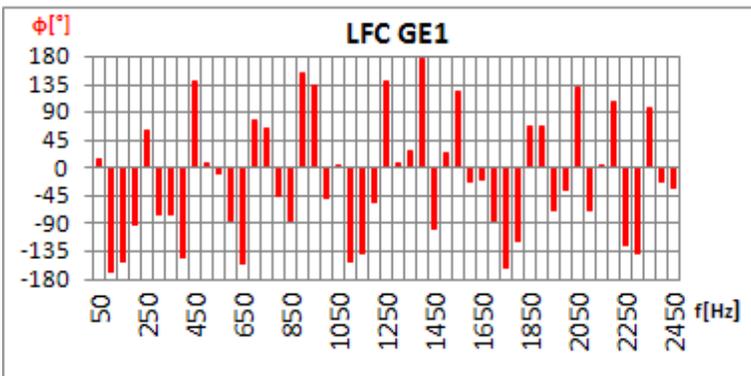
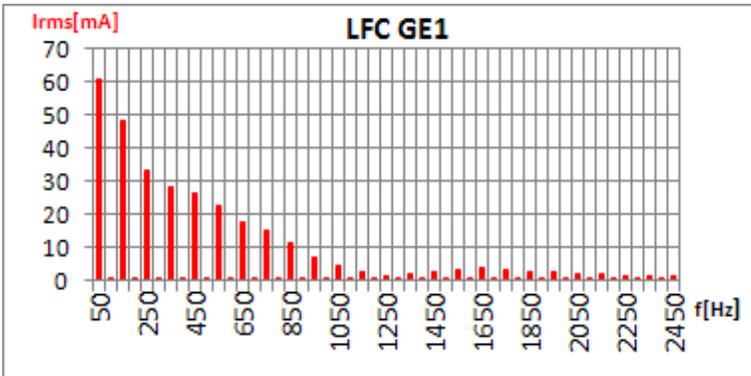
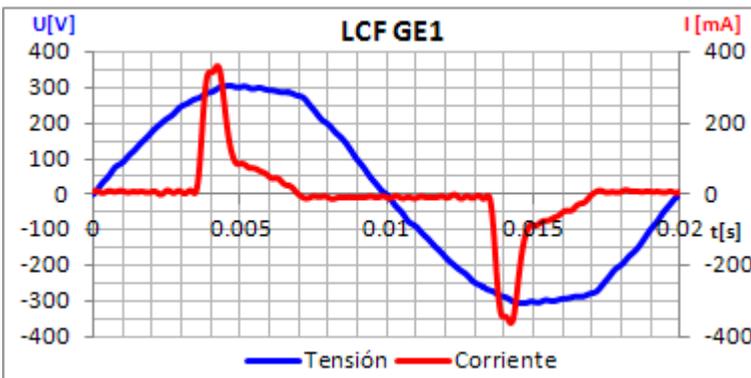
Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	220.24	-3.48	39.70	18.51	21.99
3	150	6.12	53.12	25.36	-132.65	174.23
5	250	4.44	115.07	14.70	112.20	-2.88
7	350	1.19	-93.90	12.29	-10.79	83.11
9	450	1.77	42.30	5.36	-140.31	177.39
11	550	0.85	163.10	3.64	167.97	4.87
13	650	0.71	-134.26	4.04	65.29	-160.45
15	750	1.51	-64.40	5.51	-34.97	29.43
17	850	0.11	69.65	6.08	-164.11	126.24
19	950	0.51	140.10	4.24	72.08	-68.02
21	1050	0.39	174.90	3.17	-42.08	143.02
23	1150	0.38	-55.17	1.76	-143.95	-88.79
25	1250	0.34	90.00	1.82	150.26	60.26
27	1350	0.67	44.11	2.46	39.80	-4.31
29	1450	0.16	106.95	2.57	-78.81	174.24
31	1550	0.18	-92.31	2.46	171.37	-96.31
33	1650	0.11	-40.36	1.71	50.79	91.15
35	1750	0.30	30.34	1.31	-44.37	-74.71
37	1850	0.38	27.84	1.22	-149.66	-177.50
39	1950	0.08	65.20	0.97	109.50	44.30
41	2050	0.35	35.79	0.96	11.33	-24.46
43	2150	0.15	79.25	1.03	-76.80	-156.05
45	2250	0.06	-136.88	0.85	178.09	-45.02
47	2350	0.20	101.34	1.03	68.30	-33.04
49	2450	0.08	147.37	1.15	-38.06	174.56

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC GE1)



Características nominales:

Marca: General Electric **Modelo:** FLE20TBX
Potencia: 20 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.
Flujo lumínico: 880 [lm] **Incandescente equivalente:** 70 [W]
Color: Luz blanca cálida **Eficiencia energética:** Clase B
Vida útil a tensión nominal: 3000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
220.82	306.26
U1[V]	FCu
220.65	1.39
THDu%	
3.99	
Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
99.77	361.69
I1[mA]	Fci
60.93	3.63
THDi%	
129.65	
Potencia	
FD	cosφ1
0.61	0.97
	capacitivo
FP = λ	P1[W]
0.59	12.99
Q1[VA]	S1[VA]
3.45	13.44
P[W]	S[VA]
14.95	22.03
D[VA]	N[VA]
17.45	21.76
F[VA]	
17.79	

Lámpara Fluorescente Compacta de 20 W (LFC GE1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	220.65	-1.53	60.93	13.34	14.87
3	150	6.43	59.53	48.07	-152.74	147.73
5	250	4.66	135.40	33.03	59.48	-75.92
7	350	1.21	-94.25	28.16	-74.98	19.26
9	450	1.80	60.53	26.67	139.44	78.91
11	550	1.10	-169.71	22.65	-10.14	159.57
13	650	1.19	-124.43	17.69	-153.92	-29.49
15	750	1.49	-51.25	14.81	63.80	115.06
17	850	0.43	154.47	11.59	-85.24	120.28
19	950	0.41	164.69	6.91	132.42	-32.26
21	1050	0.41	-135.10	4.44	5.09	140.19
23	1150	0.23	-123.82	2.50	-139.52	-15.70
25	1250	0.34	170.54	1.41	139.90	-30.64
27	1350	0.42	124.28	2.10	27.69	-96.59
29	1450	0.47	-74.08	2.56	-97.86	-23.78
31	1550	0.20	9.54	3.29	122.84	113.30
33	1650	0.27	-12.26	3.85	-18.12	-5.86
35	1750	0.19	74.40	3.19	-163.25	122.35
37	1850	0.26	-75.26	2.46	66.98	142.24
39	1950	0.15	170.85	2.41	-69.03	120.13
41	2050	0.46	-139.04	2.09	130.51	-90.45
43	2150	0.37	-46.28	2.23	3.66	49.94
45	2250	0.45	-169.32	1.57	-125.21	44.11
47	2350	0.28	141.11	1.59	97.87	-43.24
49	2450	0.22	-136.05	1.55	-33.39	102.66

Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC GE9)



Características nominales:

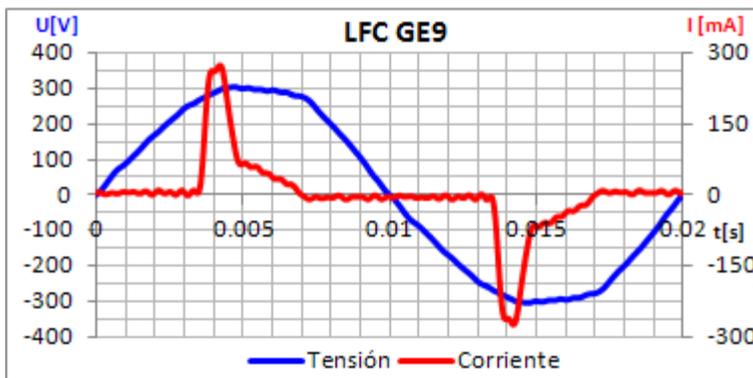
Marca: General Electric **Modelo:** FLE11DBX

Potencia: 11 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 220-240 [V] C.A.

Flujo lumínico: 480 [lm] **Incandescente equivalente:** 40 [W]

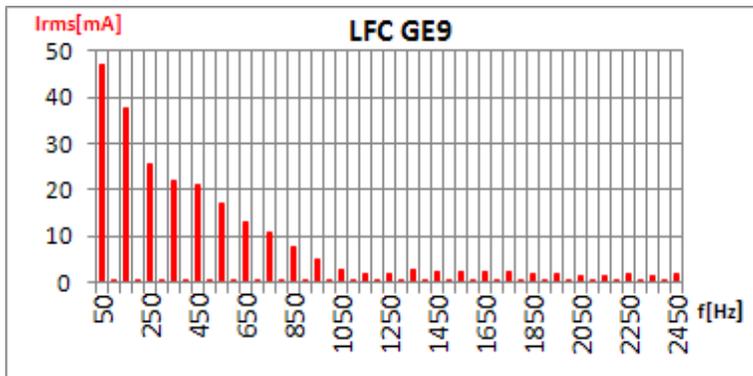
Color: Luz blanca cálida **Eficiencia energética:** Clase B

Vida útil a tensión nominal: 3000 horas

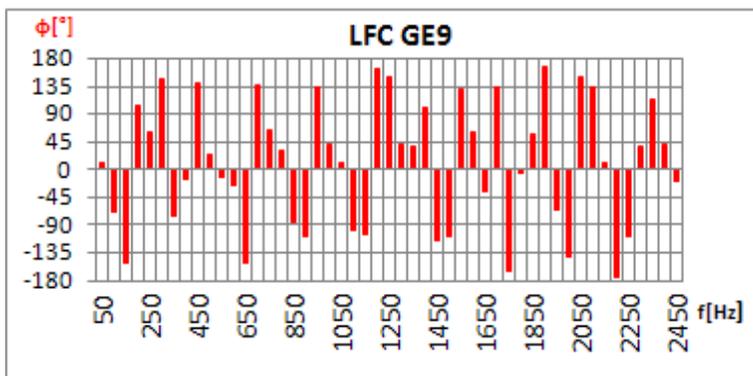


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
219.97	305.17
U1[V]	FCu
219.80	1.39
THDu%	
3.94	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
77.07	274.41
I1[mA]	Fci
47.12	3.56
THDi%	
129.41	



Potencia	
FD	cosφ1
0.61	0.97
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.59	10.01
Q1[VAr]	S1[VA]
2.67	10.36
P[W]	S[VA]
9.31	16.95
D[VA]	N[VA]
13.42	16.74
F[VA]	
13.68	



Lámpara Fluorescente Compacta de 11 W (LFC GE9)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	219.80	-2.24	47.12	12.69	14.93
3	150	6.35	57.99	37.58	-152.17	149.85
5	250	4.81	124.93	25.74	59.57	-65.36
7	350	1.51	-70.73	21.80	-76.39	-5.66
9	450	1.73	47.27	20.92	139.32	92.06
11	550	0.48	161.22	16.91	-10.67	-171.89
13	650	0.68	-172.18	13.20	-152.53	19.64
15	750	1.13	-64.52	11.00	65.67	130.19
17	850	0.35	-128.56	7.81	-86.20	42.36
19	950	0.68	173.17	4.84	134.55	-38.61
21	1050	0.64	-140.94	2.95	12.47	153.41
23	1150	0.12	14.53	1.98	-106.67	-121.20
25	1250	0.40	135.00	1.67	151.70	16.70
27	1350	0.24	121.42	2.58	38.93	-82.50
29	1450	0.20	-127.52	2.24	-115.18	12.34
31	1550	0.23	107.94	2.39	129.05	21.11
33	1650	0.42	106.52	2.25	-33.90	-140.41
35	1750	0.15	11.98	2.34	-164.25	-176.23
37	1850	0.09	152.76	1.85	56.31	-96.45
39	1950	0.19	156.73	1.91	-66.81	136.46
41	2050	0.21	-103.15	1.37	151.62	-105.23
43	2150	0.12	77.54	1.31	9.49	-68.05
45	2250	0.31	-156.09	1.63	-108.60	47.49
47	2350	0.21	17.42	1.52	114.19	96.77
49	2450	0.25	-175.83	1.97	-20.35	155.48

Lámpara LED de 12 W (LED A1)



Características nominales:

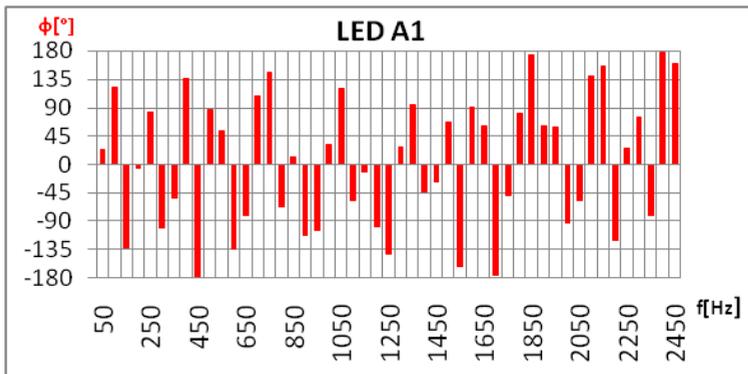
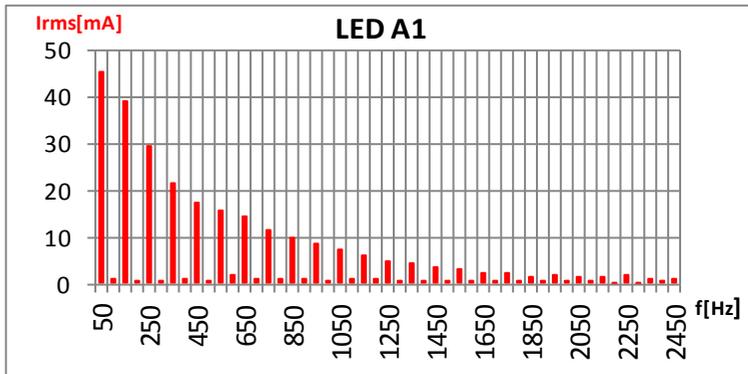
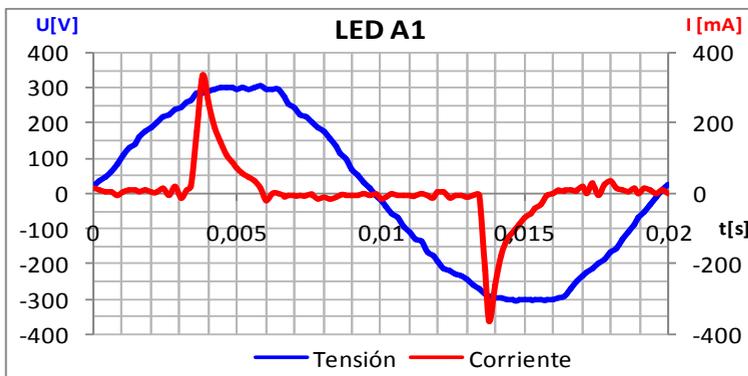
Marca: Alic **Modelo:** R63 - Alto Flujo Lumínico – 6 LED

Potencia: 12 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 230 [V] C.A

Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto

Color: Luz cálida **Tcolor:** 3000 [°K] **Haz de luz:** 45°

Vida útil a tensión nominal: 30.000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
216.72	304.00
U1[V]	FCu
216.56	1.40
THDu%	
3.18	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
79.78	376.00
I1[mA]	Fci
45.47	4.71
THDi%	
140.52	

Potencia	
FD	cosφ1
0.57	0.95
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.54	9.32
Q1[VAr]	S1[VA]
3.18	9.85
P[W]	S[VA]
9.6	17.29
D[VAd]	N[Van]
14.21	16.99
F[VAf]	
14.56	

Lámpara LED de 12 W (LED A1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Fundamental y Armónicos impares						
n°	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	216.56	4.32	45.47	23.17	-18.84
3	150	4.91	113.38	39.06	-131.94	-114.68
5	250	2.13	-146.40	29.51	82.43	131.17
7	350	0.58	114.70	21.61	-52.41	167.11
9	450	3.39	-164.00	17.22	-178.14	14.14
11	550	1.25	-29.23	15.49	52.95	-82.18
13	650	0.83	61.56	14.22	-80.79	142.35
15	750	1.09	177.78	11.32	145.83	31.96
17	850	0.14	-150.42	9.64	12.14	-162.56
19	950	0.38	91.78	8.45	-105.15	-163.08
21	1050	0.39	151.17	7.30	120.40	30.77
23	1150	0.10	-151.55	6.11	-12.39	-139.16
25	1250	0.16	128.86	4.70	-140.99	-90.15
27	1350	0.07	-92.27	4.47	93.61	174.12
29	1450	0.17	-69.10	3.61	-28.13	-40.97
31	1550	0.10	-143.82	2.87	-161.05	17.23
33	1650	0.19	-147.93	2.27	60.43	151.64
35	1750	0.12	-94.97	2.17	-49.23	-45.74
37	1850	0.07	-155.68	1.41	172.48	31.85
39	1950	0.04	-26.88	1.58	58.50	-85.38
41	2050	0.04	-137.79	1.38	-57.90	-79.89
43	2150	0.07	-177.63	1.29	156.10	26.27
45	2250	0.05	-160.99	1.70	25.39	173.62
47	2350	0.16	-86.02	0.76	-80.45	-5.57
49	2450	0.17	-164.56	0.93	160.24	35.20

Lámpara LED de 8 W (LED A11)



Características nominales:

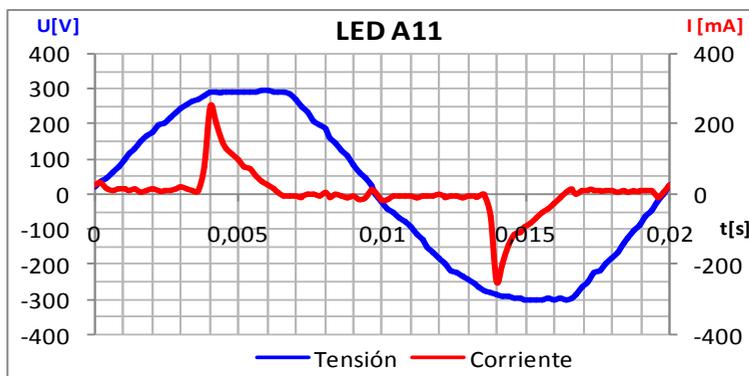
Marca: Alic **Modelo:** R63 - Alto Flujo Lumínico – 6 LED

Potencia: 8 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 230 [V] C.A.

Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto

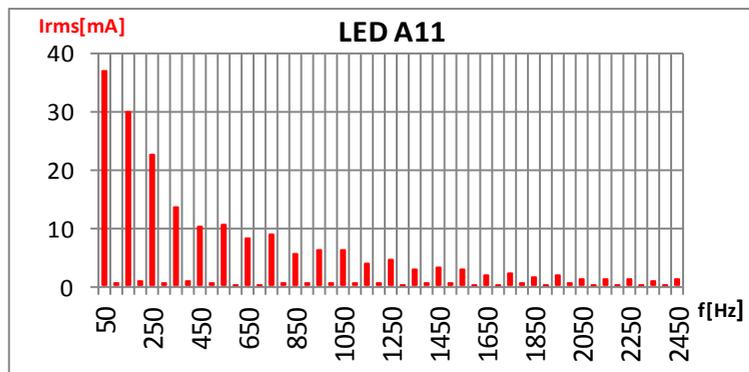
Color: Luz cálida **Tcolor:** 3000 [°K] **Haz de luz:** 45°

Vida útil a tensión nominal: 30.000 horas

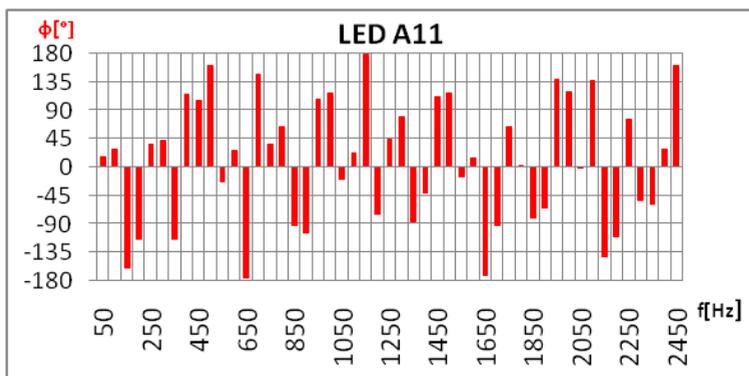


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
216.74	300.00
U1[V]	FCu
216.50	1.38
THDu%	
4.48	

Corriente	
Irms[mA]	I _{max} [mA]
59.57	248.00
I1[mA]	Fci
37.09	4.16
THDi%	
124.59	



Potencia	
FD	cosφ1
0.62	0.96
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.60	7.71
Q1[VAr]	S1[VA]
2.23	8.03
P[W]	S[VA]
7.8	12.91
D[VAd]	N[Van]
10.11	12.72
F[VAf]	
10.35	



Lámpara LED de 8 W (LED A11)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Fundamental y Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	216.50	-0.21	37.09	15.93	-16.14
3	150	7.68	79.54	29.89	-159.56	-120.90
5	250	4.53	173.68	22.60	37.05	136.63
7	350	1.99	-10.83	13.68	-113.00	102.17
9	450	2.59	99.51	10.08	105.52	-6.01
11	550	0.73	162.06	10.56	-23.87	-174.07
13	650	0.69	-72.55	8.02	-176.06	103.51
15	750	0.85	82.26	8.73	37.04	45.22
17	850	0.41	124.51	5.63	-92.18	-143.31
19	950	0.19	-28.46	6.16	107.93	-136.39
21	1050	0.47	17.18	6.29	-18.66	35.84
23	1150	0.19	42.86	3.77	178.63	-135.78
25	1250	0.20	92.11	4.50	43.79	48.32
27	1350	0.11	49.40	2.71	-85.72	135.12
29	1450	0.06	-145.32	3.06	112.41	102.27
31	1550	0.14	110.09	2.85	-14.91	125.00
33	1650	0.22	138.70	1.77	-172.11	-49.19
35	1750	0.09	61.41	2.16	64.61	-3.20
37	1850	0.07	-29.22	1.58	-79.71	50.49
39	1950	0.06	-171.65	1.77	138.47	49.88
41	2050	0.11	-72.13	1.23	1.17	-73.30
43	2150	0.05	-39.00	1.10	-140.70	101.69
45	2250	0.09	-28.45	1.18	74.90	-103.35
47	2350	0.04	-151.69	0.82	-59.35	-92.34
49	2450	0.13	-123.72	0.95	161.35	74.93

Lámpara LED de 7 W (LED A13)



Características nominales:

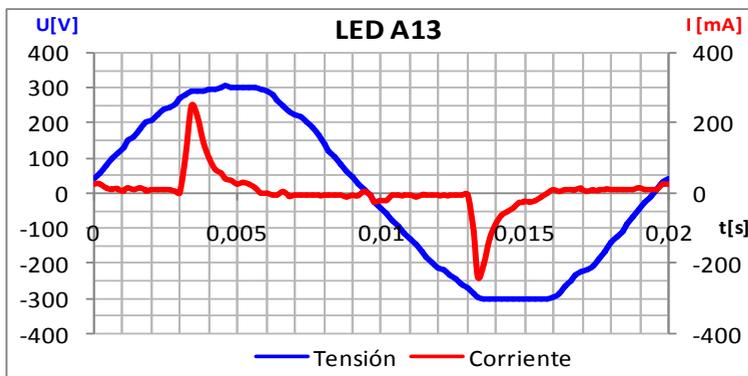
Marca: Alic **Modelo:** A60 - Alto Flujo Lumínico – 16 LED

Potencia: 7 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 230 [V] C.A.

Flujo lumínico: 430 [lm]

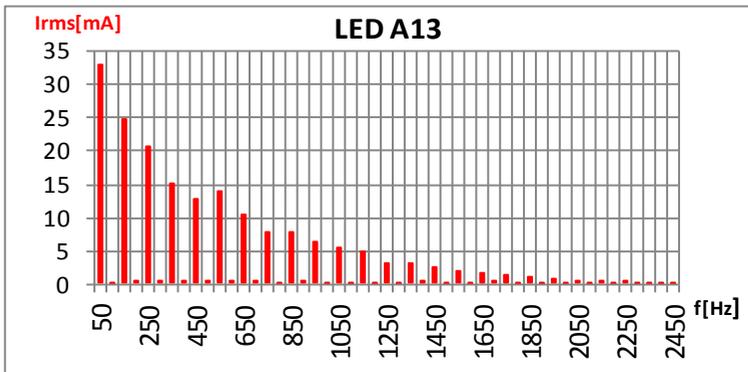
Color: Luz blanca fría **Tcolor:** 6700 [°K] **Haz de luz:** amplio

Vida útil a tensión nominal: 20.000 horas

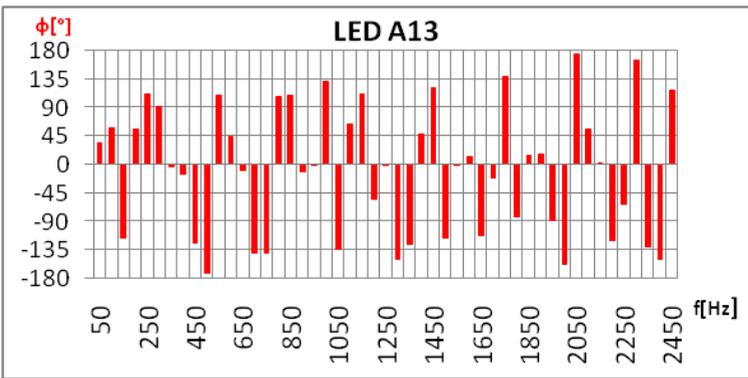


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
217.34	304.00
U1[V]	FCu
217.25	1.40
THDu%	
2.84	

Corriente	
Irms[ma]	Imax[ma]
55.33	252.00
I1[ma]	Fci
32.86	4.55
THDi%	
134.83	



Potencia	
FD	cosφ1
0.59	0.90
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.53	6.42
Q1[VAr]	S1[VA]
3.13	7.14
P[W]	S[VA]
6.9	12.03
D[VAd]	N[Van]
9.68	11.61
F[VArf]	
10.17	



Lámpara LED de 7 W (LED A13)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Fundamental y Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	217.25	7.94	32.86	33.97	-26.03
3	150	3.51	127.60	24.71	-116.83	-115.57
5	250	2.94	-152.26	20.47	110.98	96.76
7	350	0.49	91.75	15.11	-3.16	94.91
9	450	2.70	-113.63	12.70	-124.41	10.78
11	550	1.63	66.86	13.95	110.29	-43.43
13	650	1.28	145.68	10.42	-8.50	154.18
15	750	1.86	-106.87	7.73	-139.44	32.57
17	850	0.29	48.48	7.76	109.24	-60.76
19	950	0.52	119.44	6.17	0.58	118.86
21	1050	0.22	-144.89	5.20	-133.80	-11.09
23	1150	0.22	163.85	4.77	111.88	51.97
25	1250	0.01	-160.34	3.09	-0.30	-160.04
27	1350	0.11	46.87	2.93	-126.47	173.34
29	1450	0.04	65.07	2.44	121.10	-56.02
31	1550	0.09	-101.69	1.74	-0.06	-101.63
33	1650	0.13	51.42	1.48	-112.77	164.19
35	1750	0.14	123.88	1.06	139.30	-15.42
37	1850	0.20	-18.11	0.99	14.45	-32.55
39	1950	0.09	153.18	0.65	-89.24	-117.58
41	2050	0.04	8.87	0.40	175.27	-166.40
43	2150	0.03	-125.94	0.30	3.45	-129.38
45	2250	0.05	-154.96	0.32	-61.89	-93.07
47	2350	0.07	-102.14	0.03	-129.18	27.04
49	2450	0.11	-13.83	0.07	117.17	-131.00

Lámpara LED de 4 W (LED A15)



Características nominales:

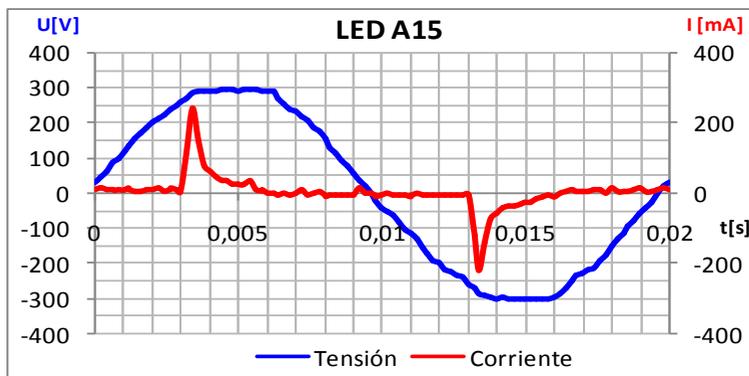
Marca: Alic **Modelo:** JDR - Alto Flujo Lumínico – 4 LED

Potencia: 4 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 230 [V] C.A.

Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto

Color: Luz blanca fría **Tcolor:** 6700 [°K] **Haz de luz:** 38°

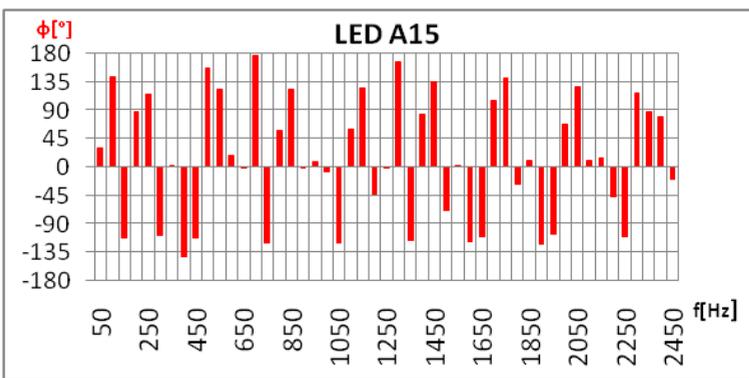
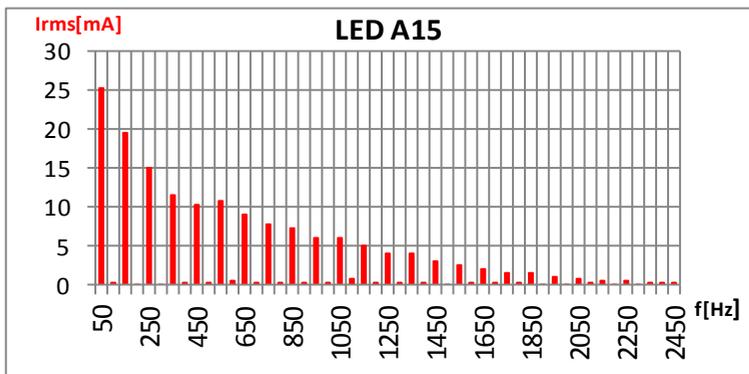
Vida útil a tensión nominal: 20.000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
215.55	300.00
U1[V]	FCu
215.47	1.39
THDu%	
2.68	

Corriente	
Irms[ma]	Imax[ma]
44.53	240.00
I1[ma]	Fci
25.23	5.39
THDi%	
144.25	

Potencia	
FD	cosφ1
0.57	0.91
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.51	4.94
Q1[VAr]	S1[VA]
2.28	5.44
P[W]	S[VA]
5.0	9.60
D[VAd]	N[Van]
7.91	9.32
F[Vaf]	
8.23	



Lámpara LED de 4 W (LED A15)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Fundamental y Armónicos impares						
n ^o	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	215.47	5.77	25.23	30.52	-24.76
3	150	3.39	118.79	19.55	-112.55	-128.66
5	250	2.85	-157.64	15.03	115.78	86.58
7	350	0.45	59.20	11.62	1.92	57.27
9	450	2.57	-141.97	10.23	-112.55	-29.42
11	550	1.39	40.30	10.75	123.30	-83.00
13	650	0.94	117.35	9.15	1.16	116.19
15	750	1.40	-133.18	7.90	-120.20	-12.98
17	850	0.40	33.70	7.27	123.09	-89.39
19	950	0.37	115.53	6.14	7.99	107.53
21	1050	0.32	178.46	6.14	-119.29	-62.26
23	1150	0.34	71.43	4.98	125.83	-54.41
25	1250	0.23	177.63	3.95	1.54	176.09
27	1350	0.10	-78.81	4.06	-116.00	37.18
29	1450	0.11	129.73	3.18	135.76	-6.03
31	1550	0.16	-162.84	2.51	2.46	-165.30
33	1650	0.06	-50.66	2.01	-110.92	60.26
35	1750	0.11	110.99	1.58	140.35	-29.36
37	1850	0.07	-109.83	1.45	10.24	-120.07
39	1950	0.09	-10.34	1.08	-106.12	95.78
41	2050	0.10	56.35	0.71	128.04	-71.68
43	2150	0.05	-15.25	0.60	15.12	-30.37
45	2250	0.07	-134.33	0.51	-110.87	-23.46
47	2350	0.06	24.85	0.38	87.84	-62.98
49	2450	0.06	-11.18	0.32	-19.79	8.61

Lámpara LED de 10 W (LED A21)



Características nominales:

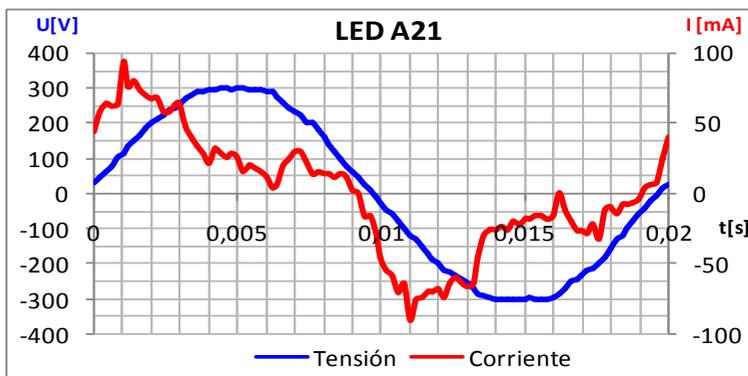
Marca: Alic **Modelo:** PAR 30 - Alto Flujo Lumínico – 8 LED

Potencia: 10 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 230 [V] C.A.

Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto

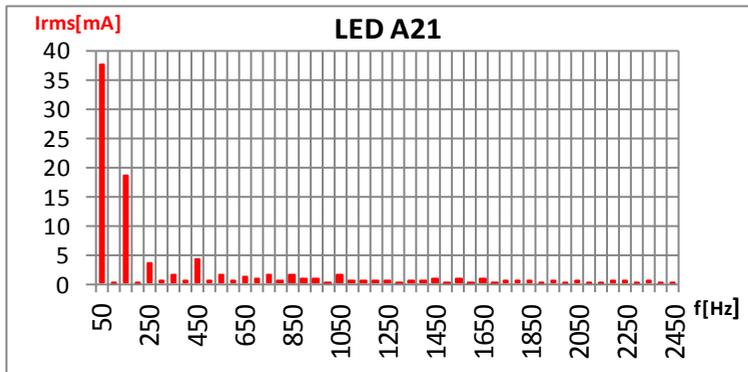
Color: Luz blanca cálida **Tcolor:** 3000 [°K] **Haz de luz:** 27°

Vida útil a tensión nominal: 30.000 horas

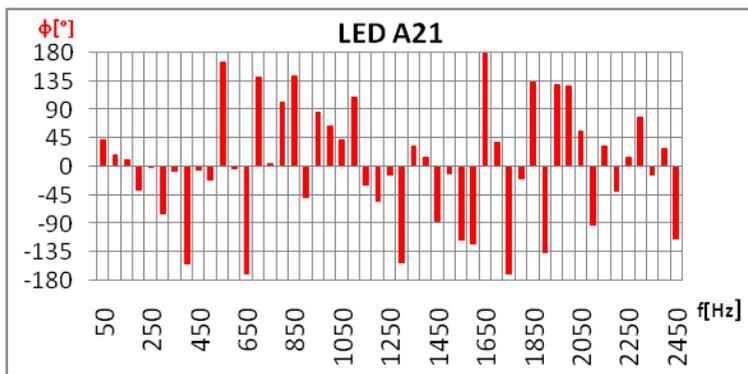


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
216.18	300.00
U1[V]	FCu
216.09	1.39
THDu%	
2.62	

Corriente	
Irms[mA]	I max [mA]
42.62	100.00
I 1 [mA]	F ci
37.71	2.35
THDi%	
52.00	



Potencia	
FD	cosφ 1
0.88	0.80
capacitivo	
FP = λ	P 1 [W]
0.71	6.53
Q 1 [VAr]	S 1 [VA]
4.88	8.15
P[W]	S[VA]
7.4	9.21
D[VAd]	N[Van]
4.30	7.82
F[VAF]	
6.50	



Lámpara LED de 10 W (LED A21)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Fundamental y Armónicos impares						
n°	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	216.09	4.62	37.71	41.40	-36.77
3	150	3.31	111.77	18.40	10.23	101.54
5	250	2.77	-160.57	3.47	-0.32	-160.25
7	350	0.35	9.75	1.50	-7.21	16.96
9	450	2.55	-149.19	4.13	-4.80	-144.39
11	550	1.41	25.89	1.36	163.93	-138.05
13	650	0.79	103.06	1.14	-169.19	-87.75
15	750	1.55	-148.95	1.39	5.40	-154.35
17	850	0.25	11.41	1.37	143.23	-131.82
19	950	0.36	80.48	0.88	86.26	-5.79
21	1050	0.20	142.42	1.44	42.81	99.61
23	1150	0.38	111.39	0.37	-28.86	140.25
25	1250	0.15	161.64	0.44	-13.07	174.71
27	1350	0.12	-33.69	0.29	32.53	-66.22
29	1450	0.19	6.02	0.58	-87.14	93.16
31	1550	0.20	64.05	0.56	-116.37	-179.58
33	1650	0.05	-88.66	0.67	178.84	92.50
35	1750	0.09	140.45	0.39	-168.43	-51.12
37	1850	0.04	-173.39	0.52	132.27	54.34
39	1950	0.12	12.90	0.25	129.93	-117.03
41	2050	0.09	0.12	0.29	56.16	-56.05
43	2150	0.13	-78.58	0.18	31.68	-110.26
45	2250	0.07	-14.04	0.30	14.54	-28.59
47	2350	0.02	-169.96	0.45	-13.19	-156.77
49	2450	0.13	-175.66	0.17	-114.74	-60.92

Lámpara LED de 12 W (LED A23)



Características nominales:

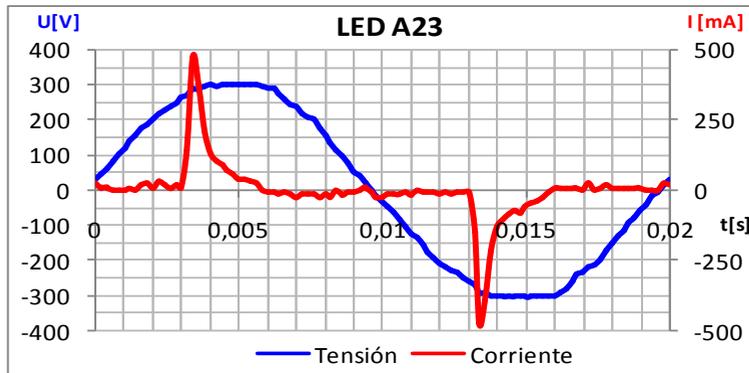
Marca: Alic **Modelo:** AR111 - Alto Flujo Lumínico – 1 led

Potencia: 12 [W] **Casquillo:** GU10 **Tensión:** 230 [V] C.A.

Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto

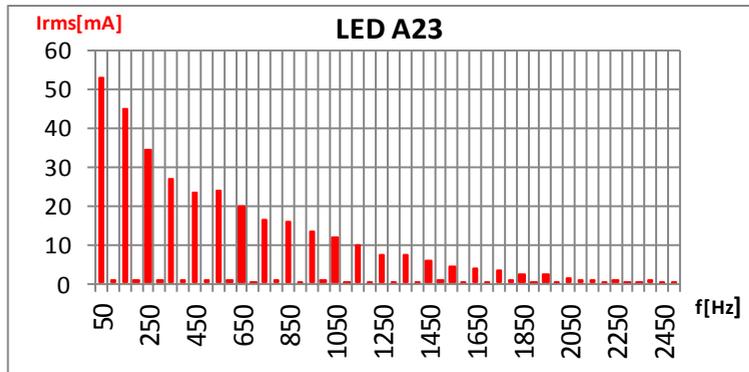
Color: Luz blanca cálida **Tcolor:** 3000 [°K] **Haz de luz:** 24°

Vida útil a tensión nominal: 35.000 horas

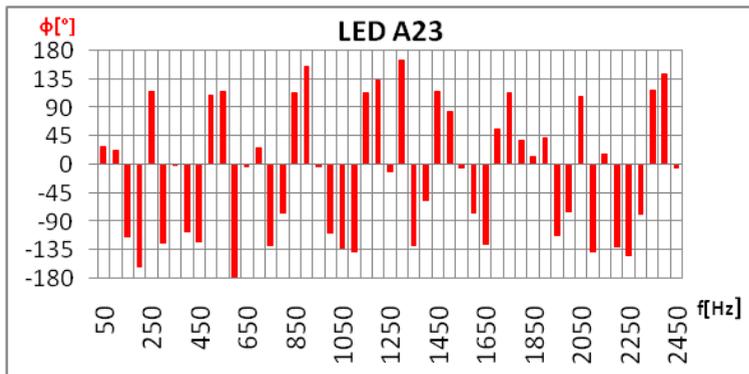


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
218.15	304.00
U1[V]	FCu
218.07	1.39
THDu%	
2.63	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
97.12	496.00
I1[mA]	Fci
53.14	5.11
THDi%	
151.78	



Potencia	
FD	cosφ1
0.55	0.92
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.51	10.71
Q1[VA]	S1[VA]
4.42	11.59
P[W]	S[VA]
11.3	21.19
D[VAd]	N[Van]
17.74	20.72
F[Vaf]	
18.28	



Lámpara LED de 12 W (LED A23)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

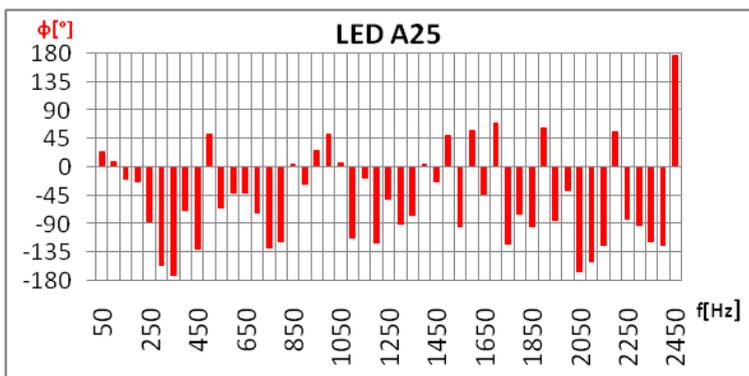
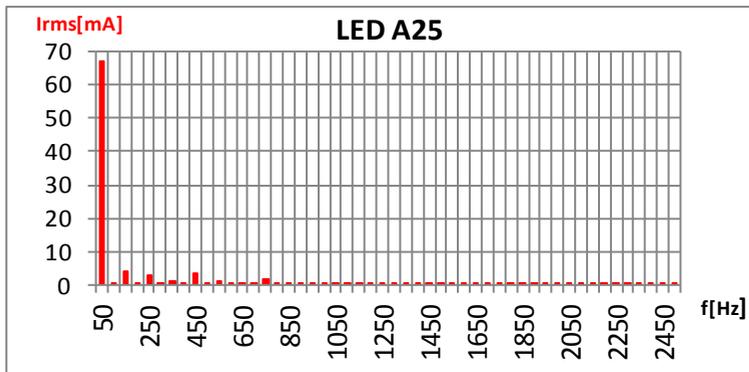
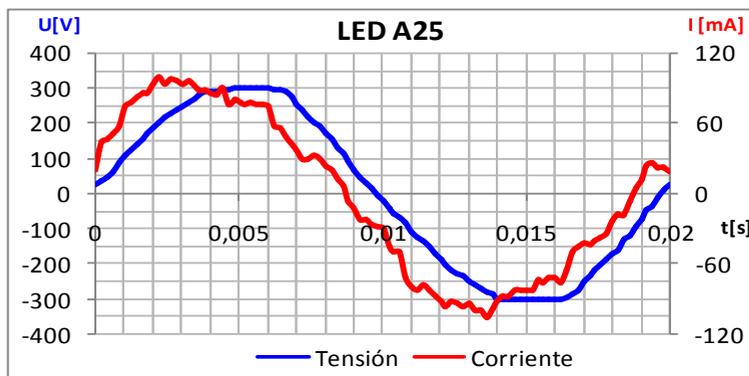
Fundamental y Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	218.07	6.01	53.14	28.44	-22.43
3	150	3.46	115.99	45.01	-114.01	-130.00
5	250	2.86	-152.99	34.21	115.08	91.93
7	350	0.39	1.22	26.66	-1.62	2.84
9	450	2.63	-139.17	23.03	-121.12	-18.05
11	550	1.05	38.86	23.94	115.83	-76.98
13	650	1.05	101.47	19.87	-3.90	105.37
15	750	1.37	-132.78	16.39	-127.83	-4.96
17	850	0.34	22.63	15.69	113.74	-91.12
19	950	0.36	103.74	13.01	-2.64	106.38
21	1050	0.31	-175.66	11.43	-131.97	-43.68
23	1150	0.28	100.33	9.78	113.21	-12.88
25	1250	0.05	-171.78	7.38	-10.27	-161.52
27	1350	0.20	-39.45	6.92	-127.07	87.62
29	1450	0.20	67.91	5.68	114.81	-46.90
31	1550	0.09	86.93	4.20	-5.47	92.41
33	1650	0.06	-10.58	3.59	-125.58	114.99
35	1750	0.12	43.27	2.96	114.16	-70.89
37	1850	0.05	172.94	2.00	13.46	159.48
39	1950	0.08	115.82	2.17	-111.77	-132.42
41	2050	0.12	40.01	0.94	108.16	-68.16
43	2150	0.07	87.33	0.79	15.63	71.70
45	2250	0.10	-173.65	0.81	-143.13	-30.51
47	2350	0.07	-161.28	0.49	116.61	82.12
49	2450	0.08	-113.79	0.26	-4.87	-108.93

Lámpara LED de 15 W (LED A25)



Características nominales:

Marca: Alic **Modelo:** PAR 38 - Alto Flujo Lumínico – 12 led
Potencia: 15 [W] **Casquillo:** E27 **Tensión:** 230 [V] C.A.
Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto
Color: Luz blanca cálida **Tcolor:** 3000 [°K] **Haz de luz:** 27°
Vida útil a tensión nominal: 30.000 horas



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
218.36	304.00
U1[V]	FCu
218.17	1.39
THDu%	
4.06	

Corriente	
Irms[ma]	Imax[ma]
67.39	104.00
I1[ma]	Fci
67.01	1.54
THDi%	
9.24	

Potencia	
FD	cosφ1
0.99	0.92
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.92	13.47
Q1[VAr]	S1[VA]
5.67	14.62
P[W]	S[VA]
14.4	14.72
D[VAd]	N[Van]
1.67	13.58
F[VAF]	
5.91	

Lámpara LED de 15 W (LED A25)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

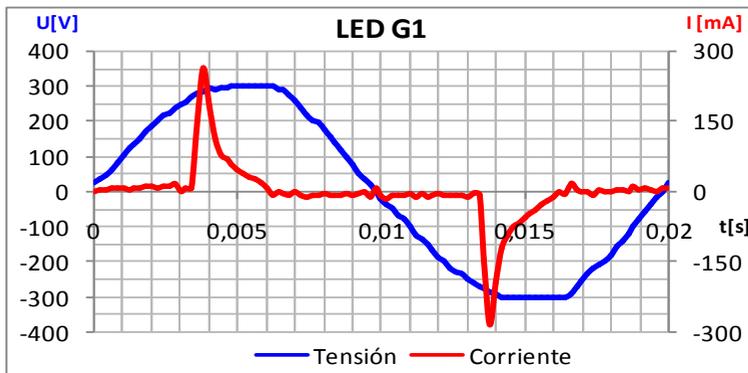
Fundamental y Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	218.17	2.06	67.01	24.89	-22.83
3	150	6.90	97.27	3.99	-19.35	116.62
5	250	4.26	-172.90	2.51	-85.68	-87.22
7	350	1.18	-6.10	0.71	-171.61	165.51
9	450	2.66	149.32	3.15	-130.62	-80.06
11	550	0.92	-111.57	1.10	-65.21	-46.37
13	650	0.78	-32.39	0.46	-40.86	8.48
15	750	0.92	123.42	1.40	-127.82	-108.75
17	850	0.13	-159.68	0.43	5.37	-165.05
19	950	0.32	29.26	0.33	26.25	3.00
21	1050	0.59	67.51	0.35	6.93	60.58
23	1150	0.16	129.44	0.58	-17.92	147.36
25	1250	0.19	132.84	0.37	-51.14	-176.02
27	1350	0.01	-58.89	0.26	-76.47	17.58
29	1450	0.21	-118.87	0.45	-23.01	-95.87
31	1550	0.12	-40.23	0.20	-94.59	54.36
33	1650	0.14	-112.22	0.39	-43.35	-68.87
35	1750	0.14	39.13	0.47	-122.13	161.27
37	1850	0.15	16.35	0.20	-94.31	110.66
39	1950	0.02	-20.68	0.14	-85.12	64.44
41	2050	0.07	-76.52	0.14	-166.35	89.83
43	2150	0.15	-43.46	0.16	-123.78	80.32
45	2250	0.16	-20.08	0.10	-82.66	62.58
47	2350	0.07	12.84	0.14	-118.91	131.75
49	2450	0.15	44.41	0.16	177.26	-132.86

Lámpara LED de 9 W (LED G1)



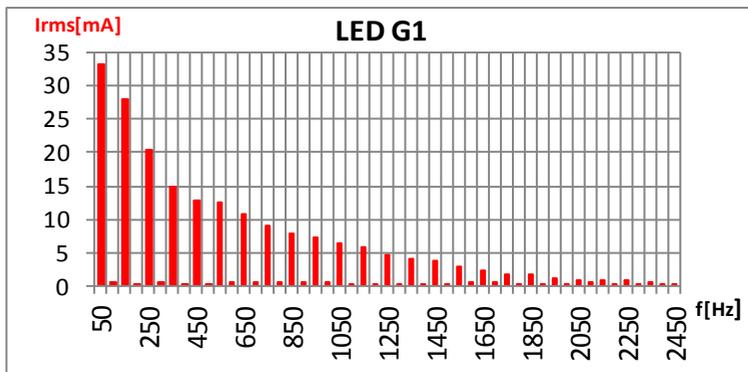
Características nominales:

Marca: Goodyear **Modelo:** Alto Flujo Lumínico – 3 led
Potencia: 9 [W] **Casquillo:** GU10 **Tensión:** 220 [V] C.A.
Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto
Color: Luz blanca cálida **Tcolor:** 2700-3500 [°K] **Haz de luz:** ---
Vida útil a tensión nominal: no se informa

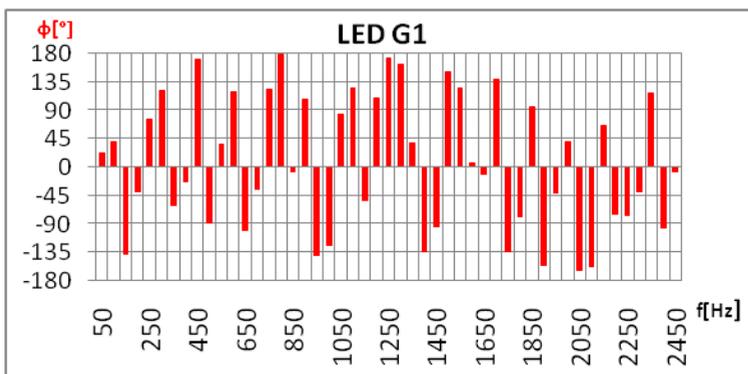


Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
218.19	304.00
U1[V]	FCu
218.00	1.39
THDu%	
4.02	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
57.37	292.00
I1[mA]	Fci
33.19	5.09
THDi%	
140.04	



Potencia	
FD	cosφ1
0.58	0.93
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.54	6.75
Q1[VAr]	S1[VA]
2.60	7.23
P[W]	S[VA]
6.8	12.52
D[VAd]	N[Van]
10.21	12.25
F[Vaf]	
10.54	



Lámpara LED de 9 W (LED G1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Fundamental y Armónicos impares						
n°	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	$\Phi_v - \Phi_i$ [°]
1	50	218.00	1.29	33.19	22.31	-21.03
3	150	6.88	93.88	27.93	-138.58	-127.53
5	250	3.97	-174.96	20.25	75.55	109.49
7	350	1.21	2.29	14.61	-60.45	62.74
9	450	2.80	141.00	12.72	171.77	-30.77
11	550	1.00	-118.48	12.32	35.68	-154.16
13	650	0.80	-21.85	10.56	-99.92	78.07
15	750	1.04	116.38	8.87	123.10	-6.72
17	850	0.32	146.86	7.80	-7.24	154.10
19	950	0.29	-9.01	7.15	-139.75	130.74
21	1050	0.41	47.70	6.17	83.67	-35.97
23	1150	0.26	104.09	5.63	-52.78	156.87
25	1250	0.06	142.07	4.60	172.55	-30.48
27	1350	0.07	-39.98	3.83	37.43	-77.42
29	1450	0.04	126.75	3.56	-94.87	-138.38
31	1550	0.09	154.23	2.76	125.01	29.22
33	1650	0.12	145.35	2.23	-11.23	156.58
35	1750	0.11	28.91	1.52	-133.16	162.07
37	1850	0.03	-54.08	1.56	96.61	-150.69
39	1950	0.02	83.18	1.12	-40.21	123.39
41	2050	0.09	32.92	0.60	-164.07	-163.02
43	2150	0.04	43.60	0.75	66.95	-23.34
45	2250	0.04	90.18	0.65	-76.22	166.39
47	2350	0.07	90.39	0.48	117.64	-27.25
49	2450	0.05	-12.07	0.23	-7.89	-4.18

Lámpara LED de 6 W (LED W1)



Características nominales:

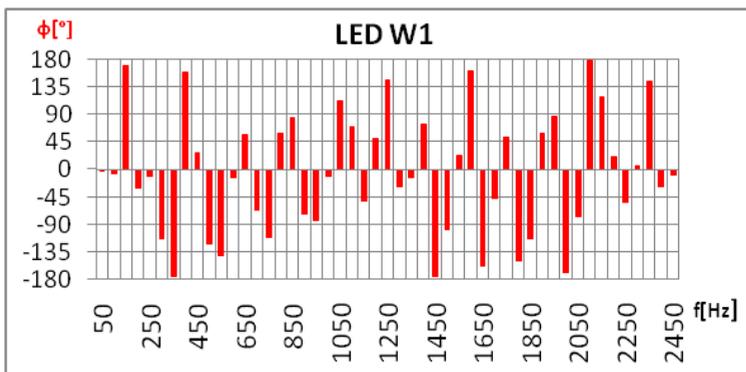
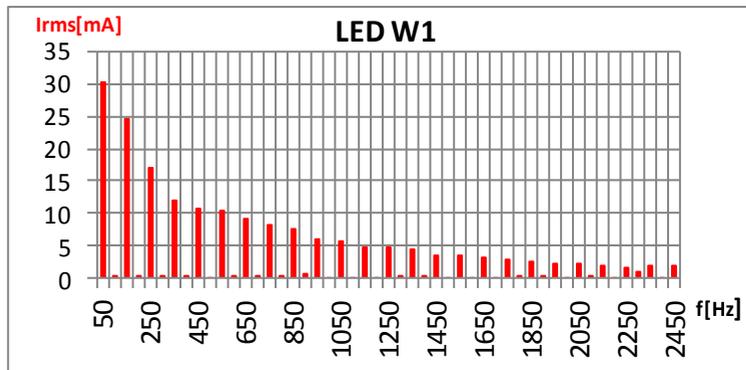
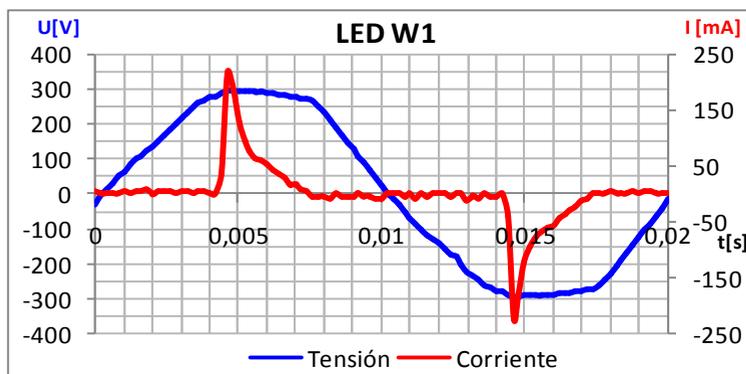
Marca: Werke **Modelo:** Hiled- Alto Flujo Lumínico – 3 led

Potencia: 6 [W] **Casquillo:** GU10 **Tensión:** 220 [V] C.A.

Flujo lumínico: el fabricante no provee información al respecto

Color: Luz blanca fría **Tcolor:** no se informa [°K] **Haz de luz:** 60°

Vida útil a tensión nominal: no se informa



Tensión	
Urms[V]	Umax[V]
216.03	296.00
U1[V]	FCu
215.72	1.37
THDu%	
5.34	

Corriente	
Irms[mA]	Imax[mA]
51.27	228.00
I1[mA]	Fci
30.23	4.45
THDi%	
136.99	

Potencia	
FD	cosφ1
0.59	0.99
capacitivo	
FP = λ	P1[W]
0.59	6.48
Q1[VAr]	S1[VA]
0.74	6.52
P[W]	S[VA]
5.79	11.08
D[VAd]	N[Van]
8.95	11.05
F[VAf]	
8.98	

Lámpara LED de 6 W (LED W1)

Armónicos impares utilizados para modelar y simular la lámpara:

Armónicos impares						
nº	F[Hz]	U[V]	Φ_v [°]	I [mA]	Φ_i [°]	Desfasaje
1	50	215.72	-7.30	30.23	-0.80	6.51
3	150	7.15	43.72	24.79	169.01	125.29
5	250	8.08	98.15	17.00	-11.00	-109.15
7	350	2.14	-108.90	12.17	-174.29	-65.39
9	450	2.09	-74.24	10.71	27.23	101.47
11	550	0.35	18.51	10.64	-141.71	-160.22
13	650	1.32	83.13	9.24	55.99	-27.14
15	750	0.41	-169.46	8.15	-110.87	58.58
17	850	0.14	173.79	7.62	83.72	-90.07
19	950	0.75	-18.76	6.21	-83.44	-64.68
21	1050	0.59	109.06	5.86	113.23	4.18
23	1150	0.23	-86.81	4.93	-51.72	35.09
25	1250	0.46	-172.88	4.93	145.76	-41.36
27	1350	0.54	74.08	4.54	-13.06	-87.14
29	1450	0.11	34.17	3.64	-174.76	151.07
31	1550	0.41	-82.74	3.42	23.37	106.11
33	1650	0.09	-15.95	3.16	-158.13	-142.18
35	1750	0.52	-5.34	3.07	52.64	57.98
37	1850	0.55	-57.13	2.74	-113.72	-56.59
39	1950	0.47	-136.76	2.42	87.02	-136.21
41	2050	0.17	-30.03	2.19	-77.82	-47.80
43	2150	0.18	-83.25	2.12	119.51	-157.24
45	2250	0.10	80.52	1.77	-53.67	-134.19
47	2350	0.25	-76.86	2.14	144.62	-138.53
49	2450	0.16	-68.57	2.06	-9.41	59.16

ANEXO 3

Encuesta Energética



Departamento de Ingeniería Eléctrica



ENCUESTA ANÓNIMA

Esta encuesta tiene la finalidad de recabar información sobre consumo energético residencial. Esto dará origen a un trabajo de uso racional de la energía dentro del Proyecto de Investigación “Calidad de la Energía”.

Fecha de realización de la encuesta:/...../2012

Encuestador/a:

1) Indique con una cruz:

Tipo de vivienda	CASA	DPTO. PH	DPTO. en EDIFICIO

2) Cantidad de habitantes de la vivienda:

3) Superficie de la vivienda: (en metros cuadrados)

4) Iluminación de la vivienda:

Si desconoce el nombre de las lámparas, antes de completar la tabla, le mostramos las más utilizadas para que las identifique fácilmente:

➤ Lámparas incandescentes:



Lámparas halógenas:



➤ Lámparas bajo consumo:



➤ Lámparas fluorescentes:



➤ Lámparas dicroicas:



➤ Lámparas LED:



Proyecto de Investigación Calidad de la Energía- Grupo LAT- Dpto. de Ing. Eléctrica- FI- UNMDP

5) Artefactos domésticos (la opción Tipo se marca con una cruz).

TELEVISOR							
Tipo			Tamaño (pulgadas)	Horas de encendido			
de Tubo(CRT)	LCD	LED		Días hábiles	Sáb.	Dom.	
EQUIPO DE MÚSICA							
Tipo		Tamaño (chico o grande)	Horas de encendido				
radio-grabador	minicomponente		Días hábiles	Sáb.	Dom.		
MICROONDA							
Tipo		Tamaño (20 ó 25 litros)	Horas de encendido				
analógico	digital		Días hábiles	Sáb.	Dom.		
LAVARROPA							
Tipo		¿Tiene Inteligencia Fuzzy? (SI ó NO)	Tamaño (6, 8 ó 13 Kg)	Horas de encendido			
automático	semiautomático			Días hábiles	Sáb.	Dom.	
HELADERA							
Tipo				¿Tiene etiqueta de eficiencia energética? (SI ó NO) ¹	Tamaño aprox. (100, 250, 350, ó 400 litros)	Horas de encendido	
c/ freezer	s/ freezer	freezer solo	con frente digital			Días hábiles	Sáb.

Proyecto de Investigación Calidad de la Energía- Grupo LAT- Dpto. de Ing. Eléctrica- FI- UNMDP

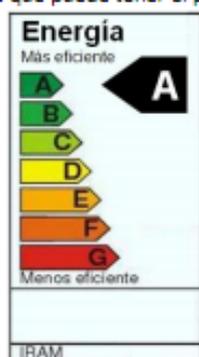
AIRE ACONDICIONADO						
Tipo		Potencia aprox. (2500, 3200, 4500 ó 6000 Watt)	¿Tiene etiqueta de eficiencia energética? (SI ó NO) ²	Horas de encendido		
Frío	Frío Calor			Meses del año	Días hábiles	Sáb.

COMPUTADORA						
Tipo			Tamaño de la pantalla (si es una portátil)	Horas de encendido		
Escritorio	Notebook	Netbook		Días hábiles	Sáb.	Dom.

MONITOR						
Tipo			Tamaño (pulgadas)	Horas de encendido		
de Tubo(CRT)	LCD	LED		Días hábiles	Sáb.	Dom.

OTROS ²						
Artefacto			Tamaño ó Consumo	Horas de encendido		
				Días hábiles	Sáb.	Dom.

² Si tiene etiqueta de eficiencia energética, indicar la clase (A, B, C, D, etc). A continuación se muestra la etiqueta que puede tener el producto en la que se indica la clase energética del mismo.



Clase energética	Calificación
A	Bajo consumo de energía
B	
C	
D	Consumo de energía medio
E	
F	Alto consumo de energía
G	

² En este ítem puede agregar algún otro artefacto de la instalación eléctrica que usted considere que tiene muchas horas de uso en la semana, por lo que sería importante considerar su consumo.

Proyecto de Investigación Calidad de la Energía- Grupo LAT- Dpto. de Ing. Eléctrica- FI- UNMDP

CALEFACCIÓN ELÉCTRICA					
Artefacto (Estufa de cuarzo, estufa halógena, Paneles ECOSOL)	Potencia aprox. (Watt)	Horas de encendido			
		Meses del año	Días hábiles	Sáb.	Dom.
CALEFACCIÓN A GAS					
Artefacto (calefactor, caldera p/radiador o losa radiante)	Consumo aprox. (Kcalorías)	Horas de encendido			
		Meses del año	Días hábiles	Sáb.	Dom.
CALEFACCIÓN CON LEÑA					
Artefacto (hogar, salamandra)	Consumo aprox. (Kg de leña por mes)	Horas de encendido			
		Meses del año	Días hábiles	Sáb.	Dom.

6) ¿Tiene conocimiento de que desechar una lámpara Fluorescente o una de Bajo Consumo a la basura contamina el ambiente? (Marque con una cruz).

SI	NO

7) ¿Qué hace con las lámparas Fluorescentes o de Bajo Consumo cuando las reemplaza? (Marque con una cruz).

LAS ARROJA A LA BASURA	LAS GUARDA EN SU CASA	LAS LLEVA A ALGÚN OTRO LUGAR (aclarar abajo)*

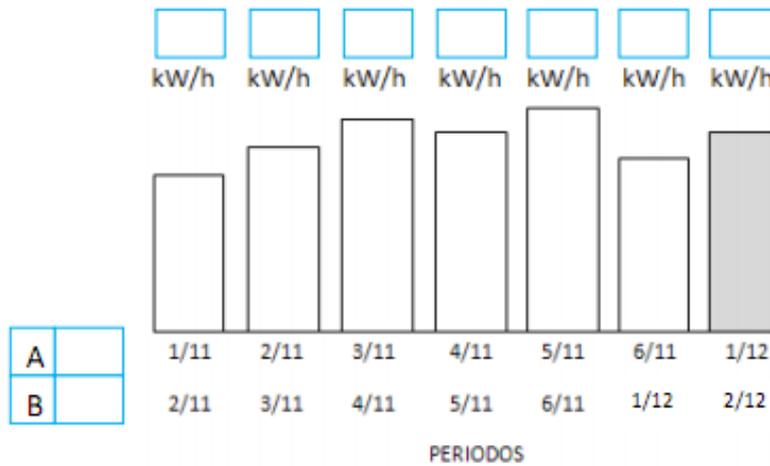
*

8) Por favor tome la última factura de luz y transcriba los siguientes datos:

Dirección: Calle entre y
(Dirección aproximada, es sólo para realizar un mapa de consumo energético).

Tarifa: (T1R, T1RE, T1G Bajo Consumo, T1G Alto Consumo, T1GE, T2)
(Se encuentra en la esquina superior izquierda de la factura debajo del domicilio)

Completar el consumo bimestral que figura en su boleta:



Por favor marque con una cruz si los periodos correspondientes a su zona geográfica son A o B.

Para que los resultados muestren fielmente la realidad en materia energética le solicitamos que los datos sean reales.

Es una encuesta anónima y los datos serán resguardados solo para fines académicos.

Desde ya, **MUCHAS GRACIAS!** por su colaboración.

ANEXO1 DE LA ENCUESTA 2012

También necesitamos saber:

1) Nivel educacional máximo de los habitantes de la vivienda (completar con una cruz):

Universitario/Terciario	Secundario	Primario
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2) ¿Tiene conocimiento de qué es AHORRO ENERGÉTICO?
(Completar con una cruz.)

SI	NO
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3) Si contestó SI en la 2), responda:

a) ¿Cómo tomó conocimiento del tema? (Completar con una cruz)

Radio	Televisión	Diario o revista	Internet	Otros (aclare)
<input type="checkbox"/>				

b) ¿Cómo lo implementa en su vida cotidiana?.....
.....
.....

LÁMPARAS BAJO CONSUMO: ANÁLISIS ARMÓNICO Y SU IMPACTO EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

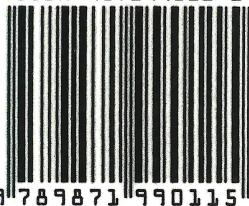
Es objetivo de este trabajo analizar el impacto que producirá en las redes de distribución eléctrica el reemplazo de lámparas incandescentes por las denominadas de bajo consumo, entre las que se destacan las Lámparas Fluorescentes Compactas (LFC) y las lámparas con Diodos Emisores de Luz (LED).

Desde el 1 de junio del 2011, Argentina, siguiendo normas implementadas en otros países, puso en vigencia la prohibición de la venta de lámparas incandescentes a partir de los 25 [W]. Se investigó la influencia que tendrá en los índices de la calidad de la energía, el incremento progresivo de lámparas con alto contenido de componentes armónicos que irán reemplazando a las lámparas incandescentes que actúan como cargas lineales puras. Varios tipos de lámparas LFC y LED existentes en el mercado argentino, fueron ensayadas, con el propósito de modelarlas en el programa Alternative Transients Program (ATP), junto a otras cargas típicas de usuarios residenciales. Distintos escenarios en el tiempo fueron simulados variando la proporción de lámparas incandescentes, fluorescentes, halógenas y LED.

Los resultados se compararon con mediciones realizadas en subestaciones transformadoras de media a baja tensión que alimentan a usuarios residenciales preferentemente. Por último se realizó un análisis económico de los reemplazos de lámparas analizados, y se estudiaron los impactos ambientales del ciclo de vida de cada tipo de lámpara analizado.

Jorge Luis Strack

ISBN 987199011-1



9 789871 990115

jlstrack@fi.mdp.edu.ar