



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS SOBRE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO DE POTENCIA DEL CONTENIDO ARMÓNICO EN LA CORRIENTE

Autor: Alberto Hernaz González

*Tutor Nº1: Manuel V. Riesco Sanz
Tutor Nº2: Daniel Moriñigo Sotelo*

Valladolid, Junio 2019

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS SOBRE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO DE POTENCIA DEL CONTENIDO ARMÓNICO EN LA CORRIENTE

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo principal determinar si la versión gratuita de PSCAD es adecuada o no para la realización de estudios referentes a la simulación de los efectos de los armónicos de corriente en los transformadores de potencia. Para ello, se realizarán sendas mediciones sobre los diversos circuitos simulados, comparándolos con cálculos teóricos y entre sí, y así poder ver la concordancia entre estos, introduciéndoles diverso contenido armónico de forma conjunta o individual, sobre cargas resistivas o una combinación resistiva e inductiva. Se observarán resultados en cuanto a efecto sobre los transformadores, concordancia y el tamaño de los circuitos que se pueden implementar. En este sentido, también se pretende observar ciertos efectos sobre el transformador ante unas determinadas cargas y contenido armónico introducido, por si se pudiesen sacar resultados adecuados de cara a futuros estudios.

Abstract

The main objective of this work is to determine if the free version of PSCAD is suitable or not for making studies concerning the simulation of the effects of current harmonics in power transformers. Measurements will be made on various simulated circuits, comparing them with theoretical calculations and each other, trying to see the agreement between them, introducing different harmonic content jointly or individually, on resistive loads or resistive and inductive combinations. Results will be exposed in terms of effects on transformers, concordance and the size of the circuits that can be simulated. In addition, other objective is to observe certain effects on transformers by simulating certain charges and introducing harmonic content, in case they could get reasonable results for future studies.

Palabras clave

Transformador, Contenido armónico, Simulación, Sistema trifásico, PSCAD

Key Words

Transformer, Harmonic content, Simulation, Three-phase system, PSCAD

Agradecimientos

Este trabajo está dirigido a mi familia, a mi hermano Javier y a mi madre Pilar, cuyo apoyo y presencia cercana durante todos estos años ha valido mucho más que todo el existo que pueda tener o no en mi carrera profesional y en la vida. Espero seguir contando con vuestra confianza y saber hacer. También a mi padre, Alberto, cuyo recuerdo todavía sigue muy presente en mí día a día, y su entereza y animo por el trabajo y no rendirse a pesar de las adversidades es un gran lema que no debe ser olvidado, aunque algunas veces estas puedan más que uno. Es a mi familia a quien debo quien soy y como actuaré en un futuro, con el rigor adecuado a mi profesión como ingeniero, pero sin olvidar el rasgo humano y vocacional de estas carrera. Gracias por permitirme vivir esta experiencia. Igualmente es imposible olvidar a mis tíos y primos, que durante mis primeros años en la universidad, como ellos ya contaban con bastante experiencia, me apoyaron y me ayudaron a dar los primeros pasos.

A mis amigos más cercanos, la pandilla de toda la vida, a algunos los conozco de más años y a otros de menos, pero sé que siempre estarán ahí para lo que sea. A Sergio Jiménez y Sergio Zazo, Jesús, Ismael, David, Carlos, Daniel y Jonathan, siempre he contado con vosotros tanto para las juergas como para los momentos duros. La amistad también perdura ante todas las veces que nos podamos haber enfrentado.

A mis compañeros de carrera, muchos, pero algunos de ellos conocidos desde el primer año. Para Rubén, Eduardo, Sara, Ana, Marcos, Raúl, María, David, César, Sandra, Javier, Alberto, Álvaro y Elena, entre otros. Gracias a vosotros la universidad se hace mucho más llevadera, no solo es todo estudiar. Siento si me olvido de alguno, sois muchos y de todos guardo también un grato momento de mi vida.

También no puedo olvidarme de mis profesores durante el curso y durante el máster. Pienso que somos como un bloque de mármol al entrar en la universidad, con la forma que se nos ha dado en el instituto, y que es el maestro con ayuda del aprendiz quienes deben ir cincelandos esa piedra para que termine siendo algo armonioso para la sociedad, y que cumpla su función debidamente. Serán después los años de experiencia quienes terminen puliendo la forma, como el paso del agua y el viento. En especial, agradecer a los tutores de este trabajo, Daniel y Manuel, por darme la oportunidad de aplicar lo agredido y aprender más de su conocimiento, gracias por darme la oportunidad de hacer este trabajo.

Por último, no me puedo olvidar de ti, estimado lector, quién al igual que yo con el ánimo y afán de explorar y aprender de nuevos conocimientos, ha dedicado parte de su vida al aprendizaje y seguirá haciéndolo, y ahora dedica su tiempo para leer mi obra, por lo que espero le resulte amena, didáctica y adecuada para su propósito.

“Nunca dejes de soñar despierto ni permítas que te lo impidan, harás realidad tus sueños”

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes/Justificación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Diagrama de Gantt y estructura del trabajo	2
1.4. Competencias específicas y transversales del máster y del Trabajo de Fin de Máster	6
2. CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN	7
3. EL FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	13
3.1. Introducción	13
3.2. Transformadores ideales	13
3.3. Transformadores reales	15
3.4. Tipos de transformadores reales y simbología empleada	18
4. ARMÓNICOS DENTRO DE LAS LÍNEAS DE TRASMISIÓN	21
4.1. Definición del contenido armónico	21
4.2. Contenido armónico de la red eléctrica (armónicos más representativos) y análisis de Fourier	22
4.3. Origen de los armónicos	23
4.4. Efectos de los armónicos sobre la red eléctrica	24
4.4.1. <i>Sobre las redes de transmisión</i>	24
4.4.2. <i>Sobre los transformadores de potencia</i>	26
4.4.2.1. <i>Armónicos triples u homopolares</i>	26
4.4.2.2. <i>Armónicos de secuencia directa (positivos) y de secuencia inversa (negativos)</i>	31
4.4.3. <i>Sobre otros elementos de la red</i>	34
4.5. Cálculo de parámetros significativos referentes al contenido armónico en transformadores	34
4.5.1. <i>Valor promedio de una onda no sinusoidal (I_{prom})</i>	34
4.5.2. <i>Valor promedio cuadrático (RMS) de una onda no sinusoidal (I_{rms})</i>	35
4.5.3. <i>Factor de forma (Form Factor) de la onda no sinusoidal (FF)</i>	35
4.5.4. <i>Factor de ondulación (Ripple Factor) de una onda no sinusoidal (RP)</i>	35
4.5.5. <i>Factor de contribución de cada armónico (Harmonic Factor)(HF_n)</i>	35
4.5.6. <i>Factor de distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) (THD)</i>	36
4.5.7. <i>Factor de desclasificación de un transformador (K)</i>	36
5. NORMATIVA REFERENTE A LA DESIGNACIÓN Y LIMITACIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO	39
6. SIMULACIONES	41
6.1. Transformador trifásico reductor con cargas lineales (sin contenido armónico)	41
6.1.1. <i>Conexión triángulo/estrella con cargas resistivas lineales en estrella</i>	44

6.1.2.	<i>Conexión triángulo/estrella con cargas resistivas e inductivas lineales en estrella</i>	47
6.2.	Transformador trifásico reductor con cargas lineales con contenido armónico	50
6.2.1.	<i>Simulación del sistema con carga lineal introducidos los armónicos</i>	52
6.2.2.	<i>Simulación del sistema con carga lineal introducidos los armónicos</i>	58
6.2.3.	<i>Comparación de los resultados obtenidos y conclusiones</i>	61
6.2.4.	<i>Conclusiones obtenidas tras el uso de la versión gratuita de PSCAD en la realización de las simulaciones con cargas lineales y armónicas</i>	66
6.3.	Transformador trifásico reductor con circuito inversor DC-AC	68
6.3.1.	<i>Descripción del circuito</i>	68
6.3.3.	<i>Inversor de alta frecuencia</i>	70
6.3.4.	<i>Simulaciones</i>	72
6.3.4.1.	<i>Variando los condensadores que forman el filtro de paso bajo del rectificador</i>	72
6.3.4.2.	<i>Conclusiones obtenidas</i>	74
6.3.4.3.	<i>Variando la frecuencia de activación de los IGBTs del inversor</i>	83
6.3.4.4.	<i>Conclusiones obtenidas</i>	85
6.3.5.	<i>Conclusiones obtenidas de PSCAD tras las simulaciones sobre el circuito rectificador/inversor</i>	91
7.	CONCLUSIONES Y RESULTADOS GENERALES DEL TRABAJO	93
8.	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	97
9.	BIBLIOGRAFÍA	99

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes/Justificación

La realización de este trabajo tiene como objetivo el poder ilustrar cuál es el efecto que tienen los diversos armónicos de la corriente eléctrica sobre los transformadores eléctricos de potencia. Debido a la proliferación en las redes de baja tensión de cargas no lineales, el contenido armónico de la corriente consumida se ha incrementado y, por lo tanto, se justifica el estudio que el impacto de estos armónicos pueden tener sobre los transformadores de distribución.

El estudio se realizará mediante una simulación de los efectos mencionados mediante el empleo de un software apropiado, analizando y estudiando los resultados obtenidos de manera conveniente cuya finalidad es poder dar a conocer datos que puedan ser de interés y utilidad a la comunidad científica y tecnológica, además de ser inspiración a futuros trabajos.

El trabajo de fin de máster se realiza en el Departamento de Tecnología Eléctrica de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid, realizando la labor de tutores Don Daniel Moríñigo Sotelo y Don Manuel Vicente Riesco Sanz, cuya labor ha permitido materializar el objetivo principal de este trabajo.

1.2. Objetivos

Los objetivos principales de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) se pueden resumir en los puntos destacados a continuación:

- ✓ La consecución del análisis y estudio de la influencia de los armónicos de corriente sobre los transformadores eléctricos de potencia. Para ello mediante el software de simulación de sistemas eléctricos PSCAD/EMTDC se realizarán sendos circuitos con los que comprobar si este programa es adecuado para evaluar el efecto ya mencionado (Ver anexo 2).
- ✓ Comprobar la idoneidad de la versión gratuita del software de simulación de sistemas eléctricos PSCAD/EMTDC para la simulación de circuitos alimentados por transformadores, con contenido armónico.

Otros objetivos particulares que se persiguen en este trabajo son los siguientes:

- ✓ Realizar una breve revisión bibliográfica sobre los efectos de los armónicos en los transformadores de potencia.

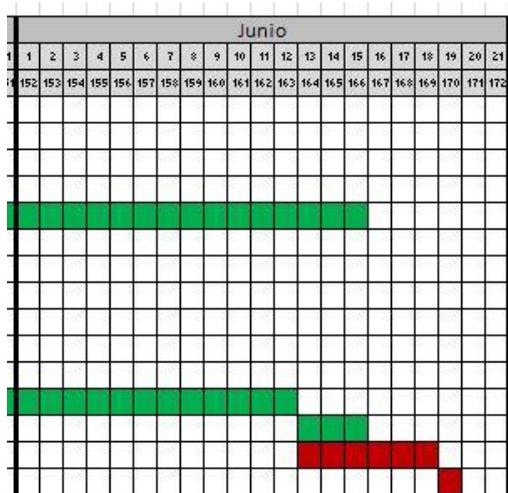
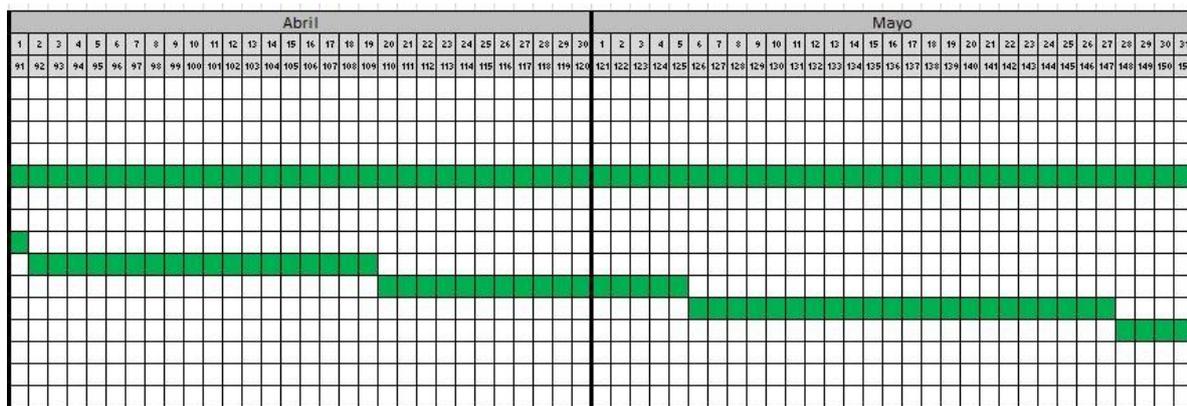
- ✓ Evaluar el impacto del diferente contenido armónico de la corriente de carga en el funcionamiento del transformador, para ello observando parámetros como son las pérdidas de energía sobre estos y el contenido armónico de la tensión en el devanado secundario.

Por último, como objetivos propiamente formativos podemos destacar los más importantes como son las de desarrollar y completar las competencias específicas y transversales del Máster cursado.

1.3. Diagrama de Gantt y estructura del trabajo (Alcance del proyecto)

Uno de los aspectos más importantes a la hora de poder encauzar adecuadamente un trabajo cuya relevancia es grande, es realizar una planificación y consecución de unos determinados objetivos fijados y plazos, con objeto de poder percatarse a tiempo de posibles demoras que pudiesen retrasar la entrega. Por ello también internamente se establecieron criterios y alternativas por si algunas de las simulaciones previstas no pudieran ser realizadas por cualquier circunstancia. Ante este supuesto, se realizó antes de comenzar el trabajo una planificación de cuales debían de ser las pautas y los plazos a seguir para elaborar este documento y los correspondientes anexos de forma ordenada.

Se consensuó que las primeras etapas del trabajo debían de centrarse en una formación mucho más precisa y especializada en términos relacionados con la ingeniería eléctrica, puesto que el autor del mencionado trabajo proviene de la rama correspondiente al Grado de Tecnologías Industriales. El objetivo de esta fase es la de poder adquirir los conocimientos y habilidades necesarias para la realización adecuada de este trabajo, lo cual supuso un esfuerzo a la hora de poder recabar la información necesaria, más específica de un grado en Ingeniería Eléctrica. Simultáneamente a esta etapa, se decidió que se podían comenzar las pruebas con la versión gratuita del software PSCAD, con el objetivo de conocer adecuadamente el programa y conocer en mayor medida las limitaciones principales del programa y así poder decidir qué tipo de circuitos serían más convenientes de simular. Finalizado este periodo de formación, se debían escribir la los primeros apartados de fundamento teórico que servirían de base y referencia para los apartados en los que se realizasen las simulaciones. Se habla de la calidad del suministro de la energía eléctrica en el apartado 2, del funcionamiento del transformador, tipos y conexiones en el apartado 3, y de los armónicos, sus efectos y origen en el apartado 4, terminando por un pequeño apartado de normativa, en el quinto. También se incluyen expresiones de utilidad para el cálculo de ondas con contenido armónico, aunque no de forma detallada, pues no se persigue esta meta. Igualmente, se decidió realizar dos anexos, el primero correspondiente con un glosario con terminología referente al trabajo y de ayuda a su comprensión; y un segundo anexo, estableciendo un pequeño manual o guía de utilización de PSCAD, la cual ayudaría a comprender su funcionamiento.



El tiempo se ha estimado a una media de dedicación por día de 4 horas/persona, sabiendo que la única persona encargada de la elaboración de este trabajo (documentos, simulaciones y demás) es el propio autor del trabajo.

Así se elaboró una lista del material y habilidades necesarias para poder realizar el trabajo:

- Adquirir conocimientos más específicos relativos al área de la Ingeniería Eléctrica, en especial a los conocimientos relativos a los transformadores de potencia y la generación de armónicos.
- Ordenador de torre o portátil, a ser posible con un procesador no demasiado antiguo y suficiente memoria RAM disponible. Si no se dispone de este con las características citadas, se deberá adaptar el tiempo y contenido de las simulaciones al equipo disponible.
- Adquirir e instalar la versión más reciente del software de simulación de sistemas eléctricos PSCAD/EMTDC (Versión gratuita).
- Disponer de programas como Matlab, Simulink, Excel, etc. para realizar el post-tratamiento de los datos obtenidos tras las simulaciones.

- Disponer de un editor de texto Word o LaTeX para la elaboración de la documentación final.
- Contar con otro tipo de material de oficina, tipo hojas de papel, bolígrafos, etc. para anotar otras cuestiones referentes a la elaboración del trabajo.
- CD con caratula para grabar la versión definitiva del trabajo, para su entrega.
- Disponer de un medio de almacenamiento secundario para establecer copias de seguridad periódicas (mínimo cada 15 días) para evitar la pérdida de datos por cualquier circunstancia no prevista.
- Disponer de la normativa para la elaboración del presente TFM en todo momento disponible para su consulta.

A si mismo se elaboró una primera lista en la que se detallaron los capítulos y contenido que en principio debería ser realizado en este trabajo, a efectos de tiempo u otras complicaciones o modificaciones al respecto:

1. Justificación y objetivos (Prueba de PSCAD y de los Efectos de los armónicos).
Objetivos formativos:
 - Competencias específicas del Máster.
 - Competencias transversales del Máster.
2. Calidad de la energía en las redes de distribución. (Revisión bibliográfica corta).
3. El transformador eléctrico. (Pocas hojas recordando el funcionamiento, estructura, modelos, etc.).
4. Efectos de los armónicos en los transformadores. (Revisión bibliográfica corta).
5. Simulaciones:
 - Probar el funcionamiento con cargas lineales.
 - Comprobar si se pueden introducir armónicos de forma individual (probar con fuentes de corriente ideales o explorar otras posibilidades si con estas no se puede).
 - Realizar un circuito más complejo en el que se compruebe la generación de armónicos, como un circuito inversor/rectificador, y variar algunos de los parámetros para ver cómo responde el programa y ver qué sucede con los efectos sobre el transformador.
6. Conclusiones.
7. Anexo con una breve guía de uso de PSCAD.

Estos en gran parte han sido respetados.

1.4. Competencias específicas y transversales del máster y del Trabajo de Fin de Máster

Con la realización de este trabajo se pretende poder aplicar los conocimientos obtenidos durante el grado y especialmente los conferidos durante la realización del máster. Con ello se pretende poder adquirir la capacidad de gestionar de forma competente, el diseño, planificación y control de proyectos de índole técnica e ingenieril, además de adquirir nuevos conocimientos en campos desconocidos por el autor mediante la realización de este TFM, que pueda ser de utilidad y aumente el conocimiento que pudiese divulgar ante la comunidad de ingenieros. Con este último, se pretende desarrollar la competencia de poder integrar nuevos conocimientos y la capacidad de comunicar las conclusiones y enfrentarse a la complejidad de formular juicios ante una información, que aunque pueda resultar insuficiente o limitada, sea posible realizar reflexiones que puedan ser de utilidad o aplicación real, de lugar a la realización de nuevos estudios a la finalización de estos, o simplemente tengan aplicaciones éticas o sociales.

Tras la realización del trabajo, el autor se encuentra satisfecho con la realización de este trabajo y máster, que le ha permitido poder aplicar gran parte de las competencias que la sociedad espera que un ingeniero industrial disponga.

2. CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el objetivo de este trabajo no es otro que el estudio y análisis mediante la realización de simulaciones, de cómo el contenido armónico consumido por las cargas no lineales afecta al funcionamiento de la red eléctrica, en particular, a los transformadores de potencia. Consecuentemente, dicho contenido armónico afecta de forma directa al suministro eléctrico, pudiendo alterarlo debido a la distorsión generada en las ondas de corriente y tensión, las cuales pierden su forma sinusoidal. Incluso, en casos más severos, se interrumpe el suministro, provocado por el aumento de la temperatura y fallo en el aislamiento de la aparamenta eléctrica, lo cual se detalla de forma más completa en apartados posteriores.

En consecuencia, se puede vislumbrar que los armónicos afectarán de forma inherente a lo que técnicamente recibe el nombre de “calidad de la energía eléctrica”, la cual puede definirse en primera instancia como la capacidad de poder transportar la energía desde los centros de producción hasta los centros de consumo en las mejores condiciones posibles, las cuales suponen un nivel de voltaje aceptable con inexistencia de fallos de suministro, todo ello a un coste razonable. No obstante, dicho término ha sido objeto de numerosos estudios por parte de instituciones privadas y universidades sobre todo, y su definición precisa no se ha consensado de forma completa, existiendo una numerosa terminología referente al tema, como pueden ser las definiciones de “Calidad del servicio”, “Calidad de la tensión”, y “Calidad de la intensidad de corriente”, entre otros [12].

La realidad, en muchos sentidos, dista de la idealidad, y las alteraciones y fallos en el suministro eléctrico se producen aunque de manera ocasional.

Es preciso dar una primera aproximación de como el sistema eléctrico se estructura. Las visiones más frecuentes adoptadas para la definición de dicho sistema es la de considerar un grupo de productores de diverso origen (fuentes de energía renovables, no renovables, etc.) dedicados a la generación energética que venden a la red de transporte, la cual mediante las diversas redes de distribución y centros de reparto consigue entregar la energía generada a los puntos de consumo, tanto en alta como en baja tensión (Figura 1). Existe un organismo o varios, que en general, se encargarán de organizar la compra y venta de energía, además de garantizar una estabilidad de precios y el mantenimiento de la línea en óptimas condiciones. No obstante, el suministro en ocasiones se ve alterado por causas propias y ajenas a la red eléctrica tales como la energización de grandes transformadores, la entrada en funcionamiento de grandes motores o la caída de rayos durante tormentas de fuerte aparato eléctrico. Todos estos fenómenos mencionados poseen características similares y diferentes entre sí que permiten establecer ciertas categorías para su ordenamiento.

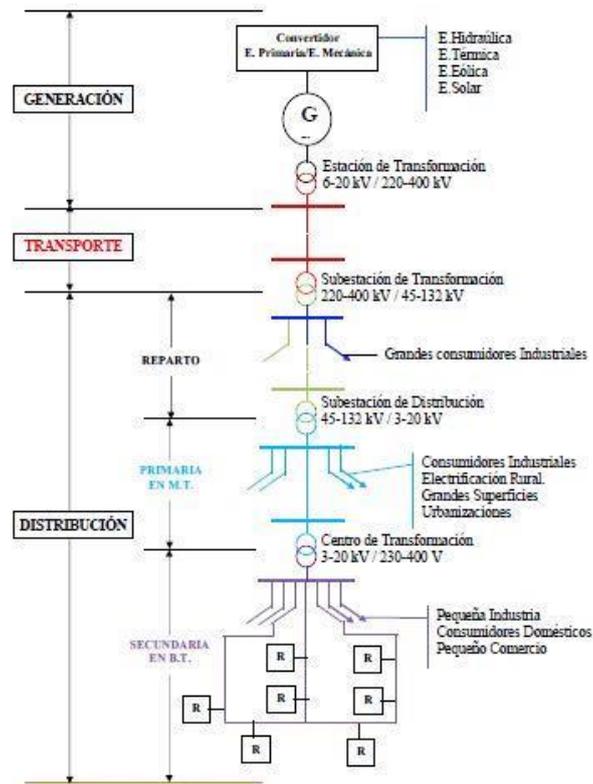


Figura 1: Estructuración del sistema eléctrico convencional. Fuente: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Uva.

Las posibles alteraciones que se dan dentro del sistema pueden organizarse en dos grandes grupos [2]:

- ✓ **Variaciones:** consideradas como pequeñas desviaciones de tensión y/o corriente respecto a lo ideal, las cuales pueden medirse en tiempo real. En esta categoría, el principal problema existente es el contenido armónico, el cual no es percibido directamente sobre el funcionamiento de las cargas, que en algunas ocasiones si pueden dar lugar a vibraciones, calentamiento o ruido, pero en otras solamente son notables cuando los efectos ya son severos.
- ✓ **Eventos:** Grandes desviaciones que ocurren ocasionalmente, como interrupciones del suministro (el nivel de tensión cae a cero), caídas de tensión repentinas (el nivel de tensión es inferior al nominal) o sobretensiones (el nivel de tensión es superior al nominal), etc. Dichas desviaciones solamente son percibidas cuando alcanzan un cierto límite o umbral, sobre o bajo el cual empiezan a tener efectos notables sobre las cargas y resto de elementos conectados a la red, provocando un funcionamiento anormal.

Otro efecto indeseable ocasionado durante la puesta en marcha de muchos dispositivos eléctricos son los llamados efectos transitorios. Dichos efectos ocurren por ejemplo durante la puesta en marcha de grandes motores eléctricos con altas inductancias, la energización de

transformadores, etc. como previamente ya se ha mencionado. Estos fenómenos dan lugar a variaciones en las señales de tensión y corriente que no suelen ser estacionarias, llegando a normalizar su situación transcurrido un determinado periodo de tiempo, y por ello reciben el nombre de efectos transitorios. El fenómeno transitorio tiene bastantes repercusiones sobre la red eléctrica y se clasifica en función de su duración, amplitud, tiempo de pico, polaridad, capacidad de entrega de energía, frecuencia y contenido espectral (contenido armónico nuevamente), etc. Los fenómenos transitorios pueden clasificarse según la IEEE-1159 en fenómenos oscilatorios o impulsos, los cuales se recogen en la tabla 1.

Categoría	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de la tensión (típicamente)
1. Fenómenos transitorios 1.1. Impulsos - Nanosegundos - Microsegundos - Milisegundos 1.2. Oscilatorios - De baja frecuencia - De media frecuencia - De alta frecuencia	Tiempo de subida de 5 ns Tiempo de subida de 1 μ s Tiempo de subida de 0,1 ms	< 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
2. Variaciones del valor medio cuadrático (RMS) de corta duración 2.1. Instantáneas - Caídas - Aumentos 2.2. Momentáneas - Interrupciones - Caídas - Aumentos 2.3. Temporales - Interrupciones - Caídas - Aumentos		0,5 – 30 ciclos 0,5 – 30 ciclos 0,5 ciclos a 3 segundos 30 ciclos a 3 segundos 30 ciclos a 3 segundos	0,1 – 0,9 pu 1,1 – 1,8 pu < 0,1 pu 0,1 – 0,9 pu 1,1 – 1,4 pu
3. Variaciones del valor medio cuadrático (RMS) de larga duración 3.1. Interrupciones sostenidas en el tiempo 3.2. Sobretensiones 3.3. Caídas de voltaje/tensión 3.4. Sobrecargas de corriente		>1 minuto > 1 minuto > 1 minuto > 1 minuto	0,0 pu 0,8 – 0,9 pu 1,1 – 1,2 pu
4. Fenómenos en estado estacionario 4.1. Desequilibrados - De tensión - De corriente		Persistente Persistente	0,5 – 2 % 1 – 30 %
5. Distorsiones de onda 5.1. Compensación en DC 5.2. Contenido armónico	0 – 9 kHz (múltiplos enteros de la frecuencia de red)	Persistente Persistente	0 – 0,1 % 0 – 20 %

5.3. <i>Inter-armónicos</i>	0 – 9 kHz (frecuencias distintas a los múltiplos de la red, superiores a esta)	Persistente	0 – 2 %
5.4. <i>Sub-armónicos (apenas considerados)</i>	(frecuencias distintas a los múltiplos de la red, inferiores a esta)	Persistente	
5.5. <i>Conmutaciones de fase (“notching”)</i>		Persistente	
5.6. <i>Ruido</i>	Todo el ancho de banda	Persistente	0– 1 %
6. <i>Fluctuaciones de tensión</i>	<25 Hz	Intermitente	0,1 – 7 % 0,2 – 2 P _{st}
7. <i>Variaciones de frecuencia</i>		< 10 segundos	+/- 10 Hz

Tabla 1: Clasificación de los diversos fenómenos electromagnéticos en los sistemas de potencia. Fuente: IEEE-1159 (Gunther E. W.)
Traducción realizada por el autor del trabajo

En cuanto al origen de dichos efectos indeseables, existen diferentes clasificaciones en función del origen y de las características del propio efecto. No obstante, lo más usual es realizar una primera clasificación en base a su duración y de sus efectos más conocidos [12]. Se distinguen entonces tres principales categorías:

- ✓ *Fuentes pequeñas y predecibles:* hacen referencia a las cargas que conectan los pequeños consumidores a la red, tales como las zonas residenciales, comunidades, pequeños comercios, etc. En este sentido, el pequeño consumidor está empezando a cobrar una mayor importancia dentro de la red eléctrica con la aparición de los nuevos consumibles electrónicos y los avances en este sector. Se trata de puntos en donde es común que el usuario disponga de ciertos aparatos tales como televisores, ordenadores, lámparas de descarga, telefonía móvil, etc. En la última década la generalización del uso de la tecnología ha aumentado. Un ejemplo se muestra en el caso de la telefonía móvil (en especial los *smartphones*) en donde las estadísticas muestran que para el 2020 alrededor de un 67% de la población mundial dispondrá de estos dispositivos [15]. En la tabla 2 se muestran algunos de los efectos generados por los consumidores.

Tipo de aparato	Contenido armónico (THD)	Tipos de armónicos
<i>Aire acondicionado</i> <i>Microondas</i> <i>Aspiradoras</i>	Elevado (> 10 %)	➔ Armónicos triples y de mayor orden
<i>Televisión</i> <i>Ordenadores</i> <i>Lavadoras</i> <i>Cargadores (fuentes SMPS)</i>	Medio (5% < THD < 10%)	➔ Mayor contenido en armónicos triples (entre el 60 y 80% de su contenido). ➔ Armónicos impares (entre el 3 y el 9 son de mayor amplitud)
<i>Planchas</i>	Bajo (< 5%)	➔ Armónicos impares (entre

Lámparas incandescentes Frigoríficos		el 3 y el 15 son de mayor amplitud)
---	--	-------------------------------------

Tabla 2: Contenido armónico de algunos electrodomésticos de uso común. Fuentes: [3] ; [10]

Estudios realizados referentes al tema han podido observar como aproximadamente las cargas no lineales conectadas por el consumidor son el responsable de aproximadamente el 9% de los armónicos triples de la red, y menos del 17% para armónicos de orden superior [6], lo cual indica que posiblemente una forma eficaz de erradicar un alto contenido de armónicos en las líneas próximas a las zonas habitadas sea mediante la instalación de sistemas de filtrado próximos a los transformadores y el empleo por parte de los consumidores de dispositivos electrónicos menos nocivos para la red.

- ✓ *Largos y aleatorios:* Este es el caso de los hornos de arco eléctrico, los cuales crean sobretensiones, altas fluctuaciones de tensión, etc. Estos hornos suelen alimentarse de forma trifásica mediante líneas de tres cables, y transformadores en conexión delta, lo cual hace que los armónicos más significativos sean los de orden impar (sobre todo los de menor orden como el quinto y el séptimo) [16], a diferencia de los armónicos triples, que pueden quedar contenidos en el transformador debido a este tipo de conexión, hecho que será explicado en el subapartado 4.2.2. de este trabajo.
- ✓ *Largos y predecibles:* Este puede ser el caso de las líneas de transmisión en alta tensión en continua o HVDC por sus siglas en inglés. En este tipo de líneas, la conversión entre sistemas alternos HVAC y sistemas HVDC se realiza por medio de rectificadores e inversores de ondas que generan un amplio contenido armónico en la red, sobre todo en armónicos de orden impar. Una práctica común para reducir el contenido armónico y reducir a la par el rizado de la onda continua, es disponer de inversores con un mayor número de transistores o IGBTs, aumentando a la par el número de pulsos bajo los cuales estos son comandados. De esta forma se consigue reducir la amplitud de los armónicos, lo cuales, a su vez, cada vez son de mayor orden [11], y por tanto menos problemáticos puesto que se generan con una menor amplitud.

Una forma óptima de poder reducir los inconvenientes en cuanto a la transmisión de energía sería la de que los productores y organismos encargados de la transmisión diseñasen y mantuviesen las líneas en un estado adecuado, equipándola con aparata moderna y menos sensible a sobretensiones y sobrecorrientes. Por parte del consumidor final, el empleo de tecnología moderna, la cual es susceptible de contener un mayor número de etapas de filtrado que quizás pueda provocar efectos beneficiosos. En este sentido, sería la labor de las empresas proveedoras de equipos electrónicos, electrodomésticos, etc. promover el cambio hacia una mayor investigación de los efectos perjudiciales de los armónicos sobre el resto de aparatos conectados a la red, para de esta forma poder diseñar y vender equipos cada vez más inocuos en cuanto a distorsión armónica se refiere.

3. EL FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

3.1. Introducción

Anterior a una mayor profundización en el trabajo, resulta necesario poder describir de manera detallada cuales son los conceptos principales de los cuales se va a hacer uso en capítulos posteriores, con objeto en todo momento de poder facilitar el entendimiento y comprensión del conocimiento y resultados en esta memoria escritos.

Antes de profundizar en la descripción del funcionamiento y estructura de los transformadores, se recomienda leer previamente el Anexo 1 de este trabajo, en donde se adjunta un glosario con algunos de los términos de uso común y su descripción correspondiente.

3.2. Transformadores ideales

Los transformadores son el elemento de unión o enlace entre las máquinas generadoras de potencia con las líneas de transmisión de la energía en alta tensión, y entre estas y las líneas de más baja tensión. La utilidad del transformador de potencia radica en poder realizar estas transformaciones de tensión de manera eficiente para evitar excesivas pérdidas en los procesos de transformación y transporte por las líneas.

Un transformador es un elemento formado por dos o más bobinas de material conductor de forma que el flujo magnético que circula por ambas bobinas sea el mismo. Para confinar el flujo magnético aún más, los transformadores de potencia disponen de un núcleo de material ferromagnético, que habitualmente suele consistir en la unión de un gran número de láminas de acero aisladas eléctricamente unidas entre sí. Las bobinas se conectan a las líneas de transmisión, denominándose a la bobina receptora de la potencia el devanado primario, y a la otra bobina el devanado secundario. En función del número de espiras o vueltas que tenga uno de los devanados en función de otro se puede obtener una mayor o menor tensión en el devanado secundario respecto al primario. Esto se conoce con el nombre de relación de transformación del transformador, conceptos citados en el anexo 1.

No obstante, las características de un transformador ideal de potencia se pueden resumir en los siguientes puntos:

- ✓ La permeabilidad μ del núcleo del transformador es infinita.
- ✓ Todo el flujo magnético se encuentra confinado dentro del núcleo y, por lo tanto, el flujo en ambas espiras es el mismo al atravesar éste todas las espiras o vueltas de ambos devanados.
- ✓ Las pérdidas energéticas del núcleo y de los devanados pueden considerarse nulas.

Mediante esta idealización se pueden realizar cálculos estimativos con elevada rapidez siempre y cuando ninguno de los tres condicionantes mencionados anteriormente suponga un elevado inconveniente. En estos casos, el estudio y análisis no se puede realizar sin considerar dichos factores, que afectan de forma inexorable al transformador.

Por otra parte es preciso hablar del llamado acoplamiento magnético, fenómeno por el cual el campo magnético producido por uno de los bobinados afecta o modifica al flujo creado por la otra bobina. En la figura 2 se pueden observar los flujos existentes dentro de un transformador.

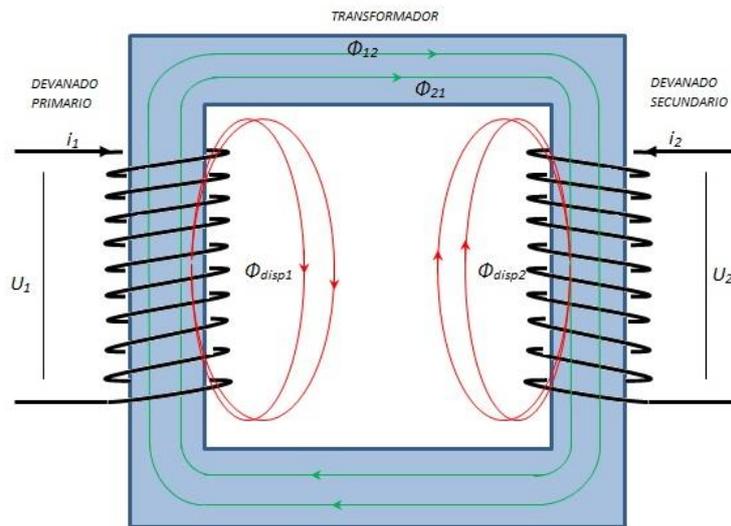


Figura 2: Esquema del acoplamiento magnético de un transformador.

Como se puede comprobar, el flujo que genera el devanado primario (Φ_1) se puede expresar como la suma de los flujos generados por el paso de la corriente eléctrica por la bobina o conductor enrollado, y que atraviesa la bobina del secundario, a la cual está acoplada (Φ_{12}), y el flujo llamado de dispersión que no enlaza con ninguna otra bobina (Φ_{disp1}):

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{disp1}$$

De la misma forma es posible expresar el flujo total que genera el devanado secundario (Φ_2):

$$\Phi_2 = \Phi_{21} + \Phi_{disp2}$$

El flujo que atraviesa cada una de las bobinas será la suma del generado por la misma, más el flujo acoplado debido a la segunda bobina:

$$\text{En el devanado primario: } \Phi = \Phi_{12} + \Phi_{21} + \Phi_{disp1}$$

$$\text{En el devanado secundario: } \Phi = \Phi_{21} + \Phi_{12} + \Phi_{disp2}$$

Se observa que el flujo que atraviesa el núcleo del transformador y que es acoplado por cada una de las bobinas es idéntico de tal forma que es común a los dos devanados, $\Phi_m = \Phi_{12} + \Phi_{21}$, luego la expresión anterior se puede escribir como:

$$\text{En el devanado primario: } \Phi = \Phi_m + \Phi_{disp1}$$

$$\text{En el devanado secundario: } \Phi = \Phi_m + \Phi_{disp2}$$

Se puede ver que si el transformador fuese ideal por completo, el término que alude al flujo común se anularía puesto que todo el flujo sería compartido por ambas espiras. Esto se intenta hacer al escoger materiales con los que construir el núcleo, que debido a sus características físicas, guíen las líneas del campo magnético cerrándolas aún más, como es el caso del acero y las aleaciones magnéticas, las cuales disponen de un coeficiente de saturación magnética próximo a los 1,4 a 2,2 Teslas, un valor alto de saturación que permite que para bajos valores de campo magnético la inductancia de los bobinados pueda considerarse constante. Sin embargo, los materiales no consiguen concatenar o solapar por completo dicho flujo a través de las bobinas, siempre existiendo unas pérdidas, por lo que para aumentar el flujo que atraviesa ambas bobinas es preciso aumentar el flujo total, lo cual conlleva situaciones más próximas a la saturación del material del núcleo, para conseguir coeficientes de inducción mutua mejores.

Para describir los transformadores, es pues de mucha utilidad emplear los coeficientes de inducción mutua y autoinducción.

3.3. Transformadores reales

En las situaciones reales no todo el flujo va a atravesar por igual ambas bobinas como se ha comentado, sino que existirá una cierta porción de éste que no acoplará con la otra bobina y por tanto será inútil desde el punto de vista de la transmisión de potencia. Igualmente, la permeabilidad magnética del núcleo estará limitada por su material constituyente. Por último, existirán tanto pérdidas en el núcleo del transformador (P_{FE}), como pérdidas en los propios devanados (P_{CU}), que empeorarán nuevamente la transmisión de potencia por el transformador. Realizando un balance de energía, resulta que la potencia se distribuye de la siguiente manera:

$$P_1 = P_{CU1} + P_{CU2} + P_{FE} + P_2 \text{ (ec. 1)}$$

dónde:

- P_1 es la potencia transmitida por el devanado primario.
- P_2 es la potencia transmitida por el devanado secundario.
- P_{CU1} y P_{CU2} son las potencias debidas a las pérdidas por el cobre en los devanados primario y secundario respectivamente.
- P_{FE} es la potencia disipada por las pérdidas en el hierro en el núcleo.

Si se conecta el transformador por ambos devanados a sendas líneas eléctricas, el esquema de conexiones sería como el mostrado en la figura 3.

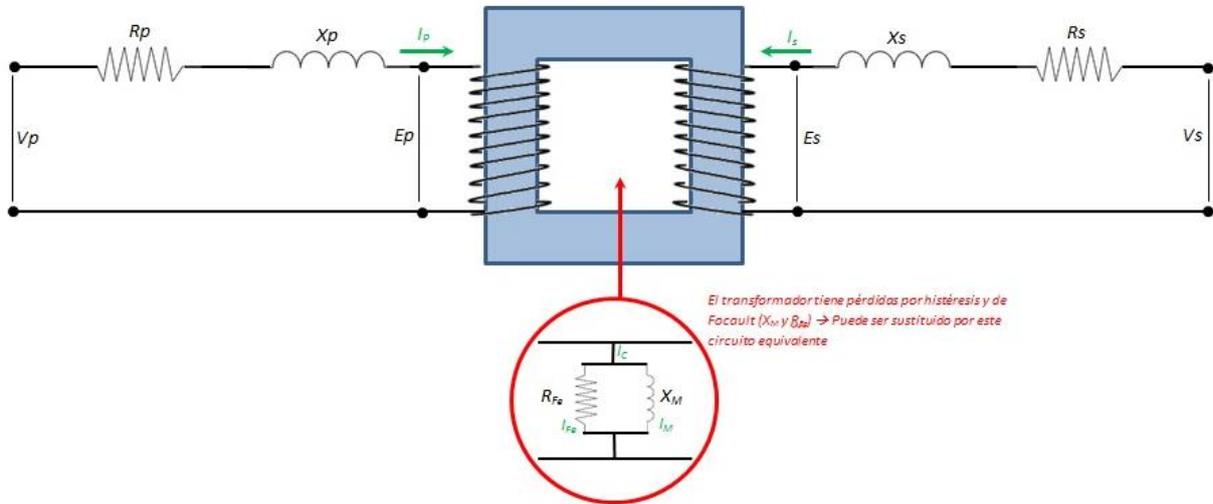


Figura 3: Circuito equivalente de un transformador conectado a la red eléctrica.

En cada devanado se cumple que:

$$E_p = - \frac{d\Phi}{dt} * N_p \rightarrow \vec{V}_p = -\vec{E}_p \rightarrow |\vec{V}_p| = -|\vec{E}_p| \quad (ec. 2)$$

$$E_s = - \frac{d\Phi}{dt} * N_s \rightarrow \vec{V}_s = \vec{E}_s \rightarrow |\vec{V}_s| = |\vec{E}_s| \quad (ec. 3)$$

donde N_p y N_s son el número de espiras del devanado primario y secundario respectivamente.

De la misma forma observando la imagen es posible obtener las expresiones de \vec{E}_s y de \vec{V}_p en función de los parámetros de red.

$$\vec{V}_p = -\vec{E}_p + (R_p + jX_p)\vec{I}_p \quad (ec. 4)$$

$$\vec{E}_s = \vec{V}_s + (R_s + jX_s)\vec{I}_s \quad (ec. 5)$$

Sabiendo que la intensidad que circula por el devanado primario es la suma de la intensidad del secundario partido la relación de transformación (\vec{I}_s') y la intensidad de entrada (I_c) que pasa por el transformador, se obtiene la siguiente expresión:

$$\vec{I}_p = \vec{I}_s' + \vec{I}_c \text{ luego } \vec{I}_s' = \vec{I}_s / r_T \quad (Ec. 6)$$

Parámetro	Devanado secundario →	Devanado primario
Tensión en el devanado secundario	E_s	$E'_s = E_s * r_T$
Sección del bobinado secundario	Sec	$Sec' = Sec/r_T$
Intensidad en el secundario	I_s	$I'_s = I_s/r_T$
Resistencia del secundario	R_s	$R'_s = R_s * r_T^2$
Inductancia del secundario	X_s	$X'_s = X_s * r_T^2$
Impedancia del secundario	Z_s	$Z'_s = Z * r_T^2$

Tabla 3: Conversión de parámetros del devanado secundario referidos al primario.

En el caso de pretender relacionar los parámetros del secundario referidos al devanado primario, es preciso multiplicar o dividir por la relación de transformación de este para poder realizar la conversión. En la tabla 3 se muestra la conversión a realizar para cada uno de los parámetros expuestos en la figura 4. Luego, de la tabla 3 se pueden obtener que las potencias y las tensiones se multiplican por la relación de transformación; las resistencias, inductancias e impedancias se multiplican por la relación de transformación elevada al cuadrado; y que la intensidad se divide.

En cuanto al rendimiento del transformador, la expresión empleada para su cálculo es como la que se muestra a continuación (ecuación 7):

$$\eta = \frac{C * S_N * \cos \varphi}{C * S_N * \cos \varphi + P_{Fe} + C^2 * P_{Cu}} * 100 \text{ (\%)} \text{ (ec. 7)}$$

donde C es el coeficiente o factor de carga del transformador $\rightarrow C = \frac{I}{I_N} = \frac{S}{S_N}$.

La situación de mayor rendimiento se puede obtener realizando la primera derivada de la expresión del rendimiento respecto al factor de carga e igualando a cero (Figura 4):

$$\frac{d\eta}{dC} = 0 \rightarrow \frac{-P_{Fe}N}{C^2} + P_{CuN} = 0 \rightarrow C_{\hat{\eta}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}N}{P_{CuN}}} \text{ (ec. 8)}$$

sabiendo que las pérdidas en el hierro son independientes de la carga ($P_{FeN} = P_{Fe}$) y que las pérdidas en el cobre en una situación determinada (P_{Cu}) de carga respecto a la situación nominal (P_{CuN}) cumple la expresión $P_{Cu} = P_{CuN} * C^2$.

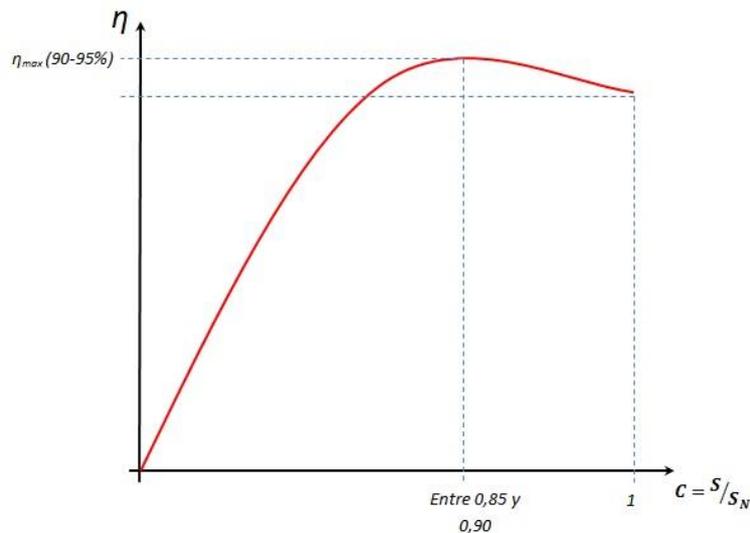


Figura 4: Curva de rendimiento de un transformador.

Esta situación de máximo rendimiento se da para valores de factor de carga (C) próximos a la unidad, en torno a valores situados entre el 0,85 y 0,90, aunque puede darse para valores inferiores. En cuanto al valor del rendimiento que se puede obtener con los transformadores eléctricos la cifra se orienta en valores superiores al 90% de forma usual, incluso cercanos al 99%, siendo mejores cuanto más próximo a la unidad sea el factor de carga, el cual dentro de la red eléctrica suele aproximarse a valores cercanos a 0,9 o mayores.

3.4. Tipos de transformadores reales y simbología empleada

En este subapartado se tratará de realizar una breve aunque completa clasificación de los distintos tipos de transformadores existentes en la actualidad. Para ello se detallan diversas formas de cómo estos pueden clasificarse en función de sus cualidades y parámetros característicos [14].

Una primera clasificación tiene en cuenta el uso que cumple el transformador dentro del circuito eléctrico. En función de ello, se pueden distinguir transformadores destinados a la transformación y transmisión de potencia (transformadores de potencia); los empleados para trabajar con sistemas de telecomunicaciones, con frecuencias y tensiones de trabajo variables (transformadores de comunicaciones); funcionar como elementos de medida, amperímetros, voltímetros, etc. (transformadores de medida); y también como elementos de protección, como pueden ser los empleados en sistemas que tienen circuitos IT o Tierra Independiente (transformadores de protección en quirófanos, etc.).

Otra clasificación se realiza por el número de fases que soporta, siendo los más comunes los transformadores monofásicos y trifásicos, aunque pueden existir variedades para propósitos específicos como son los trafos exafásicos, dodefásicos, etc.

También se pueden clasificar en función de si realizan un aumento o disminución de la tensión en la salida respecto a la entrada, diferenciándose los transformadores elevadores o reductores respectivamente.

Una cuarta clasificación se establece en función de la forma de refrigeración, dentro de la cual existen posibilidades como son la refrigeración en seco, por aceite, en hexafluoruro de hidrógeno (HF₆), etc. ; o si la refrigeración se realiza por medios naturales (aletas, una mayor superficie de intercambio,...) o forzada (mediante la inclusión de ventiladores u otras bombas frigoríficas). Algunas como la refrigeración en aceite están cayendo en desuso.

La última clasificación se realiza en función de la posición que ocupa el transformador dentro de la red eléctrica, existiendo transformadores de Alta y Baja Tensión, de distribución, transformadores urbanos en caseta, rurales, a la intemperie, etc., o en función de su propiedad, si son de cliente o de la compañía suministradora.

En cuanto a la simbología, existe una amplia gama de representación de los transformadores, siendo de las más comunes las que se pueden observar en la figura 5.

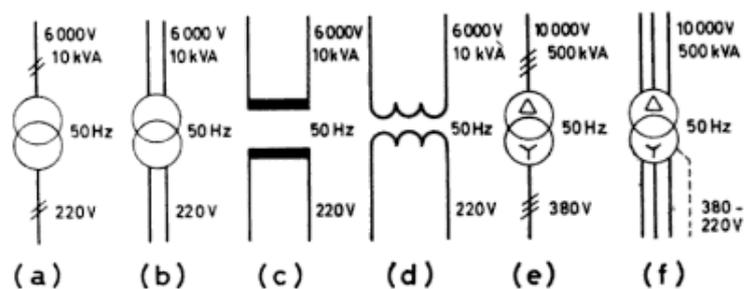


Figura 5: Simbología empleada para la representación de los transformadores en esquemas eléctricos. Fuente: [14]

En transformadores trifásicos, los devanados primario y secundario pueden adquirir diferentes configuraciones en cuanto a su conexión. Las más comunes son las conexiones en estrella y en triángulo o delta. En transformadores de distribución o en estaciones de transmisión, los conexiones de los transformadores serán en triángulo, ya que no existe la necesidad de sacar una línea de neutro. Mientras que en conexiones de baja tensión (en los centros de distribución a baja tensión) la conexión del primario se realizará en tipo delta y la del secundario en tipo estrella, de esta forma se facilita la obtención de una línea de neutro con la que poder obtener tensiones monofásicas. En las figuras 6 y 7 se puede observar un ejemplo de este tipo de conexiones.

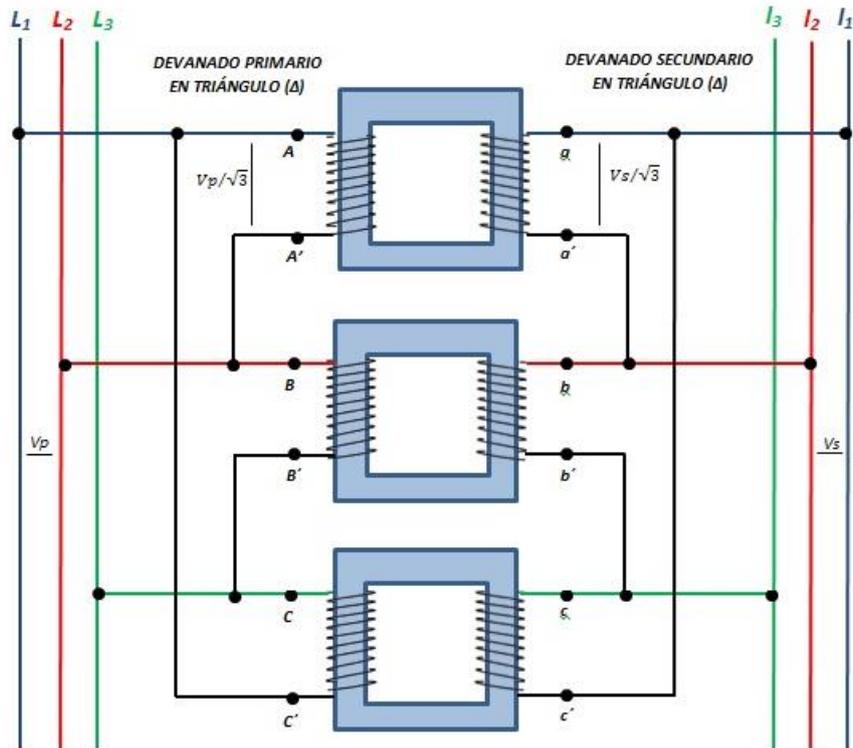


Figura 6: Conexión Triangulo-Triangulo en un transformador trifásico.

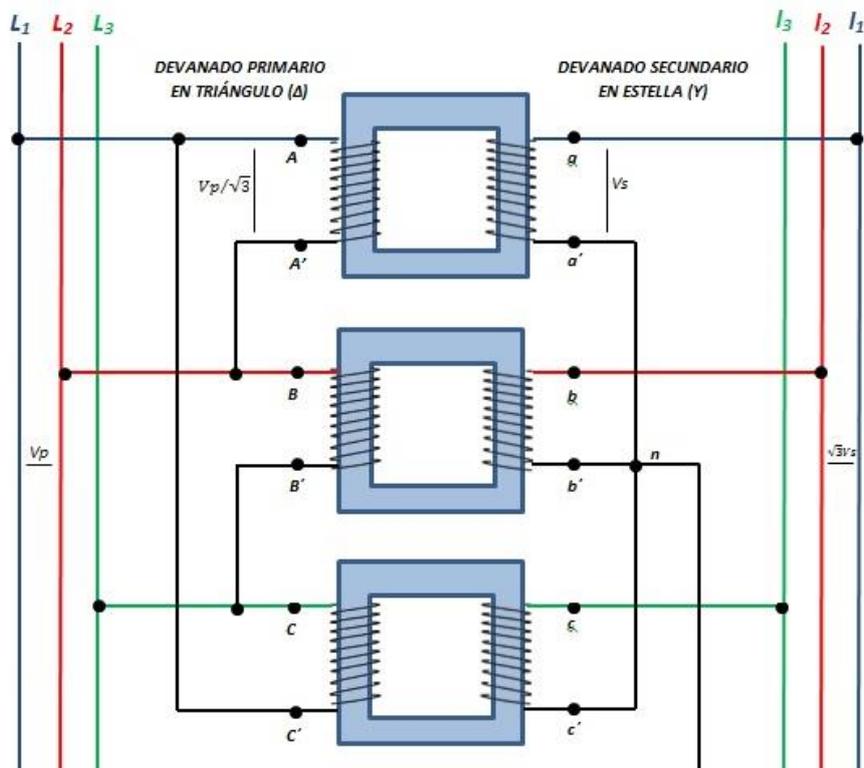


Figura 7: Conexión Triangulo-Estrella en un transformador trifásico.

4. ARMÓNICOS DENTRO DE LAS LÍNEAS DE TRASMISIÓN

4.1. Definición del contenido armónico

El incremento del uso por parte de los consumidores de la red eléctrica e industria de sistemas eléctricos no lineales y elementos que incorporan nuevos materiales semiconductores, diodos, circuitos integrados, etc. está provocando el aumento del nivel de armónicos en las redes de transmisión y distribución.

Los armónicos son generados a partir de la onda sinusoidal base con la que es generada la energía eléctrica, que en caso de los países europeos y la mayor parte del continente asiático tiene una frecuencia de 50 Hz, y en caso del continente americano es de 60 Hz. La energía proveniente de los centros de generación es consumida por los elementos de consumo no lineales, los cuales alteran la forma de dicha senoide al reflejar o transmitir por la línea otras ondas en sentido contrario con una frecuencia múltiplo entero o no de la frecuencia base de la red. Esto provoca que la onda sinusoidal característica que se pretende transmitir (Figura 8) varíe en forma, lo cual puede alterar su valor pico e incluso su valor eficaz [1] (Figura 9).

Los armónicos no son inocuos, y por tanto tienen un efecto negativo sobre la red eléctrica, que se corresponde con un aumento de las pérdidas y por tanto de la potencia perdida durante la transmisión de energía. Uno de los elementos más sensibles a los armónicos son los transformadores, los cuales son susceptibles de sufrir fallos en el aislamiento de forma prematura, o sufrir recalentamientos excesivos, todo ello provocando un aumento de las pérdidas de potencia.

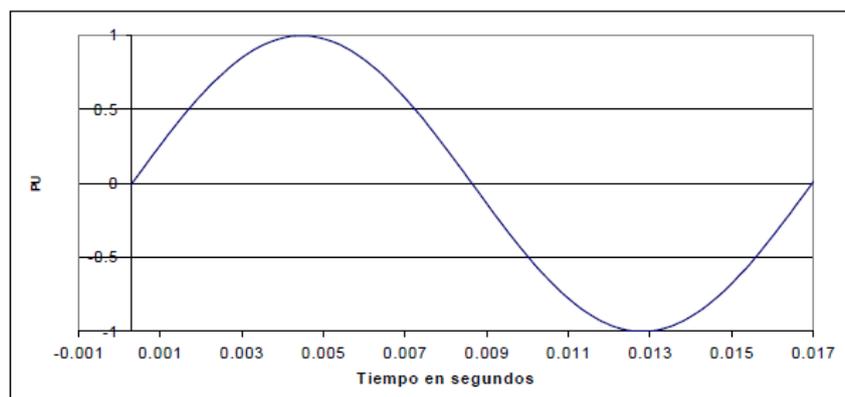


Figura 8: Onda sinusoidal característica de frecuencia 60 Hz. Fuente: J Arcilla.

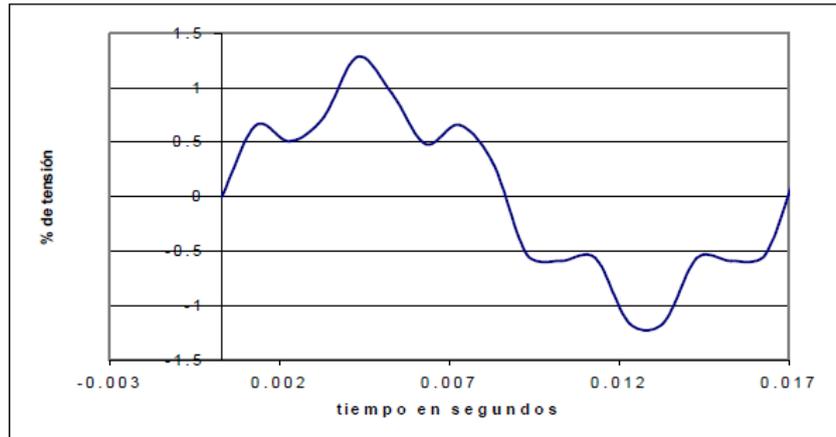


Figura 9: Onda sinusoidal característica afectada por el contenido armónico de la red. Fuente: J Arcilla.

El problema de los armónicos en la red eléctrica no es un problema reciente, aunque es cierto que antes de la llegada de los nuevos semiconductores y circuitos integrados, la mayor globalización de elementos como ordenadores, tecnología móvil, televisores, etc. el contenido armónico de la red no era tan elevado.

4.2. Contenido armónico de la red eléctrica (armónicos más representativos) y análisis de Fourier

Gracias al trabajo del físico y matemático francés Joseph Fourier, se puede demostrar que cualquier onda periódica, sea cual sea su frecuencia y amplitud (onda no sinusoidal), puede descomponerse en una serie de ondas periódicas de diferentes frecuencias y amplitud cuya suma de como resultado la onda original, constituyendo su espectro de frecuencias. Sus estudios en este campo tienen como aplicación el poder obtener de forma adecuada el contenido armónico portado por la red eléctrica mediante la realización de las “Series de Fourier” anteriormente citadas.

El teorema de Fourier puede aplicarse siempre que se cumplan las siguientes condiciones [1]:

- Que la integral de la función que representa a la onda no sinusoidal durante un periodo tenga un valor finito.
- Que la función presente un valor finito de discontinuidades dentro de un mismo periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos dentro de un mismo periodo.

La onda descompuesta mediante series de Fourier presenta la siguiente expresión (ecuación 9):

$$F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)] \text{ (ec. 9)}$$

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{sen}(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{cos}(nx) dx$$

4.3. Origen de los armónicos

El origen de los armónicos, como ya se ha dejado intuir en apartados anteriores, está frecuentemente relacionado con la electrónica de potencia y sistemas no lineales, aunque cualquier carga no lineal fuera de circuitos integrados y elementos electrónicos también puede generar un contenido armónico propio. Algunos de estos elementos se detallan a continuación [1]:

- ✓ Hornos de arco eléctrico u elementos de descarga de arco, como pueden ser la iluminación mediante lámparas fluorescentes. Los hornos de arco no obstante generan un mayor contenido de armónicos de tensión respecto a los de corriente, predominando los valores impares respecto a la onda sinusoidal característica.
- ✓ Los núcleos magnéticos de los propios transformadores o motores y máquinas rotativas en donde el tercer armónico aparece durante las etapas de encendido y energización como consecuencia de la pérdida de linealidad de entre el campo y el flujo magnético.
- ✓ Las propias corrientes de irrupción o “inrush” del transformador, la cual genera un fenómeno transitorio en el núcleo magnético de carácter no lineal durante los primeros instantes de la energización del transformador, llevándolo a una situación próxima a la saturación. Esta corriente puede propiciar la aparición de los armónicos de 2º y 4º orden.
- ✓ Elementos de control y variadores de frecuencia para el control de la velocidad de rotación de ventiladores, bombas, etc.
- ✓ Swichers, elementos de conmutación, elementos electrónicos.
- ✓ Rectificadores de corriente alterna, fuentes conmutadas de energía (por ejemplo las que existen en los elementos cargadores de telefonía móvil, transformadores de ordenadores, televisores, etc.).

- ✓ Inversores de corriente AC/DC y rectificadores HVDC/HVAC.
- ✓ Elementos de compensación de potencia reactiva.

4.4. Efectos de los armónicos sobre la red eléctrica

4.4.1. Sobre las redes de transmisión

Uno de los efectos inmediatos que tiene sobre las líneas un alto contenido armónico es el aumento del efecto *Skin* o pelicular sobre los conductores eléctricos. El efecto *Skin* es un fenómeno dado solamente en las líneas de corriente alterna, y provoca una reducción del área efectiva del conductor, debido a una mayor densidad de corriente en las zonas superficiales del conductor respecto a su núcleo. Este efecto provoca un aumento de las pérdidas del conductor al tener una mayor resistencia (Figura 10). El efecto de una mayor presencia de armónicos provoca mayores inconvenientes. Atendiendo a la expresión que relaciona la resistencia de un conductor con su área, una reducción importante de ésta ante una variación repentina de la densidad de corriente causada por un aumento de la tensión en el interior del cable puede aumentar la resistencia de éste, y por consiguiente las pérdidas de potencia (Figura 11). Dicha expresión se muestra a continuación (ecuación 10):

$$R = \frac{\rho * l}{S} \text{ (ec. 10)}$$

dónde:

- R es la resistencia del cable en ohms [Ω].
- ρ es la resistividad eléctrica característica del material conductor [Ω/m].
- l es la longitud del conductor en metros [m].
- S es la sección u área efectiva del conductor en metros cuadrados [m^2].

El efecto *Skin* no ocurre en conductores sometidos a una corriente continua.

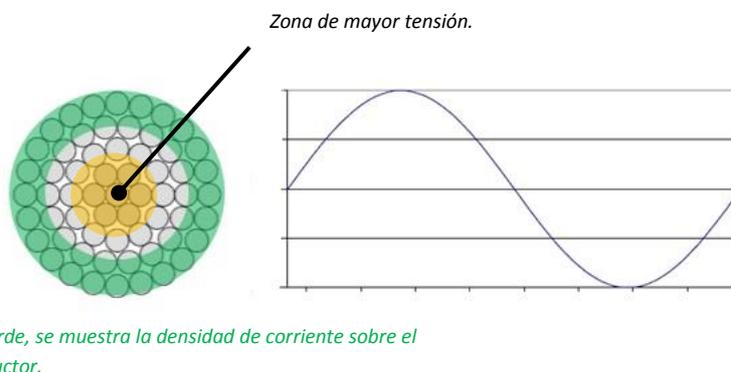


Figura 10: Efecto Skin sobre un conductor eléctrico bajo una onda de corriente sin armónicos.

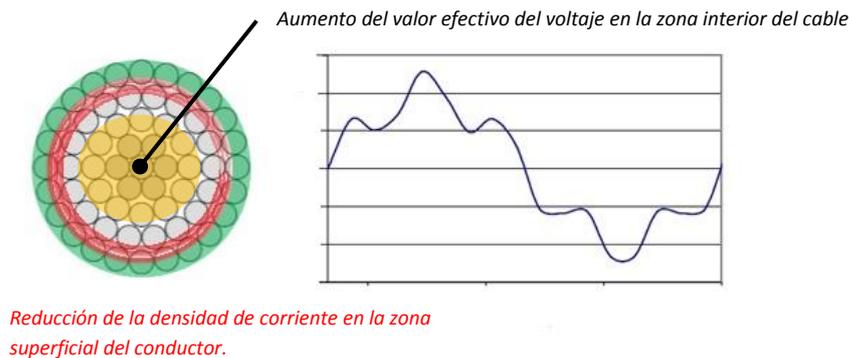


Figura 11: Efecto Skin sobre un conductor eléctrico bajo el efecto de una corriente con contenido armónico.

La siguiente expresión permite calcular como a una mayor frecuencia de onda sobre el conductor, la profundidad del efecto *Skin* disminuye (ecuación 11):

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}} \quad (\text{ec. 11})$$

dónde:

- δ es la profundidad del efecto *Skin* respecto de la superficie del conductor, expresado en metros [m].
- ρ es la resistividad eléctrica característica del material conductor [Ω/m].
- μ es la permeabilidad magnética del vacío [$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m].
- f es la frecuencia [Hz].

El aumento de la resistencia de los cables propicia unas mayores pérdidas, las cuales provocan el sobrecalentamiento de los conductores. Esto obliga a sobredimensionar las secciones de dichos conductores para aguantar las cargas.

Por otra parte, si bien el valor efectivo de la tensión (RMS) aumenta en redes con un mayor contenido en armónicos, en el caso de sistemas trifásicos esto produce un aumento también de la corriente que retorna por el cable neutro, obligando nuevamente a sobredimensionar dicho cable [13].

Igualmente se deben tener en cuenta otros efectos que pueden darse con la presencia de armónicos. Con un mayor contenido de armónicos, la probabilidad de que alguna de dichas frecuencias coincida con la frecuencia natural de algún componente, puede provocar fenómenos de resonancia indeseados en los sistemas capacitivos en inductivos, ocasionando el incremento de dicha resonancia, y repercutiendo en el aumento del armónico. Dicha frecuencia podría causar ya no solo el sobrecalentamiento de los elementos de red, sino la saturación y el fallo de estos (condensadores para la corrección del factor de potencia, otros elementos de distribución, etc.).

Nuevamente un número elevado de armónicos puede provocar un mal funcionamiento de motores y otros dispositivos magnéticos, ordenadores y otros elementos de bajo consumo (pues necesitan de una amplitud correcta de tensión para poder realizar la rectificación de la corriente y funcionar).

4.4.2. Sobre los transformadores de potencia

4.4.2.1. Armónicos triples u homopolares

A diferencia de otros tipos de transformadores, los transformadores de potencia no se sobredimensionan de forma general, lo cual hace que trabajen en regiones próximas a la saturación o en saturación. En este caso, las ondas de corriente que lo atraviesan dejan de ser senoidales, sino que como se ha especificado son una suma de ondas a diferentes frecuencias (serie de Fourier) que forman una onda resultante no senoidal. De entre dichas ondas o armónicos, uno que tiene mayores efectos sobre los transformadores es el tercer armónico, que en la corriente europea por ser de 50 Hz, tendría un valor de 150 Hz. Este armónico suele presentarse con una amplitud mucho mayor a los demás y suele provocar sobretensiones, las cuales pueden deteriorar el aislamiento de las máquinas conectadas al transformador, o del propio transformador, y en casos más extremos su fallo o rotura. En la figura 12 se puede observar la sobretensión generada por el tercer armónico para algunas situaciones.

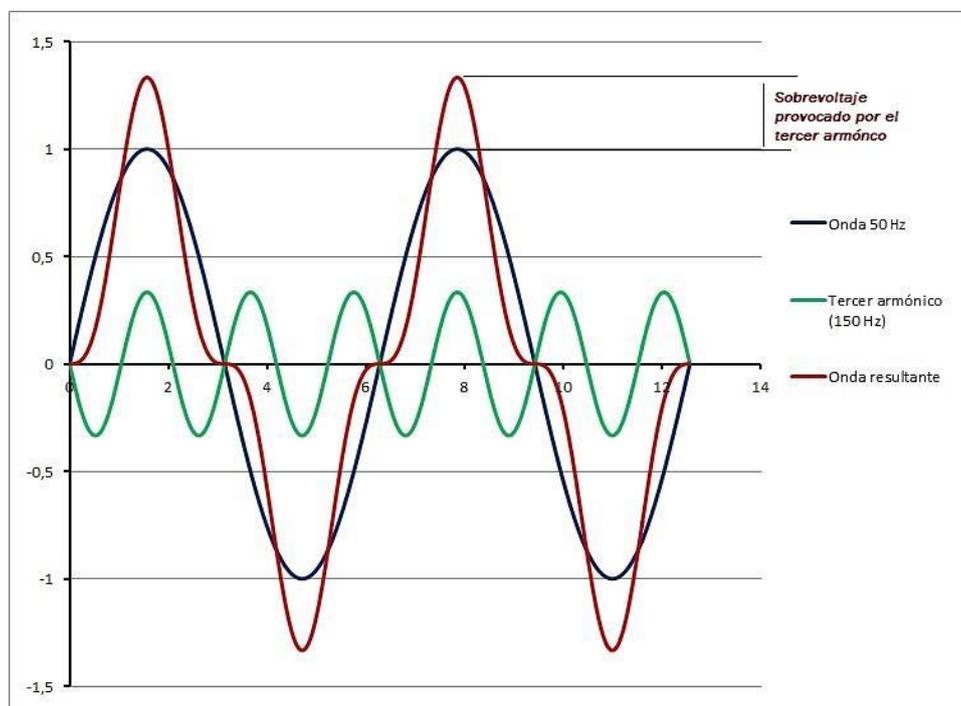


Figura 12: Sobretensión generada por el tercer armónico.

El tercer armónico puede generar diversos problemas en función de cual sea la configuración del transformador. Si disponemos de un transformador trifásico formado por la combinación de 3 transformadores monofásicos que se juntan por una columna común, el resultado sería como el indicado en la figura 13.

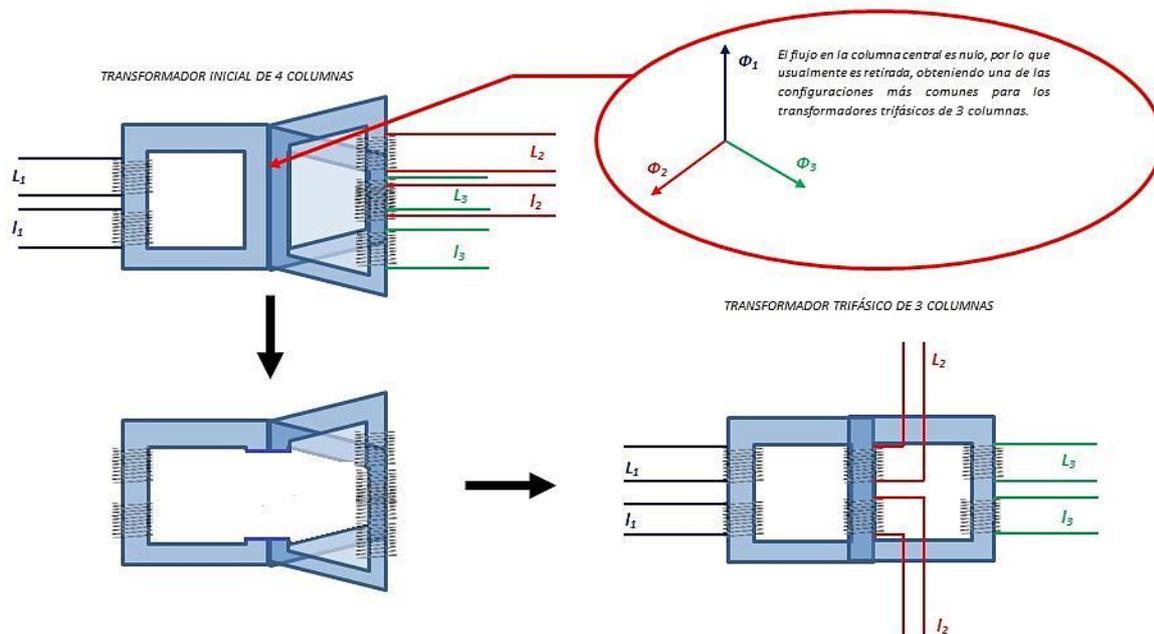


Figura 13: Configuración de un transformador trifásico.

Como se ha visto en la imagen, lo más usual es retirar la cuarta columna común, pues el flujo en teoría a través de ésta es nulo, dando como resultado un transformador trifásico de 3 columnas. Al retirar dicha cuarta columna y en presencia de armónicos, el flujo magnético generado por el tercer armónico presenta problemas para poder circular por el núcleo del transformador. En un transformador se ha de cumplir la relación $N * I = R_m * \Phi$, en donde N es el número de espiras, I es la intensidad sobre el devanado, R_m es la reluctancia magnética y Φ es el flujo magnético. Suponiendo que el producto de $N * I$ permanece constante, al retirar la cuarta columna se aumenta el valor de la reluctancia magnética, con lo que el flujo debido al tercer armónico se vería decrementado para poder satisfacer la ecuación. Las sobretensiones en transformadores trifásicos son menores que la misma situación con tres transformadores monofásicos realizando la misma transformación.

Ahora en función de la configuración de los devanados, la sobretensión generada puede ser mayor o menor.

En conexiones de transformadores tipo estrella, como la empleada en los centros de transformación de baja tensión, el tercer armónico presenta un gran inconveniente. En este tipo de conexiones, del punto en común de los devanados se saca un cable neutro con objeto de poder obtener líneas de tensión monofásicas con las que alimentar las cargas de los consumidores finales. El tercer armónico y el resto de múltiplos de tres (armónicos homopolares), los llamados armónicos triples (armónicos 3, 9, 15, 21,...) presentan

problemas de circulación a través de los devanados del transformador, lo cual provoca la presencia de corrientes parásitas a través del neutro. En sistemas perfectamente equilibrados, las corrientes que circulan por el neutro no son significativas, pues se anulan. No obstante, las corrientes generadas por el tercer armónico sobre el neutro son tres veces superiores a las corrientes que genera el mismo armónico sobre cada una de las fases del transformador trifásico (Figura 14) [12], como se observa de las siguientes ecuaciones en donde se obtienen sendas expresiones del tercer armónico y armónicos triples para cada fase.

$$I_{L1} = I_0 \sin(\omega_0 t + 0^\circ) \rightarrow 3^{er} \text{ armónico: } I_{3k L1} = I_0 \sin(3 * \omega_0 t + 3 * 0^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k L1} = 3I_0 \sin(\omega_0 t) \text{ (ec. 12)}$$

$$I_{L2} = I_0 \sin(\omega_0 t + 120^\circ) \rightarrow 3^{er} \text{ armónico: } I_{3k L2} = I_0 \sin(3 * \omega_0 t + 3 * 120^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k L2} = I_0 \sin(3\omega_0 t + 360^\circ) \rightarrow I_{3k L2} = 3I_0 \sin(\omega_0 t) \text{ (ec. 13)}$$

$$I_{L3} = I_0 \sin(\omega_0 t + 240^\circ) \rightarrow 3^{er} \text{ armónico: } I_{3k L3} = I_0 \sin(3 * \omega_0 t + 3 * 240^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k L3} = I_0 \sin(3\omega_0 t + 720^\circ) \rightarrow I_{3k L3} = 3I_0 \sin(\omega_0 t) \text{ (ec. 14)}$$

De las expresiones anteriores se puede comprobar la homopolaridad de los armónicos triples de secuencia "3k", donde k es un número entero entre el 1 e infinito. Los armónicos triples son frecuentemente originados debido a cargas desequilibradas en líneas trifásicas o elementos de conmutación electrónica. El hecho de que se encuentren en fase con la onda de frecuencia natural hace que los picos de ambas ondas coincidan, lo cual provoca sobretensiones mayores a otros armónicos como los de secuencia directa e inversa (Figura 12).

Es reseñable que si el cable neutro del transformador no ha sido calculado para soportar una gran intensidad de corriente¹, presentará problemas de calentamiento debido a la mayor densidad de corriente que soporta, además de posibles vibraciones de la línea debidos a la presencia de un armónico de elevada frecuencia, lo cual genera a su vez ruidos molestos en el caso de zonas habitadas, puesto que la vibración se encuentra ya dentro de la zona audible del ser humano.

¹ Según las disposiciones del Reglamento Electrotécnico de baja tensión, en donde el cable neutro es más empleado, permite que la sección de dicho cable sea la mitad de la sección de los cables de fase a partir de una sección de 25 mm² tanto para cables de cobre como de aluminio según la ITC BT 07 (tabla 1).

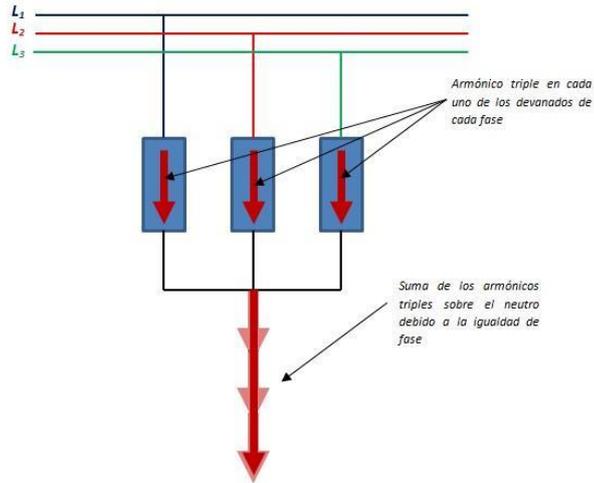


Figura 14: Suma de los armónicos triples (homopolares) sobre el conductor neutro de un transformador trifásico conexión en estrella.

Todo ello se ha presentado como si el sistema solamente presentase cargas equilibradas. En el momento de incluir algún tipo de desequilibrio de cargas a la corriente generada por los armónicos, también ha de sumarse la correspondiente intensidad de corriente generada por el desequilibrio, obteniendo una corriente total que se puede expresar mediante la ecuación 11:

$$I_{Neutro} = \sqrt{I_{Desequilibrio}^2 + I_{Suma_armónico_3}^2} \quad (ec. 11)$$

Si el transformador no dispusiese de cable neutro conectado a tierra o de cuarto cable, y solamente tuviese neutro flotante, la sobretensión generada sobre cada devanado sería bastante elevada, puesto que el tercer armónico quedaría atrapado dentro del transformador.

Por ello, suele ser una buena práctica durante las fases de diseño de las instalaciones eléctricas, que en aquellos casos en donde se prevea la existencia de un fuerte contenido armónico, la sección del cable neutro coincida con las de la de las fases.

Si por el contrario se dispone de una configuración en triángulo o delta, ampliamente utilizada en la transmisión de energía en alta tensión donde no existe la necesidad de sacar una línea neutra, los armónicos triples no presentan un problema de sobretensiones tan grave como en el caso anterior. En el presente escenario, el tercer armónico si puede circular de forma libre entre los bornes de cada devanado, lo cual no podía en conexión estrella. Esta circulación con normalidad hace que no exista sobretensión sobre los devanados debido a la presencia de estos armónicos triples u homopolares. En contra, dichos armónicos quedarían de forma permanente encerrados en el transformador (Figura 15), no transmitiéndose por la línea, aunque aumentando el sobrecalentamiento de los devanados debido al aumento de pérdidas debidas al efecto Joule.

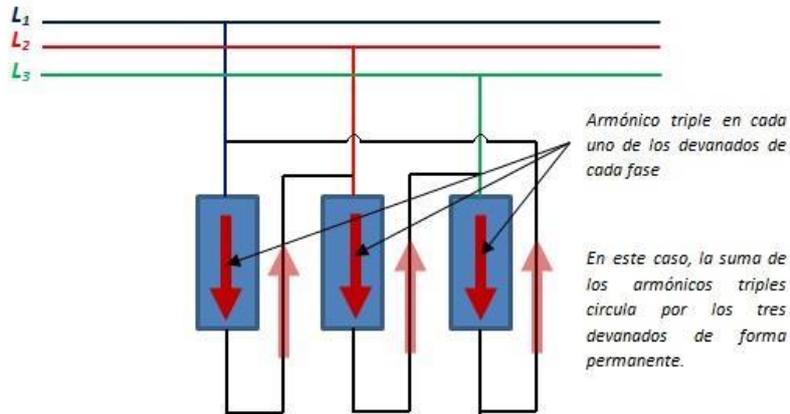


Figura 15: Circulación de los armónicos triples sobre un transformador en conexión delta.

Existe una última configuración a estudiar, la cual resulta de la combinación de las dos conexiones anteriores y recibe el nombre de conexión en Zig-Zag. Cada uno de los devanados se parte por la mitad, y una se conecta en estrella y la otra en triángulo. En este caso las sobretensiones generadas en cada uno de los devanados debido a la circulación de las componentes de corriente provocadas por los armónicos triples se suman y restan de forma que la sobretensión existe sobre cada uno de los devanados de forma individual, pero su suma se hace imperceptible fuera del transformador. En este caso la sobretensión pasaría inadvertida aunque existiese, la cual puede observarse tras la realización del triángulo de tensiones sobre el transformador (Figura 16). Dicha sobretensión solo se haría visible midiendo la tensión sobre cada devanado.

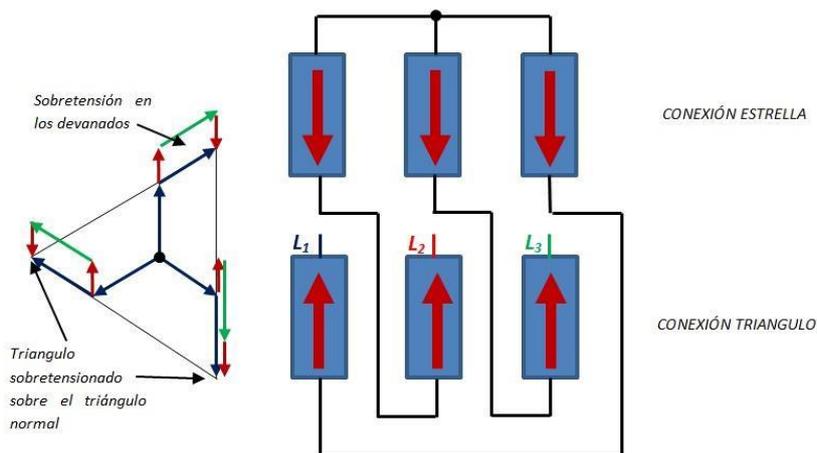


Figura 16: Suma de los armónicos triples sobre un transformador conectado en Zig-Zag.

La conexión tipo Zig-Zag ayuda a que ciertos armónicos sean cancelados además de compensar los desequilibrios de la carga en la línea.

Por último lugar, solo se han considerado las repercusiones de dichos armónicos sobre uno de los dos devanados dependiendo del tipo de conexionado que presente. Existen configuraciones bajo las cuales hay una mayor transmisión de los armónicos entre los devanados. Esto ocurre cuando tenemos configuraciones tipo estrella-estrella, con los neutros conectados a tierra, situación en la que los armónicos triples fluirán sin más impedimento que las propias pérdidas generadas por la impedancia del camino a tierra entre ambos devanados, por lo que estarán presentes en ambos bobinados en iguales proporciones [12].

4.4.2.2. Armónicos de secuencia directa (positivos) y de secuencia inversa (negativos)

Otro tipo de armónicos que igualmente se generan al manejar cargas no lineales son los armónicos de secuencia directa e indirecta, que se diferencian de los homopolares en que estos siguen una secuencia en sentido contrario a las agujas del reloj (directa) o en sentido de las agujas del reloj (inversa).

➔ Armónicos de secuencia directa ("3k+1") ➔ h=1, 4, 7,10...:

Para obtener los armónicos pares e impares de secuencia directa basta con multiplicar la amplitud y el desfase de cada una de las fases por un múltiplo de la serie "3k+1", con K=0, 1, 2, 3,...

$$I_{L1} = I_0 \sin(\omega_0 t + 0^\circ) \rightarrow 4^\circ \text{armónico: } I_{3k+1 L1} = I_0 \sin(4 * \omega_0 t + 4 * 0^\circ) \rightarrow$$

$$I_{4 L1} = 4 \sin(\omega_0 t) \rightarrow I_{3k+1 L1} = (3k + 1) \sin(\omega_0 t) \text{ (ec. 15)}$$

$$I_{L2} = I_0 \sin(\omega_0 t + 120^\circ) \rightarrow 4^\circ \text{armónico: } I_{3k+1 L2} = I_0 \sin(4 * \omega_0 t + 4 * 120^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k+1 L2} = I_0 \sin(2\omega_0 t + 480^\circ) \rightarrow I_{4 L2} = I_0 \sin(4\omega_0 t + 120^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k+1 L2} = I_0 \sin((3k + 1)\omega_0 t + 120^\circ) \text{ (ec. 16)}$$

$$I_{L3} = I_0 \sin(\omega_0 t + 240^\circ) \rightarrow 4^\circ \text{armónico: } I_{3k+1 L3} = I_0 \sin(4 * \omega_0 t + 4 * 240^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k+1 L3} = I_0 \sin(2\omega_0 t + 960^\circ) \rightarrow I_{4 L3} = I_0 \sin(2\omega_0 t + 240^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k+1 L2} = I_0 \sin((3k + 1)\omega_0 t + 240^\circ) = I_0 \sin((3k + 1)\omega_0 t - 120^\circ) \text{ (ec. 17)}$$

La secuencia se comprueba que es directa al ser igual a la de la frecuencia fundamental ➔
Secuencia directa: $I_{3k+1 L1} \rightarrow I_{3k+1 L3} \rightarrow I_{3k+1 L2}$

➔ Armónicos de secuencia inversa (“3k-1”) → 2, 5, 8, 11...:

Para obtener los armónicos pares e impares de secuencia inversa basta con multiplicar la amplitud y el desfase de cada una de las fases por un múltiplo de la serie “3k-1”, con K=1, 2, 3,...

$$I_{L1} = I_0 \sin(\omega_0 t + 0^\circ) \rightarrow 2^\circ \text{armónico: } I_{3k-1 L1} = I_0 \sin(2 * \omega_0 t + 2 * 0^\circ) \rightarrow$$

$$I_{2 L1} = 2 \sin(\omega_0 t) \rightarrow I_{3k-1 L1} = (3k - 1) \sin(\omega_0 t) \text{ (ec. 18)}$$

$$I_{L2} = I_0 \sin(\omega_0 t + 120^\circ) \rightarrow 2^\circ \text{armónico: } I_{3k-1 L2} = I_0 \sin(2 * \omega_0 t + 2 * 120^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k-1 L2} = I_0 \sin(2\omega_0 t + 240^\circ) \rightarrow I_{2 L2} = I_0 \sin(2\omega_0 t - 120^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k-1 L2} = I_0 \sin((3k - 1)\omega_0 t - 120^\circ) \text{ (ec. 19)}$$

$$I_{L3} = I_0 \sin(\omega_0 t + 240^\circ) \rightarrow 2^\circ \text{armónico: } I_{3k-1 L3} = I_0 \sin(2 * \omega_0 t + 2 * 240^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k-1 L3} = I_0 \sin(2\omega_0 t + 480^\circ) \rightarrow I_{2 L3} = I_0 \sin(2\omega_0 t + 120^\circ) \rightarrow$$

$$I_{3k-1 L2} = I_0 \sin((3k - 1)\omega_0 t + 120^\circ) \text{ (ec. 20)}$$

La secuencia se comprueba que es indirecta al ser contraria a la de la frecuencia fundamental → Secuencia inversa: $I_{3k-1 L1} \rightarrow I_{3k-1 L2} \rightarrow I_{3k-1 L3}$

Tanto los armónicos de secuencia directa como inversa son generados por la existencia de cargas no lineales conectadas a la red y sus efectos sobre los equipos conectados a la red o sobre ésta son diversos, tales como el calentamiento y deterioro de cables, protecciones y aislamientos, el disparo inadecuado de protecciones, entre otros.

En la tabla 4 se puede observar cual es el orden de los primeros armónicos respecto a la frecuencia fundamental de la red.

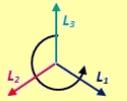
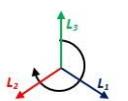
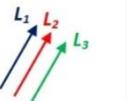
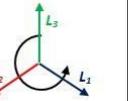
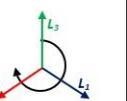
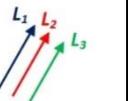
Orden del armónico	Fundamental	2	3	4	5	6
Frecuencia 50 Hz (sistema euroasiático)	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz
Frecuencia 60 Hz (Sistema americano)	60 Hz	120 Hz	180 Hz	240 Hz	300 Hz	360 Hz
Secuencia	Directa	Inversa	Homopolar	Directa	Inversa	Homopolar
						

Tabla 4: Secuencia, orden y frecuencia de los primeros armónicos.

Un efecto curioso que se da en los armónicos de orden par (2, 4, 6,...) es que la onda tiene la misma forma sobre los semiciclos positivos y los negativos, por lo que de forma usual suelen anularse por sí solos o disminuir en amplitud [5]. Por el contrario los armónicos impares suelen persistir mucho más, siendo los de mayor amplitud. Estos últimos tienen un origen mucho más localizado, casi siempre en rectificadores de onda o corrientes geomagnéticas inducidas.

Existen otros fenómenos como los llamados “Componentes de frecuencia”, los cuales tienen efectos igualmente negativos. Dichos son los subarmónicos (en frecuencias por debajo de la fundamental de la red pero no siendo múltiplos de esta). Reducir la frecuencia de la red puede tener efectos no deseados, como retaso de relojes que funcionen con circuitos RC como oscilador (puente de Wien) o la reducción de la velocidad de ventiladores y motores que no contengan otras formas de modulación de la frecuencia. Por encima de la frecuencia fundamental, pero igualmente no siendo múltiplos de esta, se encuentran los Interarmónicos, los cuales tienen su origen precisamente en máquinas de inducción como motores con control de velocidad por frecuencia, ordenadores y elementos de comunicación que emplean anchos de banda en MHz o GHz, etc.

En último lugar, se pueden nombrar otros dos tipos de armónicos: los espaciales, producidos por el paso de corriente por bobinados distribuidos espacialmente, o bobinados y el núcleo del transformador, o motores con formas no sinusoidales, en parte provocado por la presencia de otros armónicos. En estos, la frecuencia del armónico depende del ángulo de giro (ángulo espacial) en máquinas rotatorias. Y el armónico de tiempo, generados por máquinas cuyas corrientes pueden no variar sinusoidalmente con el tiempo, como es el caso de motores eléctricos con inversores.

El efecto que en general tienen los armónicos sobre los transformadores se pueden resumir en los siguientes puntos:

- ✓ Sobrecalentamiento de los conductores de los devanados.
- ✓ Aumento de las pérdidas magnéticas y por efecto Joule.
- ✓ Calentamiento anormal del fluido refrigerante del transformador.
- ✓ Deterioro prematuro del aislamiento.
- ✓ Reducción del rendimiento de la transformación.
- ✓ Funcionamiento ruidoso.
- ✓ Posibilidad de amplificación del contenido armónico debido a los efectos de la resonancia.
- ✓ Saturación del transformador.
- ✓ Disminución de la vida útil.

Todo ello hace que los transformadores a través de los cuales sea susceptible que fluya una corriente con un alto contenido armónico no puedan funcionar a su nivel nominal, sino que

es necesario disminuir su carga con efecto de no provocar su fallo antes de alcanzar el límite de diseño. Esto se conoce con el nombre de “desclasificación del transformador”, lo cual se realiza mediante el cálculo de un factor “k” que permite conocer el régimen de funcionamiento al que debe trabajar el transformador en función de la tasa de distorsión armónica o THD (*Total Harmonic Distortion*).

4.4.3. Sobre otros elementos de la red

Los armónicos también tienen una amplia influencia sobre otros elementos débiles de la red. Tales son los efectos sobre los condensadores o capacitores, los cuales pueden causar la resonancia y amplificación del contenido armónico de la red, causando su envejecimiento prematuro y en algunos casos severos su destrucción.

En los motores eléctricos los efectos suelen ser similares a los de los transformadores, provocando mayores pérdidas, sobrecalentamientos y vibraciones. Sobre los equipos de medida, el contenido armónico puede invalidar las medidas, crear interferencias, etc. En equipos de comunicación puede provocar el envío y recepción de alto contenido en ruido, interferencias, etc. Por último, en equipos de protección y control, el contenido armónico puede provocar el disparo anormal de las protecciones, fallos o anomalías, etc.

Debido a que dichos efectos no son objeto de estudio de este trabajo, para una mayor profundización se debe consultar la bibliografía al final del informe, en especial [1] [5] [12].

4.5. Cálculo de parámetros significativos referentes al contenido armónico en transformadores

En este subapartado se detallan algunas de las fórmulas que serán empleadas en el capítulo 6 de este trabajo, para la realización de las simulaciones. Estos parámetros se centran en la obtención de resultados a partir del estudio de los transformadores, por lo que para una mayor profundización en dicho campo, se recomienda consultar con la bibliografía.

4.5.1. Valor promedio de una onda no sinusoidal (I_{prom})

$$I_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T (I_1 + I_{DC} + I_{desequilibrio} + I_{armónicos}) dt \quad (ec. 21)$$

dónde:

- T es el periodo.
- I_1 es la amplitud de la frecuencia fundamental.
- I_{DC} es la amplitud de señales continuas.
- $I_{desequilibrio}$ es la amplitud provocada por un desequilibrio de cargas.

- $I_{armónicos}$ son las amplitudes de los armónicos correspondientes. $I_{armónicos} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + \dots$

4.5.2. Valor promedio cuadrático (RMS) de una onda no sinusoidal (I_{rms})

$$I_{rms} = \left[I_{DC} + \left(I_{rms}^{(1)} \right)^2 + \left(I_{rms}^{(2)} \right)^2 + \left(I_{rms}^{(3)} \right)^2 + \left(I_{rms}^{(3)} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \text{ (ec. 22)}$$

dónde:

- I_{DC} es la amplitud de señales continuas.
- $I_{rms}^{(n)}$ es el valor promedio cuadrático (RMS) de cada una de las ondas fundamentales y armónicas, en donde dicho valor se define como $I_{rms}^{(x)} = I_{max}/\sqrt{2}$, siendo I_{max} el valor de amplitud máxima.

4.5.3. Factor de forma (Form Factor) de la onda no sinusoidal (FF)

Evalúa cuan idénticos son el valor promedio y el valor RMS de la onda:

$$FF = \frac{I_{rms}}{I_{prom}} \text{ (ec. 23)}$$

Si la onda no contiene armónicos ni ningún otro tipo de distorsión provocado por el desequilibrio de cargas o contenido en continua, dicho factor será próximo a uno. Conforme el contenido armónico aumenta, dicho valor crece.

4.5.4. Factor de ondulación (Ripple Factor) de una onda no sinusoidal (RP)

Mide el grado de ondulación de la onda respecto a una señal continua:

$$RP = \frac{I_{AC}}{I_{DC}} = \frac{\sqrt{(I_{rms})^2 - (I_{DC})^2}}{I_{DC}} \rightarrow \sqrt{FF^2 - 1} \text{ (ecs. 24 y 25)}$$

Dónde:

- I_{AC} es la amplitud del contenido alterno de la onda.
- I_{DC} es el contenido continuo de la onda.

4.5.5. Factor de contribución de cada armónico (Harmonic Factor)(HF_n)

Indica la contribución que tiene cada armónico sobre la onda no sinusoidal una vez se ha descompuesto mediante la transformada de Fourier.

$$HF_n(\%) = \frac{I_{rms}^{(n)}}{I_{rms}^{(1)}} \times 100 \text{ (ec. 26)}$$

dónde:

- $I_{rms}^{(n)}$ es el valor promedio cuadrático (RMS) de cada una de las ondas armónicas cuya contribución se desea medir.
- $I_{rms}^{(1)}$ es el valor RMS de la onda fundamental.

Este valor será tanto más elevado cuanto más elevado sea el valor RMS del armónico seleccionado, y cero cuando la contribución de este sea nula.

Se emplea para designar al primer armónico cuya frecuencia sea más parecida a la de la fundamental y su amplitud sea mayor o igual al 3% de la fundamental.

4.5.6. Factor de distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) (THD)

Este parámetro es ampliamente utilizado para la caracterización de sistemas, además de ser empleado por organismos como ANSI, IEC o IEEE para limitar y regular el contenido armónico de las redes eléctricas. Se define como:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (ec. 27)$$

dónde:

- I_n es la amplitud del armónico de orden n ($n=2, 3, 4, \dots$).
- I_1 es la amplitud de la onda fundamental.

Se puede observar que si la onda no contiene una excesiva amplitud continua ni debida a desequilibrios de cargas, se puede obtener una relación entre el valor I_{rms} (ec. 22) y THD (ec. 27) despejando de la ecuación anterior, el cual se puede ver en la expresión 28:

$$I_{rms} = I_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (ec. 28)$$

4.5.7. Factor de desclasificación de un transformador (K)

La definición de dicho factor depende del sistema empleado. Si empleamos el sistema americano, la expresión utilizada suele ser la siguiente:

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} (I_n)^2 \cdot n^2 \quad (ec. 29)$$

Mientras que la expresión empleada en el sistema euroasiático toma la siguiente forma:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{e + 1} \left(\frac{I_1}{I_{rms}}\right)^2 \sum_{n=2}^{\infty} \left(n \cdot \left(\frac{I_1}{I_{rms}}\right)^2\right)} \quad (ec. 30)$$

En la tabla 5 se muestra un rango aproximado para los transformadores en función del número de cargas no lineales conectadas.

Carga no lineal	Factor K
Contenido armónico producido < 5%	1
Contenido armónico producido < 35%	4
Contenido armónico producido < 50%	7
Contenido armónico producido < 75%	13
Contenido armónico producido < 100%	20

Tabla 5: Factor K en función de la carga no lineal conectada. Fuente: [4]

5. NORMATIVA REFERENTE A LA DESIGNACIÓN Y LIMITACIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO

En este apartado el objetivo perseguido es poder dar a conocer algunos de los organismos principales y la normativa referente a la designación y limitación del contenido armónico dentro de la red eléctrica. Algunos de los organismos más citados son el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, traducido del inglés “*Institute of Electrical and Electronics Engineers*”), la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, traducido del inglés “*International Electrotechnical Commission*”) y el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, traducido del inglés “*American National Standards Institute*”), entre otras.

En cuanto a la normativa empleada, a continuación se muestra un pequeño listado de las más importantes:

- ✓ *IEEE 519-2014 (IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control In Electronic Power Systems) :*

Este estándar tiene como objetivo el limitar el número de armónicos con efectos negativos sobre la red, reduciendo así los riesgos potenciales sobre la aparamenta eléctrica. Sus principios de actuación establecen formas para reducir la emisión de armónicos de corriente por parte de todos los usuarios de manera equitativa, además de ofrecer formas a cada operador del sistema para limitar y mejorar la distorsión armónica hacia unos valores razonables.

Para la aplicación de dicha normativa los equipos de medida deben cumplir con la IEC 61000-4-7 y la IEC 61000-4-30. Se establece que el mínimo tiempo escogido para realizar las mediciones sea de 12 ciclos para 60 Hz, y de 10 ciclos para 50 Hz (unos 200 ms aprox. En ambos casos).

También establece límites a las distorsiones de armónicos tanto para tensión como para corriente, para un rango de tensión entre 120 V y 161 kV (tablas 6 y 7).

Tensión en el punto de conexión común (PCC)	Contribución Individual de cada Armónico (%)	Distorsión Armónica Total (THD) (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1,0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5*

**Los sistemas de alto voltaje pueden tener un THD de hasta un 2,0% cuando la causa de las distorsiones sea un terminar tipo HVDC cuyos efectos habrán sido atenuados en los puntos de la red donde los futuros usuarios puedan ser conectados.*

Tabla 6: Limite de las distorsiones de voltaje. Fuente: IEEE-519-2014.

Distorsión máxima permitida en armónicos de corriente en porcentaje de la intensidad de demanda máxima de línea (I_L) a la frecuencia fundamental						
Orden de los armónicos impares ^{a, b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

^a Los límites de los armónicos pares son el 25% de los límites de los armónicos impares.

^b La distorsiones de corriente producidas por compensaciones DC, convertidores de media onda, etc. no están permitidas.

^c Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores, independientemente del valor del cociente I_{SC}/I_L actual, en donde I_{SC} es la intensidad de cortocircuito en el punto de conexión común.

Tabla 7: Límites de los armónicos de corriente para los sistemas entre 120 V y 69 kV.

- ✓ Estándar IEC 61000-2-5 (clasificación de los entornos electromagnéticos y requisitos de inmunidad específicos a cada aplicación):

El ambiente electromagnético está en constante cambio y este estándar al igual que todos los de la serie 61000-2-X están siendo revisados de forma continua para ofrecer una visión más global de hechos que ocurren en la actualidad, antes no reflejada. Dicho estándar clasifica los efectos electromagnéticos y recomienda determinadas formas para inmunizar los equipos. Introduce el término de “compatibilidad electromagnética” para evaluar el nivel máximo que una determinada perturbación puede llegar a tener para no provocar excesivas interferencias en otros sistemas. En la tabla 8 se puede observar la compatibilidad entre el fenómeno electromagnético y su correspondiente estándar.

Electromagnetic phenomenon	Basic standard
Conducted low-frequency phenomena – harmonics, interharmonics – signalling voltages – voltage fluctuations – voltage dips and interruptions – voltage unbalance – power-frequency variations – induced low-frequency voltages – DC in AC networks	IEC 61000-4-13 IEC 61000-4-14 IEC 61000-4-11 IEC 61000-4-27 IEC 61000-4-28 IEC 61000-4-16
Radiated low-frequency phenomena – magnetic fields – electric fields	IEC 61000-4-8
Conducted high-frequency phenomena – induced CW voltages or currents – unidirectional transients – oscillatory transients	IEC 61000-4-6 IEC 61000-4-4, IEC 61000-4-5 IEC 61000-4-12, IEC 61000-4-18
Radiated high-frequency phenomena – magnetic fields – electric fields – electromagnetic fields	IEC 61000-4-9, IEC 61000-4-10 IEC 61000-4-3
Electrostatic discharge phenomena (ESD)	IEC 61000-4-2

Tabla 8: Fenómenos electromagnéticos clasificados por su estándar IEC. Fuente: IEC 6100-2-5 Jaekel, B., Ogunsola, A., Sandrolini, L.

6. SIMULACIONES

6.1. Transformador trifásico reductor con cargas lineales (sin contenido armónico)

Previamente a realizar las simulaciones del transformador introduciéndole cargas no lineales o un contenido armónico definido, se ha procedido a caracterizar y analizar cuál es el comportamiento del transformador ante determinadas cargas conectadas, que posteriormente se van a estudiar introduciéndoles el citado contenido armónico.

Para poder realizar este primer apartado, se comprobarán parámetros como la forma de las ondas de corriente y tensión, tanto para el primario como para el secundario, sus valores RMS, caídas de tensión a distintos niveles de carga, además de realizar un balance de potencias para poder comprobar las pérdidas de dicho transformador. Todo ello se realizará aplicando como herramienta de simulación el software PSCAD, con objeto de poder comprobar si efectivamente se puede emplear para realizar estudios de esta categoría.

Las características y parámetros del transformador son los que a continuación se describen:

- ✓ Potencia aparente del transformador (S): 1 MVA
- ✓ Frecuencia operacional: 50 Hz
- ✓ Tensión nominal de línea en el primario (U_{NL1}): 20 kV
- ✓ Tensión nominal de línea en el secundario (U_{NL2}): 400 V
- ✓ Intensidad nominal de línea del primario (I_{NL1}): 28,87 A
- ✓ Intensidad nominal de línea del secundario (I_{NL2}): 1443,38 A

Se han escogido valores nominales comunes a los que se pueden encontrar en transformadores reales, de forma que los resultados obtenidos mediante este trabajo pudiesen servir para ser comparados en un futuro con el funcionamiento de un transformador real. Igualmente, se prefiere escoger valores que en caso de ser adecuados puedan ser comparados también con otras simulaciones realizadas con otros programas y sean fácilmente reproducibles.

Antes de comenzar con las simulaciones, variando tanto el conexionado de los bobinados como el índice de carga, se ha procedido a la realización de los ensayos de vacío y cortocircuito para posteriormente obtener las resistencias de cortocircuito y vacío con las que calcular las pérdidas a cada nivel de carga. En primer lugar se han editado los parámetros del transformador, los cuales se indican en la figura 17.

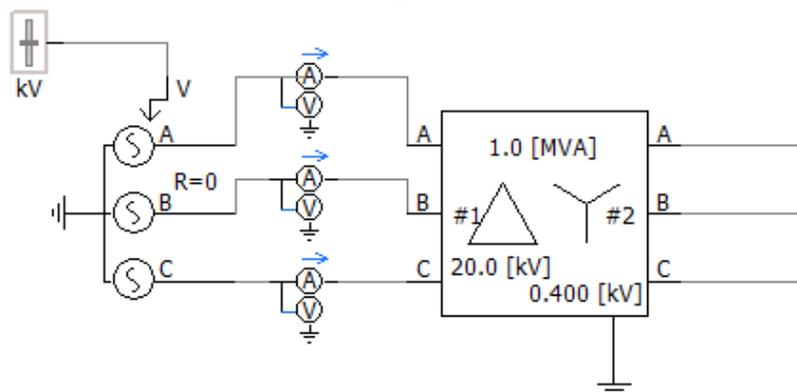
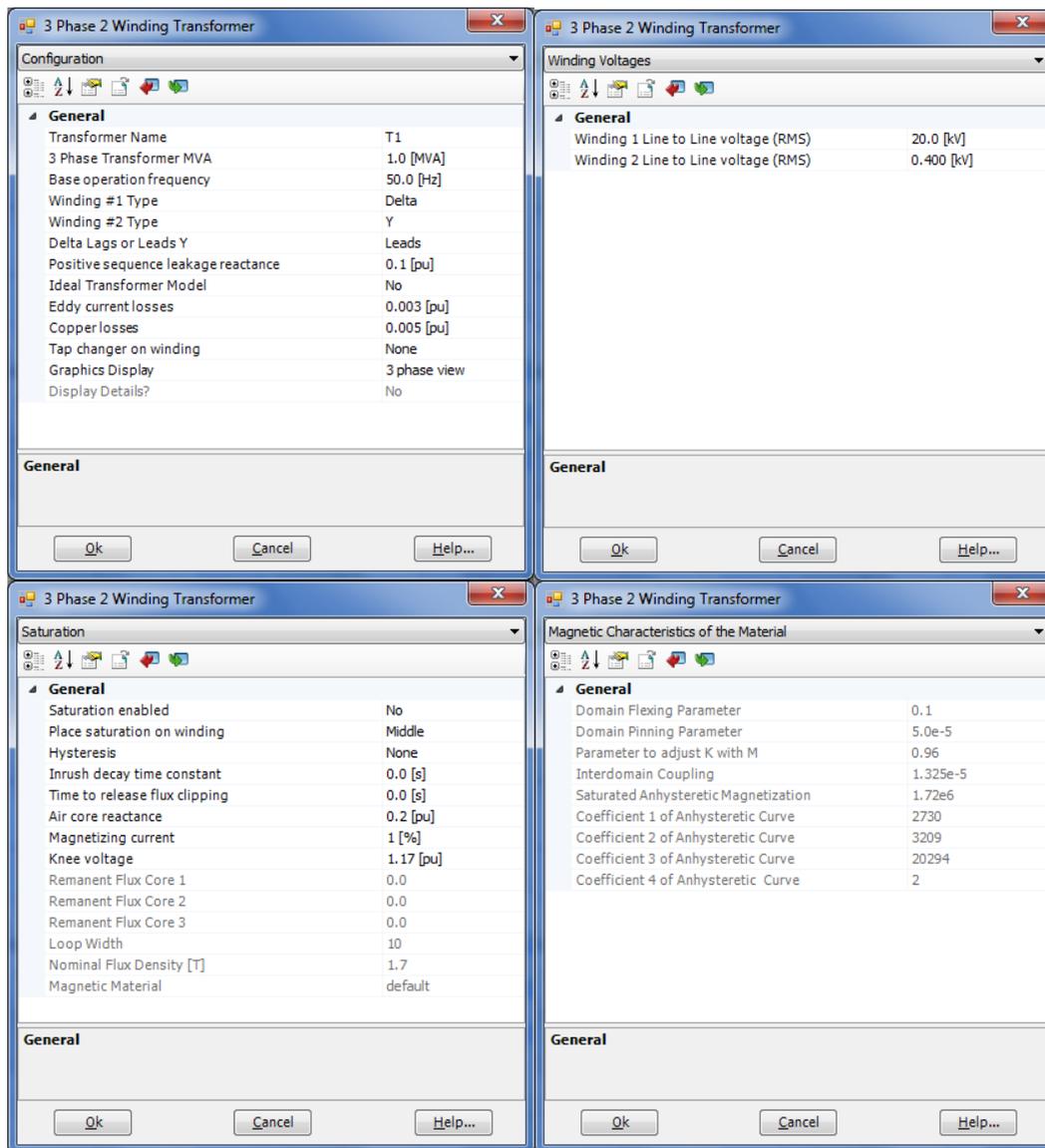


Figura 17: Selección de los parámetros identificativos del transformador en PSCAD.

Se ha decidido que el transformador no llegue a la saturación, lo cual no es objeto de este trabajo, y que tenga unas pérdidas del cobre de 0,005 [pu] (valores por unidad) y unas pérdidas por corrientes de Foucault de 0,003 [pu] de la potencia en régimen nominal. Estos valores se han considerado los más oportunos y adecuados para la realización de las simulaciones al ser de magnitud similar a la de transformadores de semejante potencia. Los resultados de la simulación se pueden observar en la tabla 9.

ENSAYO DE CORTOCIRCUITO (Realizado en el primario)				ENSAYO DE VACIO (Realizado en el primario)			
			Porcentaje respecto a la nominal				Porcentaje respecto a la nominal
Tensión de cortocircuito (Fase A)	1940.56	V	9.70%	Tensión de vacío (Fase A)	19405.55	V	97.03% ($\approx 100\%$)
Tensión de cortocircuito (Fase B)	1942.74	V	9.71%	Tensión de vacío (Fase B)	19427.38	V	97.14% ($\approx 100\%$)
Tensión de cortocircuito (Fase C)	1938.79	V	9.69%	Tensión de vacío (Fase C)	19387.94	V	96.94% ($\approx 100\%$)
Intensidad de cortocircuito (Fase A)	16.57	A	99.41% ($\approx 100\%$)	Intensidad de vacío (Fase A)	0.28	A	1.68%
Intensidad de cortocircuito (Fase B)	16.30	A	97.79% ($\approx 100\%$)	Intensidad de vacío (Fase B)	0.21	A	1.24%
Intensidad de cortocircuito (Fase C)	16.22	A	97.31% ($\approx 100\%$)	Intensidad de vacío (Fase C)	0.20	A	1.18%
Potencia activa CC (Fase A)	2840.49	W		Potencia activa 0 (Fase A)	1203.47	W	
Potencia activa CC (Fase B)	2578.10	W		Potencia activa 0 (Fase B)	1056.98	W	
Potencia activa CC (Fase C)	2541.78	W		Potencia activa 0 (Fase C)	1038.58	W	
Potencia reactiva CC (Fase A)	31480.95	VAr		Potencia reactiva 0 (Fase A)	5213.63	VAr	
Potencia reactiva CC (Fase B)	31086.33	VAr		Potencia reactiva 0 (Fase B)	3830.22	VAr	
Potencia reactiva CC (Fase C)	30943.40	VAr		Potencia reactiva 0 (Fase C)	3627.24	VAr	
$\cos \phi_{cc}$ (Fase A)	0.0883	84.93°		$\cos \phi_o$ (Fase A)	0.2211	77.23°	
$\cos \phi_{cc}$ (Fase B)	0.0814	85.33°		$\cos \phi_o$ (Fase B)	0.2639	74.70°	
$\cos \phi_{cc}$ (Fase C)	0.0808	85.36°		$\cos \phi_o$ (Fase C)	0.2718	74.23°	
FASE A				FASE A			
Impedancia de cortocircuito (Z_{cc})	117.13	Ω		Intensidad resistencia F_e	0.06	A	
Resistencia de cortocircuito (R_{cc})	10.35	Ω		Resistencia F_e	312.91	k Ω	
Reactancia de cortocircuito (X_{cc})	116.67	Ω		Reactancia X_u	88.83	k Ω	
FASE B				FASE B			
Impedancia de cortocircuito (Z_{cc})	119.20	Ω		Intensidad resistencia F_e	0.05	A	
Resistencia de cortocircuito (R_{cc})	9.71	Ω		Resistencia F_e	357.08	k Ω	
Reactancia de cortocircuito (X_{cc})	118.80	Ω		Reactancia X_u	128.03	k Ω	
FASE C				FASE C			

<i>Impedancia de cortocircuito (Z_{cc})</i>	119.54	Ω		<i>Intensidad resistencia Fe</i>	0.05	A	
<i>Resistencia de cortocircuito (R_{cc})</i>	9.66	Ω		<i>Resistencia Fe</i>	361.93	k Ω	
<i>Reactancia de cortocircuito (X_{cc})</i>	119.15	Ω		<i>Reactancia Xu</i>	135.09	k Ω	
VALORES MEDIOS				VALORES MEDIOS			
<i>Impedancia de cortocircuito (Z_{cc})</i>	118.62	Ω		<i>Intensidad resistencia Fe</i>	0.06	A	
<i>Resistencia de cortocircuito (R_{cc})</i>	9.91	Ω		<i>Resistencia Fe</i>	343.97	k Ω	
<i>Reactancia de cortocircuito (X_{cc})</i>	118.21	Ω		<i>Reactancia Xu</i>	117.32	k Ω	

Tabla 9: Parámetros obtenidos durante los ensayos de cortocircuito y vacío.

Una vez obtenidos los valores de las impedancias de cortocircuito y del núcleo ferromagnético, se procede a la realización de sendas simulaciones del transformador con objeto de poder comprobar las pérdidas de este y la caída de tensión sufrida ante distintas cargas lineales. Los valores obtenidos en las simulaciones con PSCAD serán comparados con los cálculos teóricos para poder ver el grado de similitud obtenido.

Como PSCAD tiene origen americano, los separadores de decimales a partir de este punto del trabajo se indicarán con el “punto”, y no con la “coma”.

6.1.1. Conexión triángulo/estrella con cargas resistivas lineales en estrella

El circuito y sus parámetros son indicados en la figura 18.

El experimento se ha comenzado llevando a una situación próxima a la de plena carga, con un índice igual a 1. A partir de este punto, cada una de las pruebas tendrá otras dos simulaciones más, correspondientes al índice de carga de mayor rendimiento y a media carga. Estas situaciones se han conseguido en un primer lugar asumiendo que la carga conectada al devanado secundario del transformador es completamente resistiva, y después comparando los datos obtenidos con PSCAD con los resultados teóricos que se calculan de forma conjunta. Los resultados servirán para ver la magnitud de las pérdidas del transformador, su caída de tensión en el secundario y forma de las ondas de corriente y tensión ante distintas situaciones de demanda energética, para así luego poder comparar estas situaciones con las correspondientes con cargas no lineales e inyectando en la red un mayor contenido armónico.

Los resultados de las simulaciones se muestran en las siguientes tablas 10, 11 y 12. Las resistencias que han de conectarse en cada caso para llevar al transformador a su situación correspondiente, se han calculado tanto de forma precisa como mediante la aproximación por el método de Kapp, observándose escasa diferencia al ser las cargas resistivas, por lo que se ha preferido escoger los datos precisos y ver cómo responden ante la simulación.

Simulación 1 → Plena carga (C=1)							
Resistencia carga: $R's=0,155 \Omega$ (desde primario); $R_s= 387,50 \Omega$ (desde secundario)							
RESULTADOS PSCAD				RESULTADOS TEORICOS			
Devanado primario		Devanado secundario		Devanado primario		Devanado secundario	
Tensión		Tensión		Tensión		Tensión	
Línea	19.407 kV	Línea	383.793 V	Línea	20.000 kV	Línea	387.339 V
Fase	19.407 kV	Fase	221.583 V	Fase	20.000 kV	Fase	223.630 V
Fase A	19.406 kV	Fase A	221.315 V	Fase A		Fase A	
Fase B	19.427 kV	Fase B	221.836 V	Fase B		Fase B	
Fase C	19.388 kV	Fase C	221.598 V	Fase C		Fase C	
Intensidad		Intensidad		Intensidad		Intensidad	
Línea	28.693 V	Línea	1429.569 A	Línea	28.87 A	Línea	1443.500 A
Fase	16.554 V	Fase	1429.569 A	Fase	16.67 A	Fase	1443.500 A
Fase A	16.566 V	Fase A	1427.836 A	Fase A		Fase A	
Fase B	16.548 V	Fase B	1431.203 A	Fase B		Fase B	
Fase C	16.548 V	Fase C	1429.667 A	Fase C		Fase C	
Potencia activa	955.931 kW	Potencia activa	945.166 kW	Potencia activa	980.672 kW	Potencia activa	968.431 kW
Fase A	317.095 kW	Fase A	314.292 kW	Fase A		Fase A	
Fase B	319.907 kW	Fase B	315.215 kW	Fase B		Fase B	
Fase C	318.930 kW	Fase C	315.659 kW	Fase C		Fase C	
Potencia reactiva	122.251 kVAr	Potencia reactiva	0.000 kVAr	Potencia reactiva	196.097 kVAr	Potencia reactiva	0.000 kVAr
Fase A	48.636 kVAr	Fase A	0.000 kVAr	Fase A		Fase A	
Fase B	48.999 kVAr	Fase B	0.000 kVAr	Fase B		Fase B	
Fase C	24.615 kVAr	Fase C	0.000 kVAr	Fase C		Fase C	
Pérdidas en el cobre				Pérdidas en el cobre		8108.947 W	
Pérdidas en el hierro				Pérdidas en el hierro		3299.034 W	
Total pérdidas		10765.493 W		Total pérdidas		11407.981 W	
Caída de tensión		3.68%		Caída de tensión		3.17%	
Fase A		3.79%		Fase A			
Fase B		3.57%		Fase B			
Fase C		3.67%		Fase C			
Rendimiento teórico		98,85%					
Rendimiento PSCAD		98.11%					

Tabla 10: Parámetros obtenidos durante las simulaciones a plena carga y carga puramente resistiva.

Simulación 2 → Carga máx. rendimiento (C=0,64)							
Resistencia carga: $R's=0,2445 \Omega$ (desde primario); $R_s= 611,25 \Omega$ (desde secundario)							
RESULTADOS PSCAD				RESULTADOS TEORICOS			
Devanado primario		Devanado secundario		Devanado primario		Devanado secundario	
Tensión		Tensión		Tensión		Tensión	
Línea	20.013 kV	Línea	397.830 V	Línea	20.000 kV	Línea	393.859 V
Fase	20.013 kV	Fase	229.687 V	Fase	20.000 kV	Fase	227.395 V
Fase A	20.012 kV	Fase A	229.411 V	Fase A		Fase A	

Fase B	20.034 kV	Fase B	229.943 V	Fase B		Fase B	
Fase C	19.994 kV	Fase C	229.708 V	Fase C		Fase C	
Intensidad		Intensidad		Intensidad		Intensidad	
Línea	18.889 A	Línea	939.416 A	Línea	18.584 A	Línea	929.194 A
Fase	10.906 A	Fase	928.919 A	Fase	10.729 A	Fase	929.194 A
Fase A	10.906 A	Fase A	908.010 A	Fase A		Fase A	
Fase B	10.917 A	Fase B	938.286 A	Fase B		Fase B	
Fase C	10.894 A	Fase C	940.462 A	Fase C		Fase C	
Potencia activa	651.886 kW	Potencia activa	644.637 kW	Potencia activa	638.591 kW	Potencia activa	633.881 kW
Fase A	215.905 kW	Fase A	214.198 kW	Fase A		Fase A	
Fase B	218.326 kW	Fase B	214.830 kW	Fase B		Fase B	
Fase C	217.655 kW	Fase C	215.610 kW	Fase C		Fase C	
Potencia reactiva	58.274 kVAr	Potencia reactiva	0.000 kVAr	Potencia reactiva	81.451 kVAr	Potencia reactiva	0.000 kVAr
Fase A	24.877 kVAr	Fase A	0.000 kVAr	Fase A		Fase A	
Fase B	16.687 kVAr	Fase B	0.000 kVAr	Fase B		Fase B	
Fase C	16.711 kVAr	Fase C	0.000 kVAr	Fase C		Fase C	
Pérdidas en el cobre				Pérdidas en el cobre		3360.031 W	
Pérdidas en el hierro				Pérdidas en el hierro		3299.034 W	
Total pérdidas		7248.842 W		Total pérdidas		6659.065 W	
Caída de tensión		0.54%		Caída de tensión		1.54%	
Fase A		0.66%		Fase A			
Fase B		0.43%		Fase B			
Fase C		0.53%		Fase C			
Rendimiento teórico		99,27%					
Rendimiento PSCAD		99.01%					

Tabla 11: Parámetros obtenidos durante las simulaciones a carga 0,64 y carga puramente resistiva.

Simulación 3 → Media carga (C=0,50)							
Resistencia carga: $R's=0,316 \Omega$ (desde primario); $R_s= 790,00 \Omega$ (desde secundario)							
RESULTADOS PSCAD				RESULTADOS TEORICOS			
Devanado primario		Devanado secundario		Devanado primario		Devanado secundario	
Tensión		Tensión		Tensión		Tensión	
Línea	20.013 kV	Línea	398.484 V	Línea	20.000 kV	Línea	395.863 V
Fase	20.013 kV	Fase	230.065 V	Fase	20.000 kV	Fase	228.552 V
Fase A	20.012 kV	Fase A	229.789 V	Fase A		Fase A	
Fase B	20.034 kV	Fase B	230.319 V	Fase B		Fase B	
Fase C	19.994 kV	Fase C	230.087 V	Fase C		Fase C	
Intensidad		Intensidad		Intensidad		Intensidad	
Línea	14.661 A	Línea	728.053 A	Línea	14.4337 A	Línea	721.688 A
Fase	8.459 A	Fase	728.053 A	Fase	8.333 A	Fase	721.688 A
Fase A	8.466 A	Fase A	727.179 A	Fase A		Fase A	
Fase B	8.455 A	Fase B	728.856 A	Fase B		Fase B	
Fase C	8.455 A	Fase C	728.123 A	Fase C		Fase C	

Potencia activa	506.760 kW	Potencia activa	500.877 kW	Potencia activa	497.571 kW	Potencia activa	494.829 kW
Fase A	167.693 kW	Fase A	166.345 kW	Fase A		Fase A	
Fase B	169.795 kW	Fase B	166.837 kW	Fase B		Fase B	
Fase C	169.272 kW	Fase C	167.695 kW	Fase C		Fase C	
Potencia reactiva	45.229 kVAr	Potencia reactiva	0.000 kVAr	Potencia reactiva	49.223 kVAr	Potencia reactiva	0.000 kVAr
Fase A	19.308 kVAr	Fase A	0.000 kVAr	Fase A		Fase A	
Fase B	12.951 kVAr	Fase B	0.000 kVAr	Fase B		Fase B	
Fase C	12.970 kVAr	Fase C	0.000 kVAr	Fase C		Fase C	
Pérdidas en el cobre				Pérdidas en el cobre			2026.888 W
Pérdidas en el hierro				Pérdidas en el hierro			3299.034 W
Total pérdidas		5882.439 W		Total pérdidas			5325.921 W
Caída de tensión		0.38%		Caída de tensión			1.03%
Fase A		0.50%		Fase A			
Fase B		0.27%		Fase B			
Fase C		0.37%		Fase C			
Rendimiento teórico		99,24%					
Rendimiento PSCAD		99.21%					

Tabla 12: Parámetros obtenidos durante las simulaciones a media carga y carga puramente resistiva.

Observando los datos obtenidos durante la realización de las simulaciones con cargas resistivas, podemos ver como la mayor caída de tensión se da para la situación de plena carga, en donde también se puede observar una ligera caída de la tensión del devanado primario. En cuanto a las pérdidas del hierro y del cobre, podemos observar como varían de acuerdo a los criterios teóricos establecidos en donde las pérdidas del hierro permanecen prácticamente constantes a las nominales halladas durante el ensayo de vacío, y las del cobre varían de acuerdo al cuadrado del índice de carga, como muestra la siguiente relación:

$$P_{CU} = P_{CU\text{Nom}} * C^2 \text{ (ec. 31)}$$

En el siguiente subapartado se observará cómo se alteran los resultados si se combinan las cargas resistivas con cargas inductivas.

6.1.2. Conexión triángulo/estrella con cargas resistivas e inductivas lineales en estrella

Al igual que en el apartado anterior, comenzaremos por la simulación llevando el transformador a plena carga, para después llevarlo a la condición de máximo rendimiento, y por último una última simulación a media carga. Los resultados se muestran en las tablas 13, 14 y 15.

Simulación 4 → Plena carga (C=1,00)							
Carga: $R's=0,1107 \Omega$ y $X's=0,083 \Omega$ (desde primario); $R_s=276,65 \Omega$ y $X_s=207,48 \Omega$ (desde secundario)							
RESULTADOS PSCAD				RESULTADOS TEORICOS			
Devanado primario		Devanado secundario		Devanado primario		Devanado secundario	
Tensión		Tensión		Tensión		Tensión	
Línea	19.407 kV	Línea	360.561 V	Línea	20.000 kV	Línea	345.802 V
Fase	19.407 kV	Fase	208.170 V	Fase	20.000 kV	Fase	199.649 V
Fase A	19.406 kV	Fase A	207.928 V	Fase A		Fase A	
Fase B	19.427 kV	Fase B	208.421 V	Fase B		Fase B	
Fase C	19.388 kV	Fase C	208.160 V	Fase C		Fase C	
Intensidad		Intensidad		Intensidad		Intensidad	
Línea	29.872 A	Línea	1481.806 A	Línea	28.87 A	Línea	1443.5 A
Fase	17.246 A	Fase	1481.806 A	Fase	16.67 A	Fase	1443.5 A
Fase A	17.259 A	Fase A	1480.030 A	Fase A		Fase A	
Fase B	17.264 A	Fase B	1484.412 A	Fase B		Fase B	
Fase C	17.216 A	Fase C	1480.975 A	Fase C		Fase C	
Potencia activa	750.803 kW	Potencia activa	742.217 kW	Potencia activa	703.399 kW	Potencia activa	691.679 kW
Fase A	250.247 kW	Fase A	247.043 kW	Fase A		Fase A	
Fase B	250.669 kW	Fase B	247.806 kW	Fase B		Fase B	
Fase C	249.887 kW	Fase C	247.369 kW	Fase C		Fase C	
Potencia reactiva	672.886 kVAr	Potencia reactiva	529.280 kVAr	Potencia reactiva	710.916 kVAr	Potencia reactiva	556.333 kVAr
Fase A	249.887 kVAr	Fase A	176.428 kVAr	Fase A		Fase A	
Fase B	211.542 kVAr	Fase B	176.295 kVAr	Fase B		Fase B	
Fase C	211.458 kVAr	Fase C	176.556 kVAr	Fase C		Fase C	
Pérdidas en el cobre				Pérdidas en el cobre		8108.947 W	
Pérdidas en el hierro				Pérdidas en el hierro		3299.034 W	
Total pérdidas		8585.109 W		Total pérdidas		11407.981 W	
Caída de tensión		9.51%		Caída de tensión		13.20%	
Fase A		9.61%		Fase A			
Fase B		9.40%		Fase B			
Fase C		9.51%		Fase C			
Rendimiento teórico		98.40%					
Rendimiento PSCAD		86.27%					

Tabla 13: Parámetros obtenidos durante las simulaciones a plena carga y carga combinada resistiva e inductiva.

Simulación 5 → Carga máx. rendimiento (C=0,64)							
Carga: $R's=0,1824 \Omega$ y $X's=0,1368 \Omega$ (desde primario); $R_s=456,00 \Omega$ y $X_s=342,00 \Omega$ (desde secundario)							
RESULTADOS PSCAD				RESULTADOS TEORICOS			
Devanado primario		Devanado secundario		Devanado primario		Devanado secundario	
Tensión		Tensión		Tensión		Tensión	
Línea	20.013 kV	Línea	382.331 V	Línea	20.000 kV	Línea	364.531 V
Fase	20.013 kV	Fase	220.739 V	Fase	20.000 kV	Fase	210.462 V

Fase A	20.012 kV	Fase A	220.481 V	Fase A		Fase A	
Fase B	20.034 kV	Fase B	220.996 V	Fase B		Fase B	
Fase C	19.994 kV	Fase C	220.740 V	Fase C		Fase C	
Intensidad		Intensidad		Intensidad		Intensidad	
Línea	19.582 A	Línea	966.825 A	Línea	18.584 A	Línea	929.194 A
Fase	11.306 A	Fase	966.825 A	Fase	10.729 A	Fase	929.194 A
Fase A	11.315 A	Fase A	965.660 A	Fase A		Fase A	
Fase B	11.317 A	Fase B	968.504 A	Fase B		Fase B	
Fase C	11.286 A	Fase C	966.311 A	Fase C		Fase C	
Potencia activa	515.552 kW	Potencia activa	510.083 kW	Potencia activa	739.799 kW	Potencia activa	729.125 kW
Fase A	171.822 kW	Fase A	169.767 kW	Fase A		Fase A	
Fase B	172.133 kW	Fase B	170.290 kW	Fase B		Fase B	
Fase C	171.597 kW	Fase C	170.027 kW	Fase C		Fase C	
Potencia reactiva	434.991 kVAr	Potencia reactiva	378.861 kVAr	Potencia reactiva	672.956 kVAr	Potencia reactiva	586.491 kVAr
Fase A	149.030 kVAr	Fase A	122.075 kVAr	Fase A		Fase A	
Fase B	143.008 kVAr	Fase B	134.644 kVAr	Fase B		Fase B	
Fase C	142.953 kVAr	Fase C	122.142 kVAr	Fase C		Fase C	
Pérdidas en el cobre				Pérdidas en el cobre		3360.031 W	
Pérdidas en el hierro				Pérdidas en el hierro		3299.034 W	
Total pérdidas		5468.197 W		Total pérdidas		6659.065 W	
Caída de tensión		4.04%		Caída de tensión		8.87%	
Fase A		4.16%		Fase A			
Fase B		3.93%		Fase B			
Fase C		4.04%		Fase C			
Rendimiento teórico		99.02%					
Rendimiento PSCAD		94.71%					

Tabla 14: Parámetros obtenidos durante las simulaciones a carga 0,64 y carga combinada resistiva e inductiva.

Simulación 5 → Media carga (C=0,50)							
Carga: $R's=0,2381 \Omega$ y $X's=0,1786 \Omega$ (desde primario); $R_s=595,25 \Omega$ y $X_s=446,50 \Omega$ (desde secundario)							
RESULTADOS PSCAD				RESULTADOS TEORICOS			
Devanado primario		Devanado secundario		Devanado primario		Devanado secundario	
Tensión		Tensión		Tensión		Tensión	
Línea	20.013 kV	Línea	386.424 V	Línea	20.000 kV	Línea	372.084 V
Fase	20.013 kV	Fase	223.102 V	Fase	20.000 kV	Fase	214.823 V
Fase A	20.012 kV	Fase A	222.840 V	Fase A		Fase A	
Fase B	20.034 kV	Fase B	223.358 V	Fase B		Fase B	
Fase C	19.994 kV	Fase C	223.108 V	Fase C		Fase C	
Intensidad		Intensidad		Intensidad		Intensidad	
Línea	15.212 A	Línea	748.254 A	Línea	14.4337 A	Línea	721.688 A
Fase	8.783 A	Fase	748.254 A	Fase	8.333 A	Fase	721.688 A
Fase A	8.790 A	Fase A	747.350 A	Fase A		Fase A	
Fase B	8.791 A	Fase B	749.544 A	Fase B		Fase B	

Fase C	8.767 A	Fase C	747.867 A	Fase C		Fase C	
Potencia activa	403.326 kW	Potencia activa	398.831 kW	Potencia activa	753.458 kW	Potencia activa	744.195 kW
Fase A	134.414 kW	Fase A	132.735 kW	Fase A		Fase A	
Fase B	134.666 kW	Fase B	133.144 kW	Fase B		Fase B	
Fase C	134.247 kW	Fase C	132.952 kW	Fase C		Fase C	
Potencia reactiva	337.913 kVAr	Potencia reactiva	296.471 kVAr	Potencia reactiva	657.628 kVAr	Potencia reactiva	598.705 kVAr
Fase A	115.777 kVAr	Fase A	95.494 kVAr	Fase A		Fase A	
Fase B	111.089 kVAr	Fase B	105.430 kVAr	Fase B		Fase B	
Fase C	111.046 kVAr	Fase C	95.547 kVAr	Fase C		Fase C	
Pérdidas en el cobre				Pérdidas en el cobre		2027.237 W	
Pérdidas en el hierro				Pérdidas en el hierro		3299.034 W	
Total pérdidas		4494.846 W		Total pérdidas		5326.271 W	
Caída de tensión		3.02%		Caída de tensión		6.98%	
Fase A		3.13%		Fase A			
Fase B		2.90%		Fase B			
Fase C		3.01%		Fase C			
Rendimiento teórico		99.00%					
Rendimiento PSCAD		96.12%					

Tabla 15: Parámetros obtenidos durante las simulaciones a media carga y carga combinada resistiva e inductiva.

De los resultados obtenidos se puede comprobar que existe bastante similitud con los datos obtenidos para cargas resistivas. No obstante, se comprueba como los resultados teóricos y obtenidos mediante PSCAD empiezan a diferir. Si se realiza una comparación entre los datos obtenidos en ambas situaciones, rápidamente comprobamos como las mayores caídas de tensión se dan para las situaciones probadas con cargas resistivas e inductivas de forma simultánea en combinación.

Igualmente, el rendimiento calculado mediante PSCAD es inferior al obtenido teóricamente.

6.2. Transformador trifásico reductor con cargas lineales con contenido armónico

Una vez realizadas las comprobaciones de como el transformador se comporta ante cargas lineales, el objetivo será comprobar cómo afectan distintos tipos de armónicos a la tensión, intensidad de corriente, potencia, pérdidas y rendimiento del transformador.

Para realizar este estudio, probaremos con tres de los armónicos más conocidos, los cuales son el tercer armónico (de secuencia homopolar), el quinto armónico (de secuencia inversa) y el séptimo armónico (de secuencia directa). Las simulaciones se realizarán sobre los mismos supuestos que para las cargas lineales, a plena carga, carga de máximo rendimiento y media carga. Los armónicos serán introducidos mediante fuentes de corriente ideales conectadas en paralelo, introduciendo en cada caso un 15% de la corriente correspondiente a las corrientes de plena carga, carga de máximo rendimiento y media carga, cuando proceda. Estas serán introducidas a su frecuencia y fase correspondientes.

Uno de los objetivos perseguidos en este apartado, además de poder obtener datos que poder contrastar con los obtenidos en el subapartado anterior, es la de poder observar la idoneidad del software PSCAD para realizar este tipo de simulaciones, obteniéndose una serie de observaciones que serán descritas al final de este subapartado, junto a las correspondientes conclusiones.

Tras la realización de un primer circuito sencillo para comprobar el funcionamiento del transformador, se realiza un segundo circuito que tiene como origen el resistivo del subapartado 6.1.1. El esquema compartido por todas las simulaciones y ejecutado en PSCAD es como el que se muestra en la figura 18.

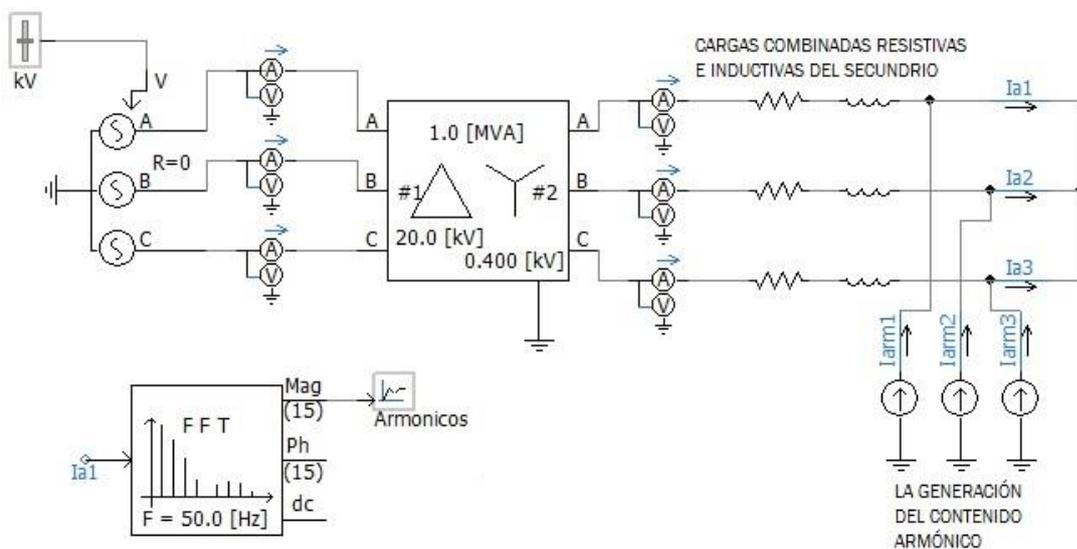


Figura 18: Esquema del sistema eléctrico creado para la evaluación del contenido armónico sobre el transformador.

Para generar el contenido armónico se ha preferido la opción de colocar tres fuentes de corriente ideales en cada una de las líneas en paralelo y modificar sus parámetros para añadir el armónico deseado a las cargas conectadas en estrella sobre el secundario.

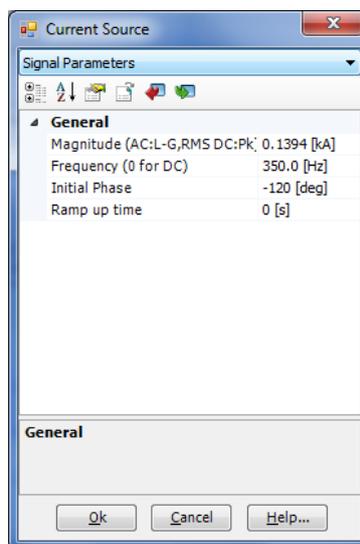


Figura 19: Parámetros configurables de las fuentes de corriente ideales.

Ajustando la magnitud, la frecuencia y la fase, se puede implementar el armónico de las características que se precise en cada instante.

6.2.1. Simulación del sistema con carga lineal introducidos los armónicos

Como en los casos anteriores, se procede al cálculo de los resultados esperados de forma teórica, en esta situación realizando las correspondientes correcciones puesto que se va a introducir de forma deliberada un armónico conocido. Se procede pues a realizar una corrección del valor eficaz de la intensidad de corriente mediante la expresión que a continuación se cita (ecuación 32) para el cálculo teórico:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{h \max} I_h^2} \quad (\text{ec. 32})$$

En donde:

- I_{rms} es el valor eficaz de la intensidad de corriente corregida.
- I_1 es el valor RMS de la intensidad de corriente a la frecuencia de la red (50 Hz).
- I_h es el valor RMS de la intensidad de corriente correspondiente a cada uno de los armónicos.

Es importante también tener en cuenta la fase de cada uno de los armónicos que se van a aplicar. En este sentido se ha de denotar que el tercer armónico al ser homopolar y estar en fase con cada una de las ondas de frecuencia igual a la de la red, van a provocar una disminución del valor pico de la onda resultante de corriente al coincidir el pico de la onda de intensidad a frecuencia de red en el semieje positivo de las ordenadas y el pico de la intensidad a frecuencia 150 Hz en el semieje negativo. Esto puede denotarse en la figura 20.

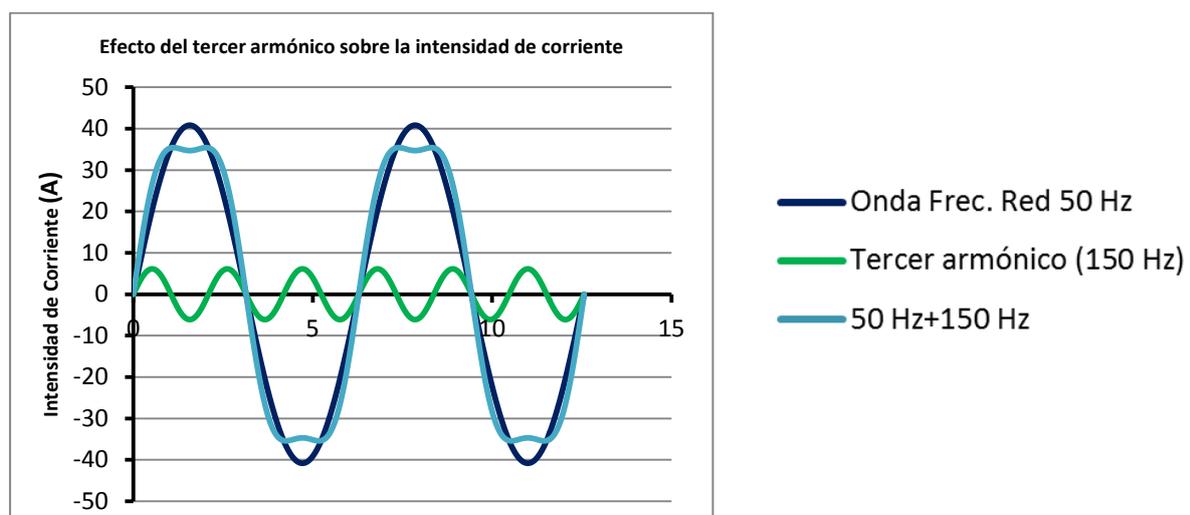


Figura 20: Onda de intensidad resultante de la combinación de la onda de frecuencia natural con el tercer armónico.

Este efecto no es compartido por el quinto y séptimo armónico, que al ser de secuencia inversa y directa respectivamente, y al tener una frecuencia de 250Hz y 350 Hz, provocan un aumento del valor máximo o pico, lo cual se puede comprobar en las figuras 21 y 22.

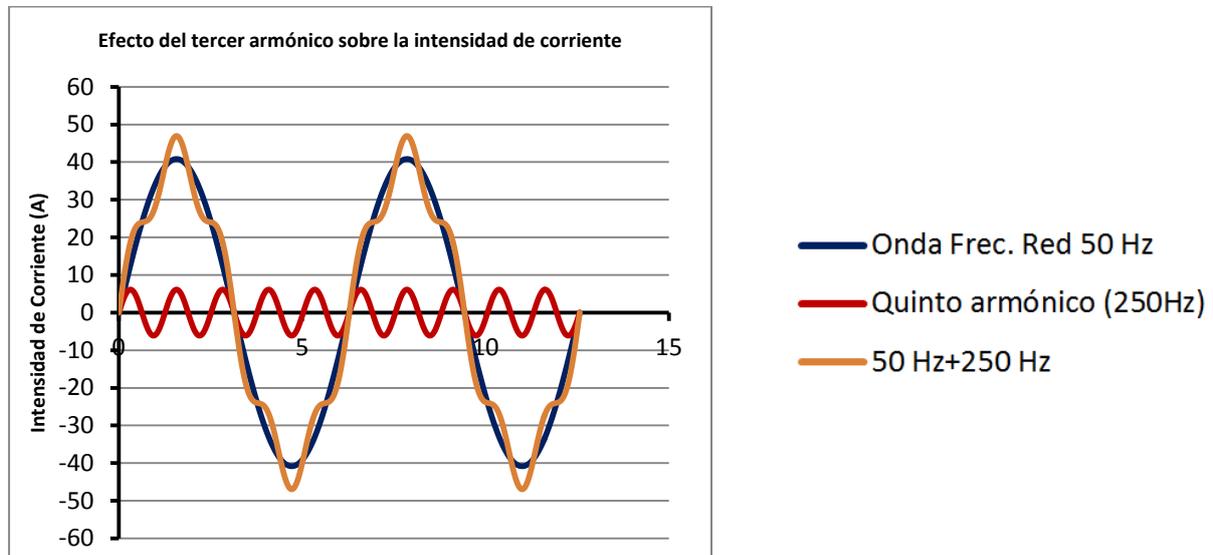


Figura 21: Onda de intensidad resultante de la combinación de la onda de frecuencia natural con el quinto armónico.

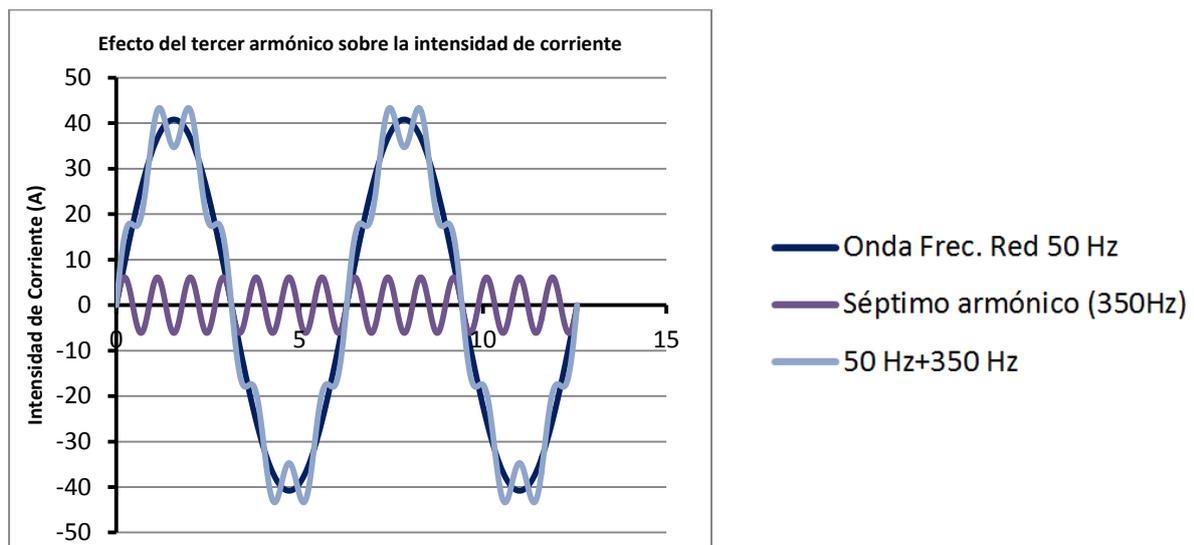


Figura 22: Onda de intensidad resultante de la combinación de la onda de frecuencia natural con el séptimo armónico.

En cuanto a los valores efectivos de corriente para todos los casos estudiados, estos son sus valores proporcionados en la tabla 16:

C=1			
Nominal	28.8700 A	28.8700 A	28.8700 A
Armónico	3	5	7
Valor (15%)	4.3305 A	4.3305 A	4.3305 A
Resultante	29.1525 A	29.1525 A	29.1525 A
C=0.64			
Nominal	18.4768 A	18.4768 A	18.4768 A

Armónico	3	5	7
Valor (15%)	2.7715 A	2.7715 A	2.7715 A
Resultante	18.6576 A	18.6576 A	18.6576 A
C=0.50			
Nominal	14.4350 A	14.4350 A	14.4350 A
Armónico	3	5	7
Valor (15%)	2.1653 A	2.1653 A	2.1653 A
Resultante	14.5762 A	14.5762 A	14.6783 A

Tabla 16: Valores del valor efectivo de la intensidad de corriente para cada una de las situaciones a simular (cálculo teórico).

Para el cálculo de la corrección de las pérdidas en el hierro y de las pérdidas en el Cobre se ha empleado la siguiente expresión (ecuación 33):

$$P_{Corr} = P_{CU} + P_{FE} + P_{CU_Nom} \cdot \sum_{h=2}^{h \max} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 + P_{Fe_Nom} \cdot h^2 \cdot \sum_{h=2}^{h \max} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \quad (ec. 33)$$

en donde:

- P_{Corr} es la potencia activa en pérdidas corregida por la presencia de armónicos (W).
- P_{CU} son las pérdidas en el cobre para cada situación de carga (W).
- P_{FE} son las pérdidas en el hierro para cada situación de carga (W).
- P_{CU_Nom} son las pérdidas del cobre en situación nominal (W).
- P_{Fe_Nom} son las pérdidas en el hierro en situación nominal (W).
- h es el orden del armónico.
- I_h es el valor RMS de la corriente del armónico (A).
- I_R es el valor RMS de la corriente en condiciones nominales (A).

Al igual que en los casos anteriores, se mantienen los mismos parámetros de tiempo, realizándose una simulación de 1 segundo de duración. Los resultados que se muestran en las tablas 17, 18 y 19 se corresponden con el devanado primario, en donde se muestra de forma comparativa cuales han sido los resultados obtenidos de forma teórica con los resultados obtenidos de forma experimental con PSCAD. Esta comparación se realiza como en subapartados anteriores con objeto de poder observar como es la concordancia entre ambos procedimientos.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA				
Tercer armónico (PRIMARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	20.0000 kV	Tensión	19.4070 kV
0.64	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
0.50	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
1.00	Intensidad	16.4795 A	Intensidad	16.5658 A
0.64	Intensidad	10.6089 A	Intensidad	11.2932 A
0.50	Intensidad	8.2398 A	Intensidad	8.4647 A
1.00	Potencia activa	969.5770 kW	Potencia activa	955.9300 kW
0.64	Potencia activa	631.4201 kW	Potencia activa	651.8855 kW
0.50	Potencia activa	491.9840 kW	Potencia activa	506.7592 kW
1.00	Potencia reactiva	193.8786 kVAr	Potencia reactiva	122.2506 kVAr
0.64	Potencia reactiva	80.5362 kVAr	Potencia reactiva	58.2743 kVAr

0.50	Potencia reactiva	48.6706 kVAr	Potencia reactiva	45.2290 kVAr
1.00	Potencia aparente	988.7712 kVA	Potencia aparente	963.7154 kVA
0.64	Potencia aparente	636.5355 kVA	Potencia aparente	654.4850 kVA
0.50	Potencia aparente	494.3856 kVA	Potencia aparente	508.7735 kVA

Tabla 17: Resultados obtenidos sobre el devanado primario debidos a la presencia del tercer armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA				
Quinto armónico (PRIMARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	20.0000 kV	Tensión	19.4070 kV
0.64	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
0.50	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
1.00	Intensidad	16.8546 A	Intensidad	16.5658 A
0.64	Intensidad	10.8504 A	Intensidad	10.9058 A
0.50	Intensidad	8.4273 A	Intensidad	8.4647 A
1.00	Potencia activa	991.6435 kW	Potencia activa	955.9315 kW
0.64	Potencia activa	645.7905 kW	Potencia activa	651.8861 kW
0.50	Potencia activa	503.1810 kW	Potencia activa	506.7596 kW
1.00	Potencia reactiva	198.2911 kVAr	Potencia reactiva	122.2507 kVAr
0.64	Potencia reactiva	82.3691 kVAr	Potencia reactiva	58.2743 kVAr
0.50	Potencia reactiva	49.7783 kVAr	Potencia reactiva	45.2290 kVAr
1.00	Potencia aparente	1011.2745 kVA	Potencia aparente	963.7169 kVA
0.64	Potencia aparente	651.0223 kVA	Potencia aparente	654.4856 kVA
0.50	Potencia aparente	505.6373 kVA	Potencia aparente	508.7739 kVA

Tabla 18: Resultados obtenidos sobre el devanado primario debidos a la presencia del quinto armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA				
Séptimo armónico (PRIMARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	20.0000 kV	Tensión	19.4070 kV
0.64	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
0.50	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
1.00	Intensidad	16.8546 A	Intensidad	16.5658 A
0.64	Intensidad	10.8504 A	Intensidad	10.9058 A
0.50	Intensidad	8.4273 A	Intensidad	8.4647 A
1.00	Potencia activa	991.6435 kW	Potencia activa	955.9315 kW
0.64	Potencia activa	645.7905 kW	Potencia activa	651.8861 kW
0.50	Potencia activa	503.1810 kW	Potencia activa	506.7596 kW
1.00	Potencia reactiva	198.2911 kVAr	Potencia reactiva	122.2507 kVAr
0.64	Potencia reactiva	82.3691 kVAr	Potencia reactiva	58.2743 kVAr
0.50	Potencia reactiva	49.7783 kVAr	Potencia reactiva	45.2290 kVAr
1.00	Potencia aparente	1011.2745 kVA	Potencia aparente	963.7169 kVA
0.64	Potencia aparente	651.0223 kVA	Potencia aparente	654.4856 kVA
0.50	Potencia aparente	505.6373 kVA	Potencia aparente	508.7739 kVA

Tabla 19: Resultados obtenidos sobre el devanado primario debidos a la presencia del séptimo armónico.

Los resultados en el devanado secundario en las tablas 20, 21 y 22.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA				
Tercer armónico (SECUNDARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	223.6302 kV	Tensión	221.8527 kV
0.64	Tensión	227.3948 kV	Tensión	229.8128 kV
0.50	Tensión	228.5518 kV	Tensión	230.1484 kV
1.00	Intensidad	1457.5750 A	Intensidad	1429.5662 A
0.64	Intensidad	923.8400 A	Intensidad	939.4151 A
0.50	Intensidad	721.7500 A	Intensidad	735.9170 A
1.00	Potencia activa	977.8733 kW	Potencia activa	945.5397 kW
0.64	Potencia activa	630.2292 kW	Potencia activa	644.9158 kW
0.50	Potencia activa	494.8718 kW	Potencia activa	501.1048 kW
1.00	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	24.4493 kVAr
0.64	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	33.3596 kVAr
0.50	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	38.8043 kVAr
1.00	Potencia aparente	977.8733 kVA	Potencia aparente	945.8558 kVA
0.64	Potencia aparente	630.2292 kVA	Potencia aparente	645.7780 kVA
0.50	Potencia aparente	494.8718 kVA	Potencia aparente	502.6050 kVA

Tabla 20: Resultados obtenidos sobre el devanado secundario debidos a la presencia del tercer armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA				
Quinto armónico (SECUNDARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	223.6302 kV	Tensión	221.5831 kV
0.64	Tensión	227.3948 kV	Tensión	229.6872 kV
0.50	Tensión	228.5518 kV	Tensión	230.0646 kV
1.00	Intensidad	1457.6250 A	Intensidad	1445.5389 A
0.64	Intensidad	923.8400 A	Intensidad	949.5103 A
0.50	Intensidad	721.7500 A	Intensidad	735.9170 A
1.00	Potencia activa	977.9069 kW	Potencia activa	945.1660 kW
0.64	Potencia activa	630.2292 kW	Potencia activa	644.6373 kW
0.50	Potencia activa	494.8718 kW	Potencia activa	500.8771 kW
1.00	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	0.0000 kVAr
0.64	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	0.0000 kVAr
0.50	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	0.0000 kVAr
1.00	Potencia aparente	977.9069 kVA	Potencia aparente	945.1660 kVA
0.64	Potencia aparente	630.2292 kVA	Potencia aparente	644.6373 kVA
0.50	Potencia aparente	494.8718 kVA	Potencia aparente	500.8771 kVA

Tabla 21: Resultados obtenidos sobre el devanado secundario debidos a la presencia del quinto armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA				
Séptimo armónico (SECUNDARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	223.6302 kV	Tensión	221.5831 kV
0.64	Tensión	227.3948 kV	Tensión	229.6872 kV
0.50	Tensión	228.5518 kV	Tensión	230.0646 kV
1.00	Intensidad	1457.6250 A	Intensidad	1445.2754 A
0.64	Intensidad	923.8400 A	Intensidad	949.3331 A
0.50	Intensidad	721.7500 A	Intensidad	735.7790 A

1.00	Potencia activa	977.9069 kW	Potencia activa	945.1660 kW
0.64	Potencia activa	630.2292 kW	Potencia activa	644.6373 kW
0.50	Potencia activa	494.8718 kW	Potencia activa	500.8771 kW
1.00	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	0.0000 kVAr
0.64	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	0.0000 kVAr
0.50	Potencia reactiva	0.0000 kVAr	Potencia reactiva	0.0000 kVAr
1.00	Potencia aparente	977.9069 kVA	Potencia aparente	945.1660 kVA
0.64	Potencia aparente	630.2292 kVA	Potencia aparente	644.6373 kVA
0.50	Potencia aparente	494.8718 kVA	Potencia aparente	500.8771 kVA

Tabla 22: Resultados obtenidos sobre el devanado secundario debidos a la presencia del séptimo armónico.

En estas tablas se puede observar como los cálculos teóricos realizados empiezan a presentar diferencias grandes con los resultados en PSCAD, en lo que parece que estos no sería óptimo para realizar y se tendría que observar cuales serían las correcciones a realizar, aunque este no es el objetivo de este trabajo.

A continuación se muestran los resultados en PSCAD comparando los distintos campos entre sí, en las tablas 23 y 24.

SIMULACIÓN CARGA RESISTIVA (RESULTADOS PSCAD) → Devanado primario				
C=1				
	Sin armónicos	Tercer armónico	Quinto armónico	Séptimo armónico
Tensión	19.4070 kV	19.4070 kV	19.4070 kV	19.4070 kV
Intensidad	16.5542 A	16.5658 A	16.5658 A	16.5658 A
Potencia activa	955.9315 kW	955.9300 kW	955.9315 kW	955.9315 kW
Potencia reactiva	122.2507 kVAr	122.2506 kVAr	122.2507 kVAr	122.2507 kVAr
C=0.64				
Tensión	20.0134 kV	20.0134 kV	20.0134 kV	20.0134 kV
Intensidad	10.9058 A	11.2932 A	10.9058 A	10.9058 A
Potencia activa	651.8861 kW	651.8855 kW	651.8861 kW	651.8861 kW
Potencia reactiva	58.2743 A kVAr	58.2743 kVAr	58.2743 kVAr	58.2743 kVAr
C=0.50				
Tensión	20.0134 kV	20.0134 kV	20.0134 kV	20.0134 kV
Intensidad	8.4589 A	8.4647 A	8.4647 A	8.4647 A
Potencia activa	506.7596 kW	506.7592 kW	506.7596 kW	506.7596 kW
Potencia reactiva	45.2290 kVAr	45.2290 kVAr	45.2290 kVAr	45.2290 kVAr

Tabla 23: Resultados generales obtenidos en el devanado primario con carga puramente resistiva y contenido armónico.

SIMULACIÓN CARGA RESISTIVA (RESULTADOS PSCAD) → Devanado Secundario				
C=1				
	Sin armónicos	Tercer armónico	Quinto armónico	Séptimo armónico
Tensión	221.5831 kV	221.8527 kV	221.5831 kV	221.5831 kV
Intensidad	1429.5687 A	1429.5662	1445.5389	1445.2754
Potencia activa	945.1660 kW	945.5397 kW	945.1660 kW	945.1660 kW
Potencia reactiva	0.0000 kVAr	24.4493 kVAr	0.0000 kVAr	0.0000 kVAr
C=0.64				
Tensión	229.6872 kV	229.8128 kV	229.6872 kV	229.6872 kV
Intensidad	928.9191 A	939.4151 A	949.5103 A	949.3331 A

Potencia activa	644.6373 kW	644.9158 kW	644.6373 kW	644.6373 kW
Potencia reactiva	0.0000 kVAr	33.3596 kVAr	0.0000 kVAr	0.0000 kVAr
C=0.50				
Tensión	230.0646 kV	230.1484 kV	230.0646 kV	230.0646 kV
Intensidad	728.0526 A	735.9170 A	735.9170 A	735.7790 A
Potencia activa	500.8771 kW	501.1048 kW	500.8771 kW	500.8771 kW
Potencia reactiva	0.0000kVAr	38.8043 kVAr	0.0000 kVAr	0.0000 kVAr

Tabla 24: Resultados generales obtenidos en el devanado secundario con carga puramente resistiva y contenido armónico.

6.2.2. Simulación del sistema con carga lineal introducidos los armónicos

Sendas simulaciones también han sido efectuadas para el caso de una carga resistiva combinada con una inductiva. Los resultados son como los que se muestran en las tablas 25 a la 30, tanto para el primario como para el secundario.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
Tercer armónico (PRIMARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	20.0000 kV	Tensión	19.4053 kV
0.64	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0117 kV
0.50	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0117 kV
1.00	Intensidad	16.8312 A	Intensidad	17.4361 A
0.64	Intensidad	10.6676 A	Intensidad	11.2932 A
0.50	Intensidad	8.7757 A	Intensidad	8.7757 A
1.00	Potencia activa	710.2822 kW	Potencia activa	753.0056 kW
0.64	Potencia activa	473.4715 kW	Potencia activa	515.0196 kW
0.50	Potencia activa	376.7288 kW	Potencia activa	403.1736 kW
1.00	Potencia reactiva	717.8727 kVAr	Potencia reactiva	669.4676 kVAr
0.64	Potencia reactiva	430.6916 kVAr	Potencia reactiva	434.6092 kVAr
0.50	Potencia reactiva	328.8138 kVAr	Potencia reactiva	337.7304 kVAr
1.00	Potencia aparente	1009.8722 kVA	Potencia aparente	1007.5735 kVA
0.64	Potencia aparente	640.0551 kVA	Potencia aparente	673.8919 kVA
0.50	Potencia aparente	500.0431 kVA	Potencia aparente	525.9380 kVA

Tabla 25: Resultados obtenidos sobre el devanado primario debidos a la presencia del tercer armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
Quinto armónico (PRIMARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	20.0000 kV	Tensión	19.4070 kV
0.64	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
0.50	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
1.00	Intensidad	16.8312 A	Intensidad	17.4502 A
0.64	Intensidad	10.6676 A	Intensidad	11.3021 A
0.50	Intensidad	8.3341 A	Intensidad	8.7826 A
1.00	Potencia activa	710.2822 kW	Potencia activa	753.2391 kW
0.64	Potencia activa	473.4715 kW	Potencia activa	515.2074 kW
0.50	Potencia activa	376.7288 kW	Potencia activa	403.3261 kW
1.00	Potencia reactiva	717.8727 kVAr	Potencia reactiva	669.8529 kVAr

0.64	Potencia reactiva	430.6916 kVAr	Potencia reactiva	434.8476 kVAr
0.50	Potencia reactiva	328.8138 kVAr	Potencia reactiva	337.9125 kVAr
1.00	Potencia aparente	1009.8722 kVA	Potencia aparente	1008.0040 kVA
0.64	Potencia aparente	640.0551 kVA	Potencia aparente	674.1892 kVA
0.50	Potencia aparente	500.0431 kVA	Potencia aparente	526.1719 kVA

Tabla 26: Resultados obtenidos sobre el devanado primario debidos a la presencia del quinto armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
Séptimo armónico (PRIMARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	20.0000 kV	Tensión	19.4070 kV
0.64	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
0.50	Tensión	20.0000 kV	Tensión	20.0134 kV
1.00	Intensidad	16.8312 A	Intensidad	17.4502 A
0.64	Intensidad	10.6676 A	Intensidad	11.3021 A
0.50	Intensidad	8.3341 A	Intensidad	8.7826 A
1.00	Potencia activa	710.2822 kW	Potencia activa	753.2391 kW
0.64	Potencia activa	473.4715 kW	Potencia activa	515.2074 kW
0.50	Potencia activa	376.7288 kW	Potencia activa	403.3261 kW
1.00	Potencia reactiva	717.8727 kVAr	Potencia reactiva	669.8529 kVAr
0.64	Potencia reactiva	430.6916 kVAr	Potencia reactiva	434.8476 kVAr
0.50	Potencia reactiva	328.8138 kVAr	Potencia reactiva	337.9125 kVAr
1.00	Potencia aparente	1009.8722 kVA	Potencia aparente	1008.0040 kVA
0.64	Potencia aparente	640.0551 kVA	Potencia aparente	674.1892 kVA
0.50	Potencia aparente	500.0431 kVA	Potencia aparente	526.1719 kVA

Tabla 27: Resultados obtenidos sobre el devanado primario debidos a la presencia del séptimo armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
Tercer armónico (SECUNDARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	Tensión	199.6491 kV	Tensión	208.0872 kV
0.64	Tensión	210.4622 kV	Tensión	220.8493 kV
0.50	Tensión	214.8229 kV	Tensión	223.1688 kV
1.00	Intensidad	1457.6250 A	Intensidad	1498.1606 A
0.64	Intensidad	923.8400 A	Intensidad	965.7138 A
0.50	Intensidad	721.7500 A	Intensidad	747.6484 A
1.00	Potencia activa	698.4475 kW	Potencia activa	744.9687 kW
0.64	Potencia activa	466.6402 kW	Potencia activa	510.0683 kW
0.50	Potencia activa	372.0975 kW	Potencia activa	399.0860 kW
1.00	Potencia reactiva	523.8041 kVAr	Potencia reactiva	667.7532 kVAr
0.64	Potencia reactiva	349.9801 kVAr	Potencia reactiva	451.2767 kVAr
0.50	Potencia reactiva	279.1122 kVAr	Potencia reactiva	357.2324 kVAr
1.00	Potencia aparente	873.0405 kVA	Potencia aparente	1000.4363 kVA
0.64	Potencia aparente	583.3002 kVA	Potencia aparente	681.0435 kVA
0.50	Potencia aparente	465.1453 kVA	Potencia aparente	535.6161 kVA

Tabla 28: Resultados obtenidos sobre el devanado secundario debidos a la presencia del tercer armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
Quinto armónico (SECUNDARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	<i>Tensión</i>	199.6491 kV	<i>Tensión</i>	207.8106 kV
0.64	<i>Tensión</i>	210.4622 kV	<i>Tensión</i>	220.7377 kV
0.50	<i>Tensión</i>	214.8229 kV	<i>Tensión</i>	223.1019 kV
1.00	<i>Intensidad</i>	1457.6250 A	<i>Intensidad</i>	1514.4825 A
0.64	<i>Intensidad</i>	923.8400 A	<i>Intensidad</i>	976.2081 A
0.50	<i>Intensidad</i>	721.7500 A	<i>Intensidad</i>	755.8233 A
1.00	<i>Potencia activa</i>	698.4475 kW	<i>Potencia activa</i>	744.5159 kW
0.64	<i>Potencia activa</i>	466.6402 kW	<i>Potencia activa</i>	509.7409 kW
0.50	<i>Potencia activa</i>	372.0975 kW	<i>Potencia activa</i>	398.8313 kW
1.00	<i>Potencia reactiva</i>	523.8041 kVAr	<i>Potencia reactiva</i>	534.6184 kVAr
0.64	<i>Potencia reactiva</i>	349.9801 kVAr	<i>Potencia reactiva</i>	378.7306 kVAr
0.50	<i>Potencia reactiva</i>	279.1122 kVAr	<i>Potencia reactiva</i>	296.4707 kVAr
1.00	<i>Potencia aparente</i>	873.0405 kVA	<i>Potencia aparente</i>	916.5810 kVA
0.64	<i>Potencia aparente</i>	583.3002 kVA	<i>Potencia aparente</i>	635.0375 kVA
0.50	<i>Potencia aparente</i>	465.1453 kVA	<i>Potencia aparente</i>	496.9520 kVA

Tabla 29: Resultados obtenidos sobre el devanado secundario debidos a la presencia del quinto armónico.

SIMUACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
Séptimo armónico (SECUNDARIO)				
C	Resultados teóricos		Resultados PSCAD	
1.00	<i>Tensión</i>	199.6491 kV	<i>Tensión</i>	207.8106 kV
0.64	<i>Tensión</i>	210.4622 kV	<i>Tensión</i>	220.7377 kV
0.50	<i>Tensión</i>	214.8229 kV	<i>Tensión</i>	223.1019 kV
1.00	<i>Intensidad</i>	1457.6250 A	<i>Intensidad</i>	1514.4012
0.64	<i>Intensidad</i>	923.8400 A	<i>Intensidad</i>	976.1534
0.50	<i>Intensidad</i>	721.7500A	<i>Intensidad</i>	755.7801
1.00	<i>Potencia activa</i>	698.4475 kW	<i>Potencia activa</i>	744.5159 kW
0.64	<i>Potencia activa</i>	466.6402 kW	<i>Potencia activa</i>	509.7409 kW
0.50	<i>Potencia activa</i>	372.0975 kW	<i>Potencia activa</i>	398.8313 kW
1.00	<i>Potencia reactiva</i>	523.8041 kVAr	<i>Potencia reactiva</i>	534.6184 kVAr
0.64	<i>Potencia reactiva</i>	349.9801 kVAr	<i>Potencia reactiva</i>	378.7306 kVAr
0.50	<i>Potencia reactiva</i>	279.1122 kVAr	<i>Potencia reactiva</i>	296.4707 kVAr
1.00	<i>Potencia aparente</i>	873.0405 kVA	<i>Potencia aparente</i>	916.5810 kVA
0.64	<i>Potencia aparente</i>	583.3002 kVA	<i>Potencia aparente</i>	635.0375 kVA
0.50	<i>Potencia aparente</i>	465.1453 kVA	<i>Potencia aparente</i>	496.9520 kVA

Tabla 30: Resultados obtenidos sobre el devanado secundario debidos a la presencia del séptimo armónico.

La aproximación *Kapp* para el cálculo de las caídas de tensión en transformadores parece asemejarse más con los datos obtenidos para cargadas puramente resistivas en PSCAD que con las combinaciones de cargas resistivas-inductivas.

6.2.3. Comparación de los resultados obtenidos y conclusiones

Las comparaciones que se han realizado a continuación se realizan sobre el devanado secundario puesto que a la vista de los resultados, son los que muestran variaciones significativas en sus valores. Solamente se presta atención en este caso a los resultados obtenidos con el software PSCAD, y no a los teóricos realizados.

SIMULACIÓN CARGA RESISTIVA (RESULTADOS PSCAD)				
C=1				
	Sin armónicos	Tercer armónico	Quinto armónico	Séptimo armónico
<i>Pérdidas</i>	10765.4926 W	10390.2445 W	10765.4926 W	10765.4926 W
<i>Rendimiento</i>	98.180%	98.179%	98.108%	98.108%
C=0.64				
<i>Pérdidas</i>	7248.8422 W	6969.7882 W	7248.8422 W	7248.8422 W
<i>Rendimiento</i>	99.007%	99.122%	99.007%	99.007%
C=0.50				
<i>Pérdidas</i>	5882.4386 W	5654.3376 W	5882.4386 W	5882.4386 W
<i>Rendimiento</i>	99.206%	99.380%	99.206%	99.206%

Tabla 31: Pérdidas de potencia activa y rendimiento del transformador en cada uno de los casos simulados para carga resistiva.

SIMULACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA				
C=1				
	Sin armónicos	Tercer armónico	Quinto armónico	Séptimo armónico
<i>Pérdidas</i>	8585.1088 W	8036.8692 W	8723.2458 W	8723.2458 W
<i>Rendimiento</i>	86.265%	98.985%	87.002%	87.002%
C=0.64				
<i>Pérdidas</i>	5468.1971 W	4951.2850 W	5466.5490 W	5466.5490 W
<i>Rendimiento</i>	94.707%	100.967%	94.707%	94.707%
C=0.50				
<i>Pérdidas</i>	4494.8456 W	4087.6357 W	4494.8456 W	4494.8456 W
<i>Rendimiento</i>	96.122%	101.285%	96.122%	96.122%

Tabla 32: Pérdidas de potencia activa y rendimiento del transformador en cada uno de los casos simulados para carga resistiva-inductiva.

De los datos plasmados sobre las tablas 31 y 32 podemos observar distintas tendencias en los resultados. Se puede comprobar como las pérdidas de potencia activa son mayores en el caso de la carga resistiva que para cargas inductivas, no obstante, todas las simulaciones muestran un ligero descenso en el caso del tercer armónico, común en ambos casos. Dicho descenso es más acentuado para cuando al transformador se le han conectado cargas inductivas, y es mayor para situaciones próximas a la carga plena, aminorando la diferencia a medida que el índice de carga disminuye. También, se ha observado que en el caso de las cargas resistivas, esta disminución solo se presenta para el tercer armónico, igualándose las pérdidas para los casos de no tener armónicos, y para el quinto y séptimo armónico. En el caso de las cargas resistiva-inductivas, situaciones próximas a la plena carga favorecen un incremento mayor de las pérdidas por encima de la situación sin armónicos. Conforme el índice de carga disminuye, las pérdidas entre estas tres situaciones se igualan. Todos estos resultados pueden observarse fácilmente en la siguiente figura 23.

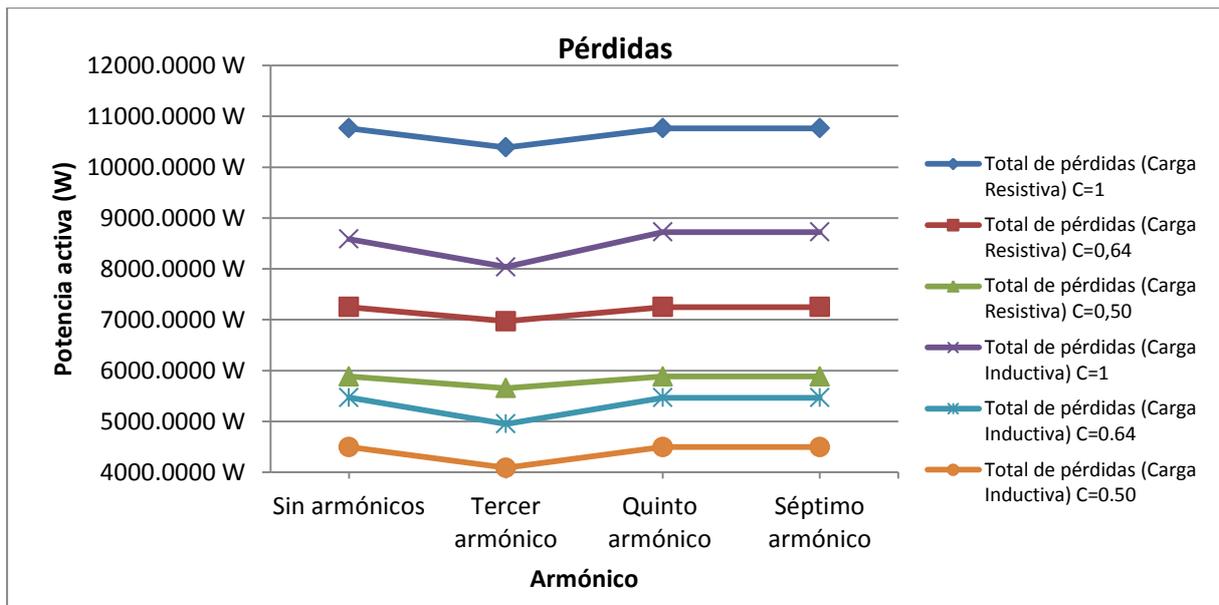


Figura 23: Comparación de las pérdidas en potencia activa del transformador para cada una de las situaciones.

Igualmente se ha procedido a observar como se ve modificado el rendimiento del transformador en cada situación. Los rendimientos más altos se obtienen como es previsible en el caso de las cargas resistivas, las cuales se encuentran siempre por encima del 98%. Como se ha explicado en apartados anteriores en este trabajo, el rendimiento es mayor para la situación con un índice de carga 0,64, disminuyendo tanto para situaciones próximas o de plena carga, y para situaciones de media carga.

Al igual que ocurría con las pérdidas, se ha percatado otro dato curioso revelado por el análisis, dentro del cual se ha observado la siguiente tendencia:

- ✓ El tercer armónico por norma general provoca un aumento del rendimiento del transformador.
- ✓ Para situaciones próximas a la plena carga, este efecto de aumento es menor que para situaciones de menor carga. Se ha comprobado que cuanto menor sea el índice de carga, el aumento es mayor. La tendencia solamente es rota para la situación en la que la carga sea puramente resistiva y el índice de carga igual a la unidad, en el cual el tercer armónico disminuye el rendimiento.
- ✓ El quinto y el séptimo armónico al contrario que el tercer armónico provocan la disminución del rendimiento por debajo de los casos sin armónicos. Este efecto se agrava si la carga resistiva se combina con la inductiva como se puede comprobar a la vista de los resultados obtenidos.
- ✓ Al igual que con el tercer armónico, la disminución provocada por el quinto y el séptimo armónico se acentúa en situaciones próxima a la plena carga, equilibrándose para situaciones de índice de carga bajos.

En las tablas 31 y 32 es necesario explicar que el rendimiento nunca puede llegar a ser del 100% ni superior, por lo que los valores superiores a este para el caso inductivo en las situaciones en las que el índice de carga es 0,64 y 0,50, solamente indica que el rendimiento es muy cercano a este valor, pero nunca del 100%. En este caso la presencia del tercer

armónico (homopolar) hace que el rendimiento pueda haber aumentado ligeramente, tendencia que si ha sido citada anteriormente.

También se observa como para cargas inductivas a plena carga, el rendimiento baja por debajo del 90% cuando se presentan el quinto y/o el séptimo armónico. La gráfica muestra todas las conclusiones anteriormente citadas. Es importante recalcar que los armónicos no se han combinado entre sí, y los resultados se deben a la presencia del citado armónico de forma individual.

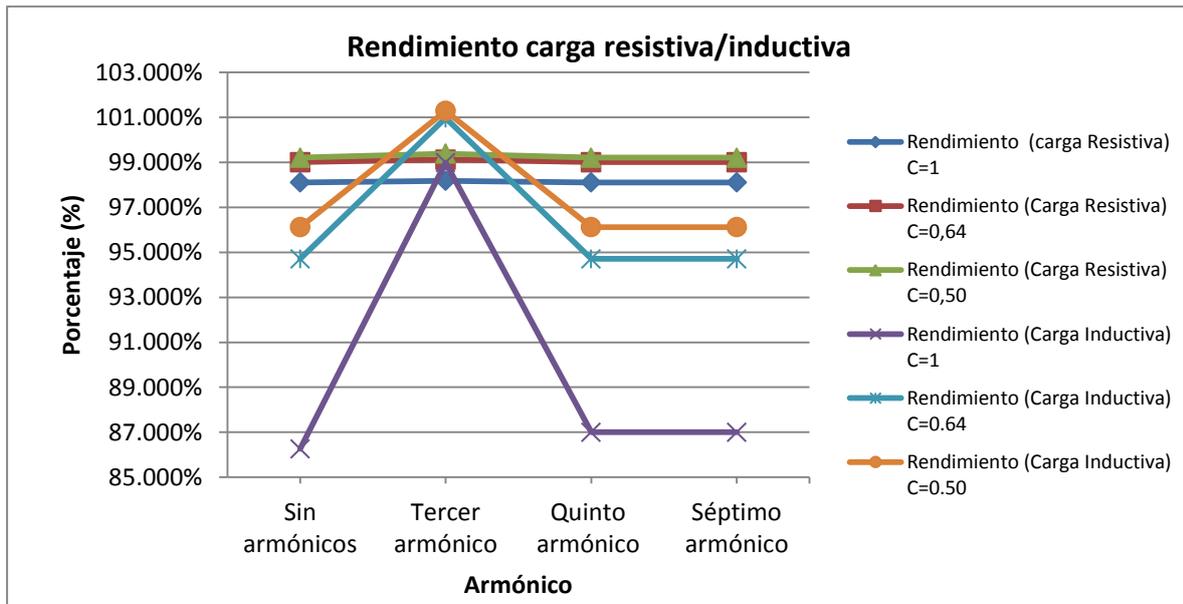


Figura 24: Comparación del rendimiento del transformador para cada una de las situaciones.

A continuación se procede a la comprobación de la caída de tensión provocada por cada uno de los armónicos de forma individual. En las siguientes tablas (33 y 34) se muestran los resultados obtenidos, en este caso comprobando con los datos obtenidos teóricamente.

SIMULACIÓN CARGA RESISTIVA (Devanado Secundario)				
C=1				
	Sin armónicos	Tercer armónico	Quinto armónico	Séptimo armónico
Caída de tensión (Teórica)	-3.17%	-2.77%	-2.77%	-2.77%
Caída de tensión (PSCAD)	-3.68%	-3.68%	-3.66%	-3.66%
C=0.64				
Caída de tensión (Teórica)	-1.54%	-1.13%	-1.13%	-1.13%
Caída de tensión (PSCAD)	-0.54%	-0.08%	-0.14%	-0.14%
C=0.50				
Caída de tensión (Teórica)	-1.03%	-0.63%	-0.63%	-0.63%
Caída de tensión (PSCAD)	-0.38%	+0.06%	+0.03%	+0.03%

Tabla 33: Caída de tensión sufrida en el devanado secundario debido a la presencia de armónicos con carga resistiva.

SIMULACIÓN CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA (Devanado Secundario)				
C=1				
	Sin armónicos	Tercer armónico	Quinto armónico	Séptimo armónico
Caída de tensión (Teórica)	-13.55%	-13.20%	-13.20%	-13.20%
Caída de tensión (PSCAD)	-9.51%	-9.53%	-9.65%	-9.65%
C=0.64				
Caída de tensión (Teórica)	-8.87%	-8.49%	-8.49%	-8.49%
Caída de tensión (PSCAD)	-3.68%	-3.98%	-4.03%	-4.03%
C=0.50				
Caída de tensión (Teórica)	-6.98%	-6.60%	-6.60%	-6.60%
Caída de tensión (PSCAD)	-3.68%	-2.97%	-3.00%	-3.00%

Tabla 34: Caída de tensión sufrida en el devanado secundario debido a la presencia de armónicos con carga resistiva combinadas con inductivas.

De cara a los resultados obtenidos, se puede denotar que la caída de tensión aumenta con la presencia de los armónicos en el devanado secundario, excepto para los casos de índice a media carga. Tanto para el caso de la carga puramente resistiva como para la combinación con cargas inductivas, la presencia del tercer armónico es la que provoca un mayor incremento de la tensión, llegando en el caso de la carga resistiva a elevar la tensión por encima de su valor nominal (ver figura 25). Otro de los aspectos a destacar es que conforme el índice de carga del transformador disminuye, el efecto del armónico sobre la disminución de la caída de tensión es mayor (existe una menor caída de tensión). Por último lugar, se observa que los datos obtenidos teóricamente indican caídas de tensión mayores a las que posteriormente se han obtenido durante la ejecución de las simulaciones, siendo la diferencia más grande entre los valores de la carga resistiva combinados con carga inductiva.

En la figura 25 se puede observar la tendencia anteriormente citada, en donde se comparan las distintas caídas de tensión en valores porcentuales para cada una de las simulaciones en PSCAD realizadas.

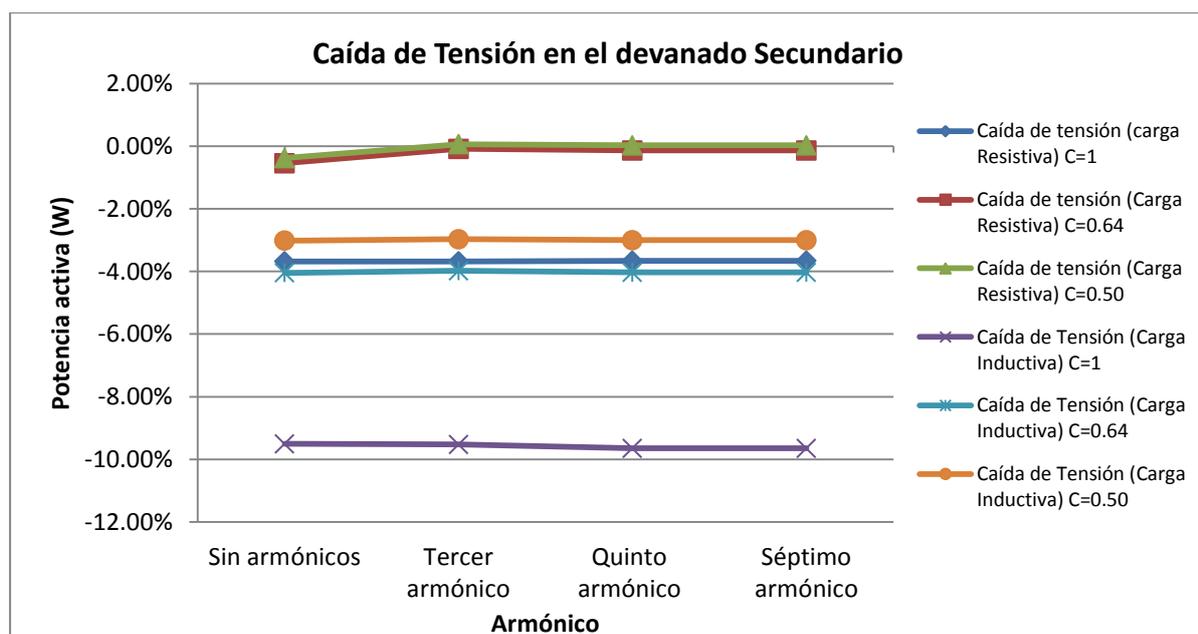


Figura 25: Comparación de la caída de tensión en PSCAD en el devanado secundario para cada una de las situaciones.

En último lugar, se comparará el rizado de la onda de corriente para el tercer, quinto y séptimo armónico, los cuales tienen el aspecto que se muestran en las figuras 26, 27 y 28.



Figura 26: Onda de corriente resultante debido a la presencia del tercer armónico.

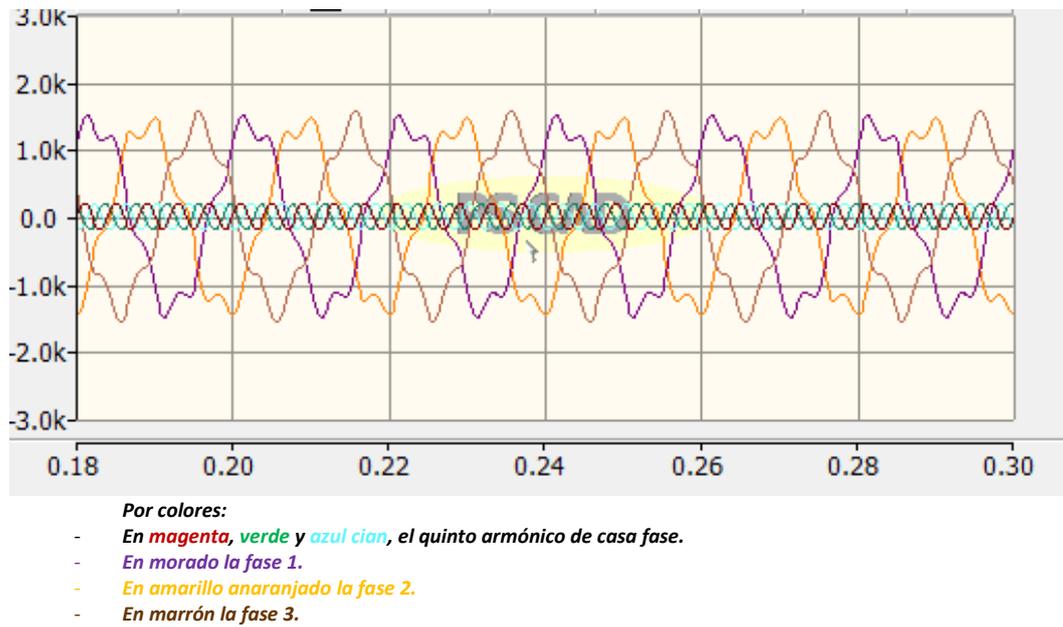
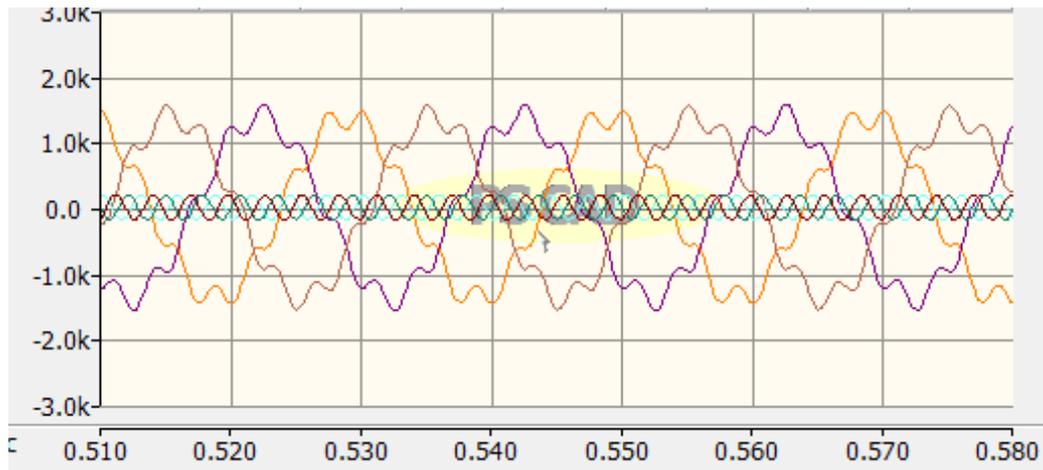


Figura 27: Onda de corriente resultante debido a la presencia del quinto armónico.



- Por colores:
- En magenta, verde y azul cian, el quinto armónico de cada fase.
 - En morado la fase 1.
 - En amarillo anaranjado la fase 2.
 - En marrón la fase 3.

Figura 28: Onda de corriente resultante debido a la presencia del séptimo armónico.

Observando las gráficas anteriores, los resultados muestran una mayor cantidad de rizado y un aumento del valor pico de la corriente en el caso del quinto y séptimo armónico como las primeras aproximaciones teóricas indicaban. Sin embargo, la onda de corriente resultante del tercer armónico a diferencia de lo que se esperaba obtener teóricamente, no presenta ningún tipo de rizado, teniendo si, la correspondiente disminución del valor pico de la onda. Como el estudio teórico indicaba, todas las ondas presentan el mismo valor eficaz o RMS, al presentarse de forma individual y no en combinación a otros armónicos, y todas suponer una magnitud del 15% de la corriente a 50Hz en cada caso.

6.2.4. Conclusiones obtenidas tras el uso de la versión gratuita de PSCAD en la realización de las simulaciones con cargas lineales y armónicas

Anteriormente, durante, y tras la realización de las sendas simulaciones con el software de PSCAD en versión gratuita, se han observado ciertas características positivas y negativas que presenta el programa a la hora de realizar simulaciones con contenido armónico. A continuación se presentan los siguientes puntos positivos y negativos.

Aspectos positivos:

- ✓ El software presenta una buena variedad de formas de poder simular la presencia de armónicos en las redes eléctricas, desde bloques dedicados a la simulación de armónicos, hasta la combinación de varios elementos entre sí para poder simularlos.
- ✓ El programa ofrece la posibilidad de medir directamente el contenido armónico de la red mediante la inclusión de un bloque que realiza la transformada de Fourier, sin necesidad de que el usuario tenga que evaluar a posteriori la onda de corriente o tensión que el sistema da tras la simulación.

- ✓ Gran precisión de la simulación cuando se fijan tiempos pequeños de ejecución. Esto puede hacer que la simulación dure un mayor tiempo, pero los resultados son mejores.
- ✓ Los bloques transformador tienen una amplia gama de parámetros configurables, pudiéndose adaptar a cualquier variedad de trafo que exista comercialmente. Este ha de ser configurado por el propio usuario puesto que las opciones que vienen marcadas por defecto pueden no resultar suficientes para la modelización del sistema.

Aspectos negativos:

- ✓ Escaso número de nodos según el modelo de mallas de Kirchhoff que resulta escaso para la simulación de sistemas complejos, por lo que la simulación solamente se puede reducir a sistemas monofásicos o trifásicos que no presenten un elevado número de nodos (sin muchas impedancias u otros elementos que provocan más de 15 nodos en el recuento total, más el nodo de tierra).
- ✓ Así mismo el escaso número de nodos hace que no se pueda leer información de todas las partes del circuito simulado. En este sentido se ha intentado obtener información de parámetros como la intensidad que circula por el neutro del devanado en estrella del transformador durante de la simulación de forma no exitosa, pues el número de nodos siempre excedía del máximo incluso retirando otros componentes del sistema.
- ✓ El entorno de trabajo es finito y reducido, con lo que si el circuito es grande y requiere de bastantes elementos para poder observar los parámetros en gráficas u otros medios, la pantalla resulta pequeña y todo queda desordenado.
- ✓ La versión gratuita no permite exportar ni importar datos directamente con otros programas como Matlab u Excel. En este sentido, la exportación de datos a Excel o Matlab se puede realizar mediante la copia del contenido de las gráficas al portapapeles para posteriormente convertirlo en un archivo csv pegándolo en una nota de texto convencional, la cual a su vez se puede importar a un archivo Excel, y este si se necesitase, leerse en Matlab u otro programa similar. Todo ello hace que la operación de procesamiento de datos resulte ser laboriosa y prolongada en el tiempo más de lo necesario. El autor de este trabajo al menos no ha podido encontrar otra forma de realizar estas operaciones.
- ✓ También a pesar de tener varios modelos de transformadores monofásicos y trifásicos incluidos dentro de la librería, a la hora de simular resultan ser los mismos, apenas difiriendo en algún parámetro. Igualmente no todos se pueden simular por la citada restricción de nodos.
- ✓ Aunque se pueden fijar las pérdidas del cobre y del hierro del transformador en valores por unidad, después resulta imposible medir las pérdidas reales que presenta el transformador en cada momento o las corrientes que provocan dichas pérdidas de forma directa. La obtención de estas se reduce a un balance entre el devanado

primario y secundario. El autor de este trabajo al menos no ha podido encontrar otra forma.

- ✓ Los valores RMS que se obtienen con las mediciones siguen presentado una gran oscilación incluso con cargas lineales y ondas perfectamente sinusoidales, lo que exige una etapa a mayores de normalización para poder obtener un valor con el que trabajar.
- ✓ En último lugar, este inconveniente tiene más que ver con el equipo informático en donde se está realizando la simulación. En este sentido, equipos con poca RAM o que esta esté ocupada en otros procesos, o igualmente con procesadores no muy potentes, la simulación puede tardar en ejecutarse más tiempo del que se había fijado en los parámetros que son modificables. Cuanta más RAM ocupada, el tiempo de simulación es mayor, aun teniendo tiempos entre muestras muy elevados.

6.3. Transformador trifásico reductor con circuito inversor DC-AC

6.3.1. Descripción del circuito

Una vez realizadas las simulaciones de forma individual de cada uno de los armónicos y sus efectos sobre el transformador, el último punto del trabajo se centra en el estudio de los efectos provocados por un circuito formado por la combinación de un circuito rectificador AC/DC y un inversor variador de la frecuencia DC/AC. El esquema de montaje se representa en la figura 29.

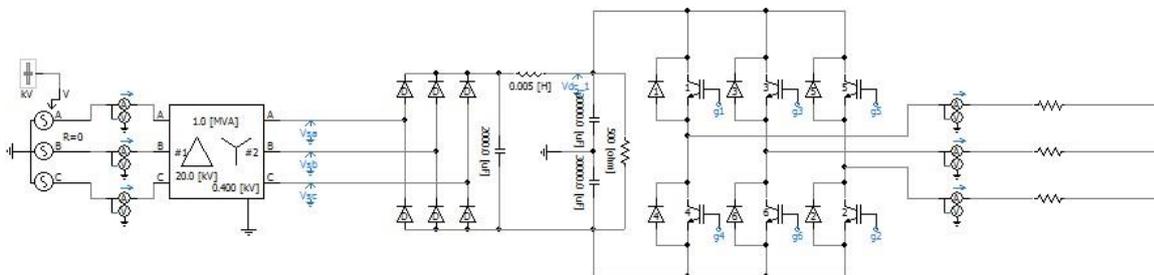


Figura 29: Esquema del circuito implementado en PSCAD con el rectificador/Inversor conectado al transformador.

Un aspecto importante a recalcar es que en ningún momento en este trabajo se persigue probar un elemento comercial en particular, por lo que ninguno de los valores de los elementos integrantes del circuito Rectificador/Inversor realizado, su funcionamiento, ni sus características en cuanto a rendimiento y eficacia de la transformación realizada, etc. se corresponden con valores ni esquemas de diseño de ningún dispositivo actualmente en el mercado. El circuito en PSCAD se ha obtenido por comparación de los esquemas más comunes que estos dos elementos, rectificador e inversor suelen presentar, esta vez sí, a modelos comerciales y existentes en la realidad.

Una vez aclarado este punto, los valores de las resistencias, condensadores y bobinas correspondientes al rectificador de onda completa, y el funcionamiento del tren de pulsos PWM que comanda el funcionamiento de los IGBTs del inversor, se han obtenido como fruto de simulaciones que tenían como objetivo ajustar el funcionamiento de este circuito a unos valores normales y aceptables, similares a los de otros circuitos reales.

6.3.2. Rectificador de onda completa

El rectificador de onda completa está formado por un puente de diodos que tiene como objetivo el poder utilizar ambos semiciclos positivos y negativos de la onda sinusoidal alterna, invirtiendo el semiciclo negativo para hacerlo positivo, y así poder después corregir la onda resultante mediante un proceso de filtración posterior y obtener a la salida una señal continua con un valor de rizado aceptable. En la figura 30 se detallan las sucesivas etapas y tipos de filtrado de las que se compone un rectificador de onda completa.

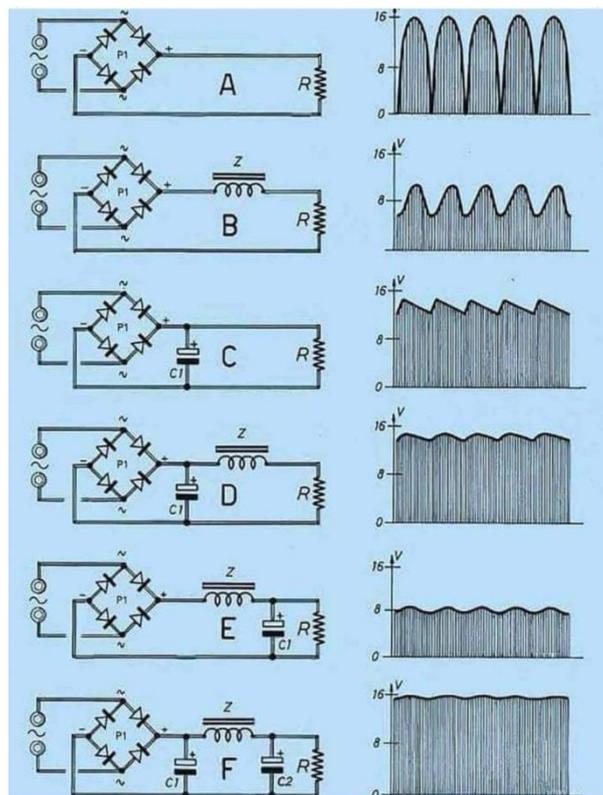


Figura 30: Formas de filtrado de la onda DC a la salida de un rectificador de onda completa.

- ➔ *Caso A:* Se trata del puente de diodos con la carga resistiva conectada. Su misión es la de invertir el semiciclo negativo de la onda alterna para hacerlo positivo.
- ➔ *Caso B:* La inclusión de una bobina en serie al circuito mejora el rizado de la onda, pero sigue presentando excesiva oscilación.
- ➔ *Caso C:* La inclusión de un condensador en paralelo en lugar de una bobina en serie disminuye aún más el rizado, que suele adoptar una forma parecida a los dientes de sierra.

- ➔ *Casos D, E y F:* Las distintas combinaciones de bobina y condensador, consiguen eliminar casi por completo el rizado de la onda continua resultante. Se trata de distintas formas de realizar un filtro de paso bajo.

En el caso de este trabajo, el circuito rectificador está formado por el puente de diodos de onda completa, y una etapa de filtrado de paso bajo a semejanza del descrito en el caso F de la figura 30. Mediante la combinación de estas etapas, se consigue filtrar la onda de salida del rectificador en torno a un valor eficaz continuo de 245,49 V, con un rizado dentro del rango de los 230 a 260 voltios para un valor de los condensadores de 100 mF. El circuito rectificador y su salida se muestran en la figura 31.

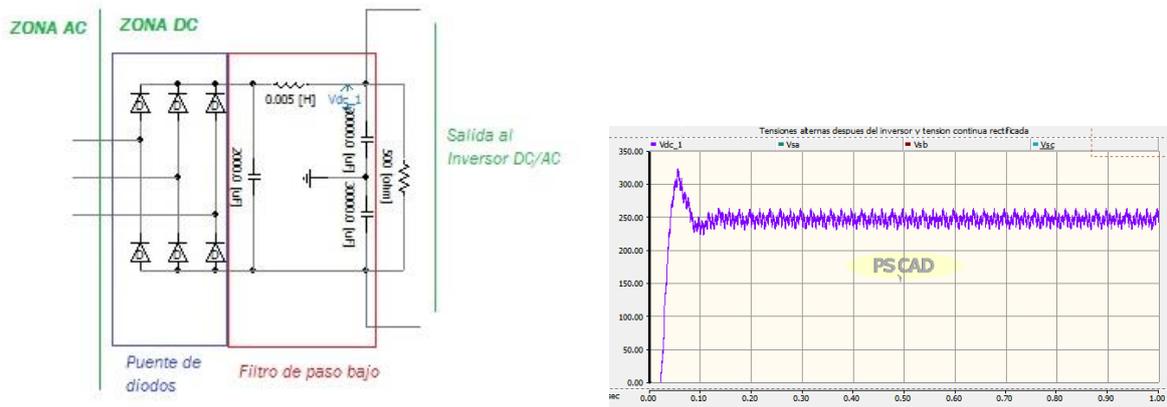


Figura 31: Rectificador y onda de salida del rectificador con el transformador a plena carga.

En la figura 31 se puede comprobar como el rectificador a su salida presenta un pico de tensión cercano a los 320 V, y quizás un rizado excesivo para el funcionamiento correcto de ciertos dispositivos electrónicos, pero no se persigue el mejorar este dispositivo en su completitud.

6.3.3. Inversor de alta frecuencia

El segundo circuito alimentado por el transformador consiste en un inversor de corriente que realiza la transformación de la tensión continua a tensión alterna a alta frecuencia. Este es el caso de los dispositivos de control de velocidad y arranque de muchos motores eléctricos. El circuito inversor está formado por la combinación de un par de transistores o IGBTs por fase que funcionan de forma alterna. De esta forma se consigue que la intensidad de corriente siga un recorrido distinto cada vez que se activan y desactivan los IGBTs, invirtiendo la tensión en cada cambio y consiguiendo la mencionada corriente alterna. La frecuencia de la onda de salida dependerá del número de veces que los pares de IGBTs alternen su activación por unidad de tiempo. Si la alternancia es mayor, mayor frecuencia de salida, y viceversa. El circuito inversor se muestra en la figura 32 junto al circuito que comanda los pulsos que reciben los IGBTs. Como se ha indicado en el apartado 2 de este trabajo, al ajustar el número de pulsos de trabajo de los IGBTs, se puede estar incurriendo en un mayor o menor contenido armónico que se libera a la red. En general, al aumentar el número de pulsos de trabajo, se disminuye la magnitud de los armónicos y se aumenta su orden. En este trabajo, se ha considerado oportuno establecer una frecuencia de trabajo de 1500 Hz, 30 veces superior a la frecuencia de la red.

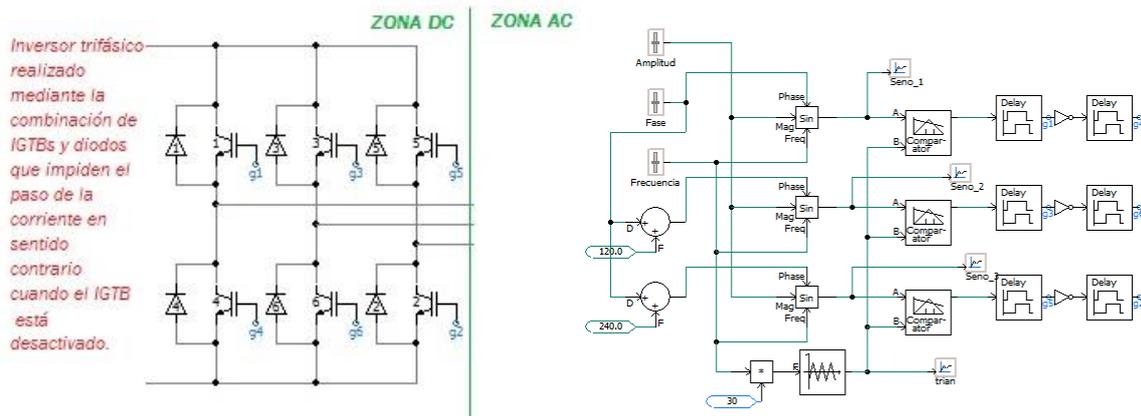


Figura 32: Circuito inversor a la derecha y lógica de funcionamiento a la izquierda.

En cuanto al generador del tren de pulsos que comandan la activación de los IGBTs, su funcionamiento se basa en la generación de una onda sinusoidal de frecuencia, amplitud y fase ajustable, que durante la simulación permanecen invariables (se ha visto que los mejores valores son una frecuencia de 50 Hz, una fase de 5 grados y una amplitud de 0,85).

A continuación se genera una onda triangular de alta frecuencia, multiplicando la frecuencia de la onda senoidal anteriormente citada por 30, parámetro escogido por experimentación y según el cual se han observado buenos resultados.

Ambas ondas (la senoidal y la triangular) se comparan, generando un pulso PWM de amplitud 1, tanto más amplio cuanto mayor sea la diferencia entre la onda senoidal con la triangular. La comparación se realiza por debajo de la onda senoidal.

Para controlar los pares de IGBTs de una misma fase, se interpone una puerta NOT entre ambos, de tal manera que cuando uno está abierto, el otro está cerrado y viceversa.

El resto de ondas sinusoidales de las demás fases se obtienen sumando un desfase 120 grados y 240 grados a la onda de la primera fase, siguiendo el mismo funcionamiento que la primera fase.

El tren de pulsos PWM y la onda cuadrada alterna del rectificador se muestran en las figuras 33 y 34 respectivamente.

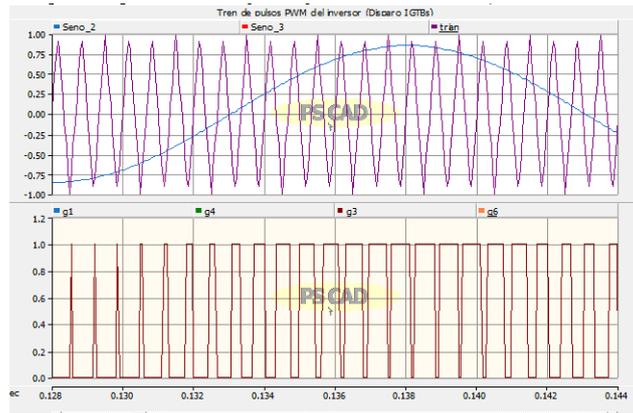


Figura 33: Onda triangular (gráfica superior) y tren de pulsos PWM (gráfica inferior) para el par de IGBTs de la segunda fase.

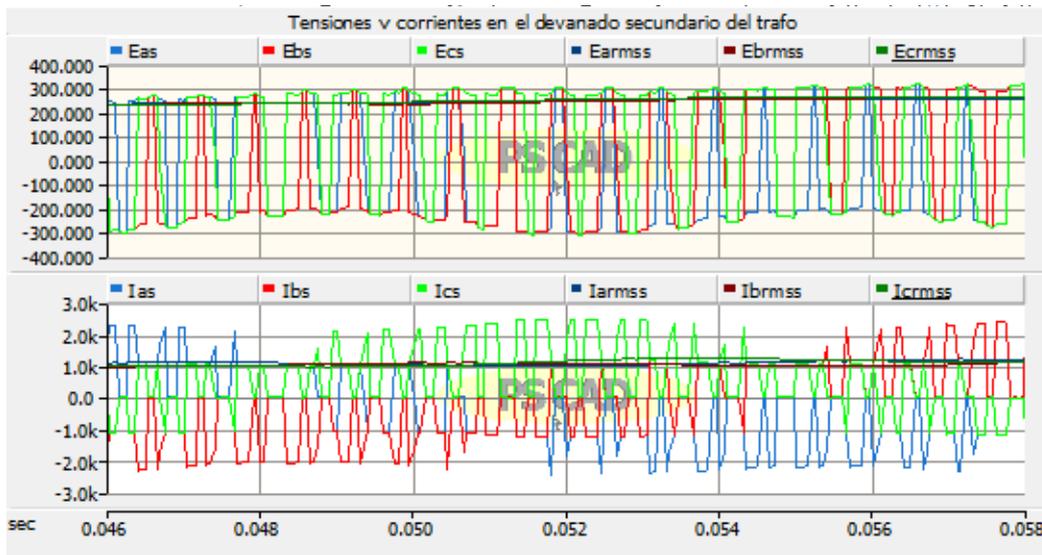


Figura 34: Ondas trifásicas alternas de tensión (gráfica superior) y corriente (gráfica inferior) a la salida del inversor, y valores efectivos.

6.3.4. Simulaciones

6.3.4.1. *Variando los condensadores que forman el filtro de paso bajo del rectificador*

Una de las pruebas que se ha decidido realizar es la de variar la capacidad de los condensadores que forman el filtro de paso bajo del rectificador (los dos de la parte derecha de la figura 32). En particular, se va a comprobar cómo se modifica el rizado de la onda continua del rectificador y si esta tiene alguna repercusión sobre los armónicos generados por el conjunto rectificador-inversor, además de comprobar la caída de tensión sufrida por el transformador así como las pérdidas de potencia activas. No se van a realizar cálculos teóricos en estos apartados puesto que se ha percatado que el modelo empleado de aproximaciones Kapp y el modelo de cálculo exacto con correcciones realizadas sobre la intensidad, tensión y potencias, no ha funcionado como se esperaba.

Para este apartado, debido a las limitaciones de simulación que tiene la versión gratuita de PSCAD, solo se han podido efectuar las simulaciones sobre cargas puramente resistivas conectadas en estrella. Al igual que en los casos anteriores, se lleva al transformador a

trabajar en los puntos de índice de carga igual a la unidad (plena carga), índice de carga de máximo rendimiento, e índice de carga 0,50 (media carga). Para ello, se han ido modificando las cargas con cada cambio en el valor de los condensadores, con objeto de que tras cada simulación, el transformador siga funcionando en el mismo punto de trabajo. Los valores de las cargas empleadas se muestran en la tabla 35.

Índice de Carga	Carga resistiva (Ω)		
	50 mF	75 mF	100 mF
C=1	0,1130	0,1115	0,1105
C=0,64	0,1933	0,1908	0,1890
C=0,50	0,2530	0,2500	0,2480

Tabla 35: Valores de las cargas resistivas para cada una de las situaciones simuladas.

Las simulaciones siguen siendo de 1 segundo en total. Los resultados obtenidos para cada una de las fases se muestran en las tablas 36, 37 y 38.

Índice de Carga	FASE 1					
	PRIMARIO			SECUNDARIO		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
	<i>Tensión (KV)</i>			<i>Tensión (V)</i>		
C=1	11.6498	11.6498	11.6498	231.1255	230.6183	230.3451
C=0,64	11.2968	11.2968	11.2968	224.9209	224.6806	224.5854
C=0,50	11.2968	11.2968	11.2968	225.3235	225.1485	225.0772
	<i>Intensidad (A)</i>			<i>Intensidad (A)</i>		
C=1	16.5712	16.5665	16.5607	1446.5732	1440.2901	1438.5915
C=0,64	10.5517	10.5537	10.5372	918.6168	917.4742	917.8059
C=0,50	8.4747	8.4681	8.4648	736.7597	736.4029	738.7284
	<i>Potencia Activa (kW)</i>			<i>Potencia Activa (kW)</i>		
C=1	301.3552	300.4932	300.0564	292.2812	290.5298	290.0996
C=0,64	183.6967	183.6876	183.4272	177.3174	177.1597	177.3391
C=0,50	145.9606	145.9084	145.9968	140.5543	140.6050	141.2291
	<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>			<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>		
C=1	108.0956	110.5904	110.5430	10.4883	5.2810	5.2659
C=0,64	68.7941	70.3674	177.3391	1.6825	1.6808	1.6844
C=0,50	57.9343	59.0532	58.8613	1.3985	3.9280	3.9424

Tabla 36: Resultados de la simulación del sistema Rectificador-Inversor con cargas resistivas para la Fase 1.

Índice de Carga	FASE 2					
	PRIMARIO			SECUNDARIO		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
	<i>Tensión (KV)</i>			<i>Tensión (V)</i>		
C=1	11.6422	11.6422	11.6422	231.4898	230.6874	230.4473
C=0,64	11.2894	11.2894	11.2894	225.1022	224.7087	224.6235
C=0,50	11.2894	11.2894	11.2894	225.3190	225.1766	225.0892
	<i>Intensidad (A)</i>			<i>Intensidad (A)</i>		
C=1	16.6089	16.6051	16.6313	1504.2589	1502.4091	1499.1469
C=0,64	10.5790	10.6007	10.6337	964.1545	962.3775	959.8819
C=0,50	8.4956	8.5160	8.5327	775.6693	773.0438	769.7552
	<i>Potencia Activa (kW)</i>			<i>Potencia Activa (kW)</i>		

C=1	300.6171	299.4575	299.5975	304.1725	302.8651	301.8502
C=0,64	183.2970	183.5450	184.2302	185.9694	185.4949	185.0945
C=0,50	145.6807	146.0544	146.5488	147.7840	147.2604	146.8157
	<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>			<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>		
C=1	103.3535	105.8735	106.0432	8.3119	5.5053	5.4828
C=0,64	67.3581	67.4721	185.0945	0.8747	1.7685	1.7646
C=0,50	54.3390	55.7484	55.8658	1.4282	2.9168	3.0567

Tabla 37: Resultados de la simulación del sistema Rectificador-Inversor con cargas resistivas para la Fase 2.

Índice de Carga	FASE 3					
	PRIMARIO			SECUNDARIO		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
	<i>Tensión (KV)</i>			<i>Tensión (V)</i>		
C=1	11.6437	11.6437	11.6437	231.2616	230.6732	230.2964
C=0,64	11.2909	11.2909	11.2909	224.8475	224.6546	224.4144
C=0,50	11.2909	11.2909	11.2909	225.2190	224.9421	224.8988
	<i>Intensidad (A)</i>			<i>Intensidad (A)</i>		
C=1	16.3018	16.2795	16.3136	1448.0912	1449.1600	1456.1124
C=0,64	10.3382	10.6007	10.4209	923.1865	929.3596	937.1091
C=0,50	8.2923	8.3250	8.3678	742.0234	748.7975	754.6204
	<i>Potencia Activa (kW)</i>			<i>Potencia Activa (kW)</i>		
C=1	295.6756	294.3751	294.5250	292.4892	292.2000	293.4384
C=0,64	179.4269	179.7805	180.7055	178.0719	179.2595	180.8208
C=0,50	142.3793	142.9266	143.7592	141.4510	142.7633	143.9846
	<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>			<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>		
C=1	108.8469	111.1671	111.3944	8.0038	5.3179	5.3235
C=0,64	71.8813	73.5882	180.8208	3.3827	4.9453	4.9875
C=0,50	57.8908	59.3342	59.6685	3.9615	3.9945	5.0989

Tabla 38: Resultados de la simulación del sistema Rectificador-Inversor con cargas resistivas para la Fase 3.

6.3.4.2. Conclusiones obtenidas

Observando las tablas anteriores, se pueden obtener las siguientes conclusiones.

En primer lugar, se presenta el contenido armónico generado para cada una de las simulaciones realizadas, las cuales pueden observarse para cada índice de carga y fase, en las tablas 39, 40 y 41. Se ha realizado la transformada de Fourier hasta el armónico de orden 15 con PSCAD (mediante el componente de nombre "FFT" disponible en la librería que incorpora el programa por defecto, así también se probará la idoneidad de este componente). Las columnas están marcadas por colores para poder después establecer una relación directa con las posteriores gráficas y evitar la confusión.

Orden	ARMONICOS C=1 (unidades en kA)								
	FASE 1			FASE 2			FASE 3		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
1	1.3067	1.3063	1.3078	1.3568	1.3607	1.3610	1.3057	1.3123	1.3219
2	0.3138	0.3178	0.3185	0.3425	0.3506	0.3519	0.3113	0.3200	0.3263
3	0.3556	0.3464	0.3415	0.3787	0.3686	0.3619	0.3589	0.3517	0.3490

4	0.3809	0.3556	0.3424	0.3891	0.3615	0.3463	0.3874	0.3613	0.3475
5	0.1071	0.1275	0.1356	0.1033	0.1286	0.1388	0.1025	0.1249	0.1344
6	0.0311	0.0450	0.0515	0.0331	0.0497	0.0570	0.0276	0.0439	0.0520
7	0.0446	0.0442	0.0473	0.0404	0.0406	0.0458	0.0450	0.0428	0.0458
8	0.1115	0.1036	0.0997	0.1149	0.1046	0.0992	0.1157	0.1072	0.1022
9	0.0599	0.0662	0.0682	0.0620	0.0689	0.0709	0.0635	0.0691	0.0708
10	0.0427	0.0502	0.0536	0.0422	0.0511	0.0554	0.0422	0.0490	0.0532
11	0.0596	0.0509	0.0465	0.0637	0.0514	0.0454	0.0667	0.0548	0.0486
12	0.0577	0.0588	0.0582	0.0564	0.0593	0.0588	0.0553	0.0579	0.0581
13	0.0161	0.0133	0.0130	0.0159	0.0126	0.0134	0.0183	0.0134	0.0125
14	0.0061	0.0115	0.0144	0.0066	0.0111	0.0120	0.0066	0.0143	0.0174
15	0.0342	0.0276	0.0238	0.0290	0.0261	0.0236	0.0296	0.0207	0.0171

Tabla 39: Distribución y magnitud de los armónicos para cada fase y situación simulada con índice de plena carga.

Orden	ARMONICOS C=0,64 (unidades en kA)								
	FASE 1			FASE 2			FASE 3		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
1	0.8042	0.8065	0.8084	0.8426	0.8444	0.8443	0.8070	0.8157	0.8243
2	0.2237	0.2276	0.2296	0.2479	0.2530	0.2533	0.2249	0.2336	0.2396
3	0.2428	0.2394	0.2380	0.2627	0.2578	0.2542	0.2455	0.2449	0.2457
4	0.2772	0.2633	0.2561	0.2858	0.2701	0.2615	0.2806	0.2671	0.2603
5	0.0870	0.0968	0.1006	0.0852	0.0977	0.1026	0.0858	0.0964	0.1010
6	0.0144	0.0221	0.0263	0.0149	0.0248	0.0296	0.0143	0.0224	0.0275
7	0.0393	0.0318	0.0299	0.0356	0.0279	0.0272	0.0406	0.0318	0.0293
8	0.0798	0.0759	0.0737	0.0828	0.0774	0.0744	0.0815	0.0776	0.0751
9	0.0520	0.0569	0.0587	0.0514	0.0568	0.0586	0.0520	0.0570	0.0590
10	0.0320	0.0369	0.0396	0.0317	0.0374	0.0409	0.0304	0.0348	0.0385
11	0.0457	0.0403	0.0373	0.0471	0.0401	0.0365	0.0472	0.0411	0.0377
12	0.0317	0.0347	0.0355	0.0328	0.0359	0.0367	0.0315	0.0346	0.0357
13	0.0171	0.0131	0.0113	0.0197	0.0148	0.0123	0.0169	0.0143	0.0126
14	0.0021	0.0054	0.0072	0.0039	0.0084	0.0108	0.0012	0.0049	0.0072
15	0.0162	0.0163	0.0165	0.0231	0.0178	0.0149	0.0247	0.0246	0.0230

Tabla 40: Distribución y magnitud de los armónicos para cada fase y situación simulada con índice de carga de máximo rendimiento.

Orden	ARMONICOS C=0,50 (unidades en kA)								
	FASE 1			FASE 2			FASE 3		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
1	0.6332	0.6354	0.6387	0.6654	0.6657	0.6643	0.6369	0.6450	0.6512
2	0.1890	0.1925	0.1951	0.2105	0.2138	0.2137	0.1913	0.1993	0.2043
3	0.1985	0.1966	0.1966	0.2165	0.2127	0.2098	0.2015	0.2025	0.2037
4	0.2349	0.2250	0.2203	0.2433	0.2318	0.2254	0.2377	0.2285	0.2238
5	0.0834	0.0900	0.0927	0.0833	0.9165	0.0948	0.0830	0.0904	0.0937
6	0.0149	0.0187	0.0213	0.0147	0.0198	0.0229	0.0157	0.0188	0.0217
7	0.0404	0.0322	0.0287	0.0367	0.0279	0.0252	0.0413	0.0318	0.0278
8	0.0662	0.0638	0.0624	0.0682	0.0649	0.0629	0.0672	0.0647	0.0632
9	0.0515	0.0556	0.0575	0.0507	0.0560	0.0577	0.0500	0.0552	0.0576
10	0.0299	0.0327	0.0349	0.0289	0.0330	0.0355	0.0275	0.0311	0.0341
11	0.0299	0.0416	0.0391	0.0443	0.0399	0.0373	0.0447	0.0402	0.0376
12	0.0234	0.0256	0.0265	0.0248	0.0277	0.0283	0.0222	0.0255	0.0271

13	0.0170	0.0148	0.0135	0.0181	0.0162	0.0149	0.0149	0.0136	0.0130
14	0.0028	0.0039	0.0053	0.0022	0.0056	0.0071	0.0029	0.0021	0.0045
15	0.0150	0.0125	0.0112	0.0212	0.0200	0.0183	0.0152	0.0171	0.0177

Tabla 41: Distribución y magnitud de los armónicos para cada fase y situación simulada con índice de media carga.

Con objeto de poder observar los datos de forma que se puedan comparar, se han establecido un gráfico comparativo de barras y uno de líneas que permitirán obtener las conclusiones deseadas a los resultados obtenidos. Estos gráficos se corresponden con la figura 35 y se encuentran superpuestos.

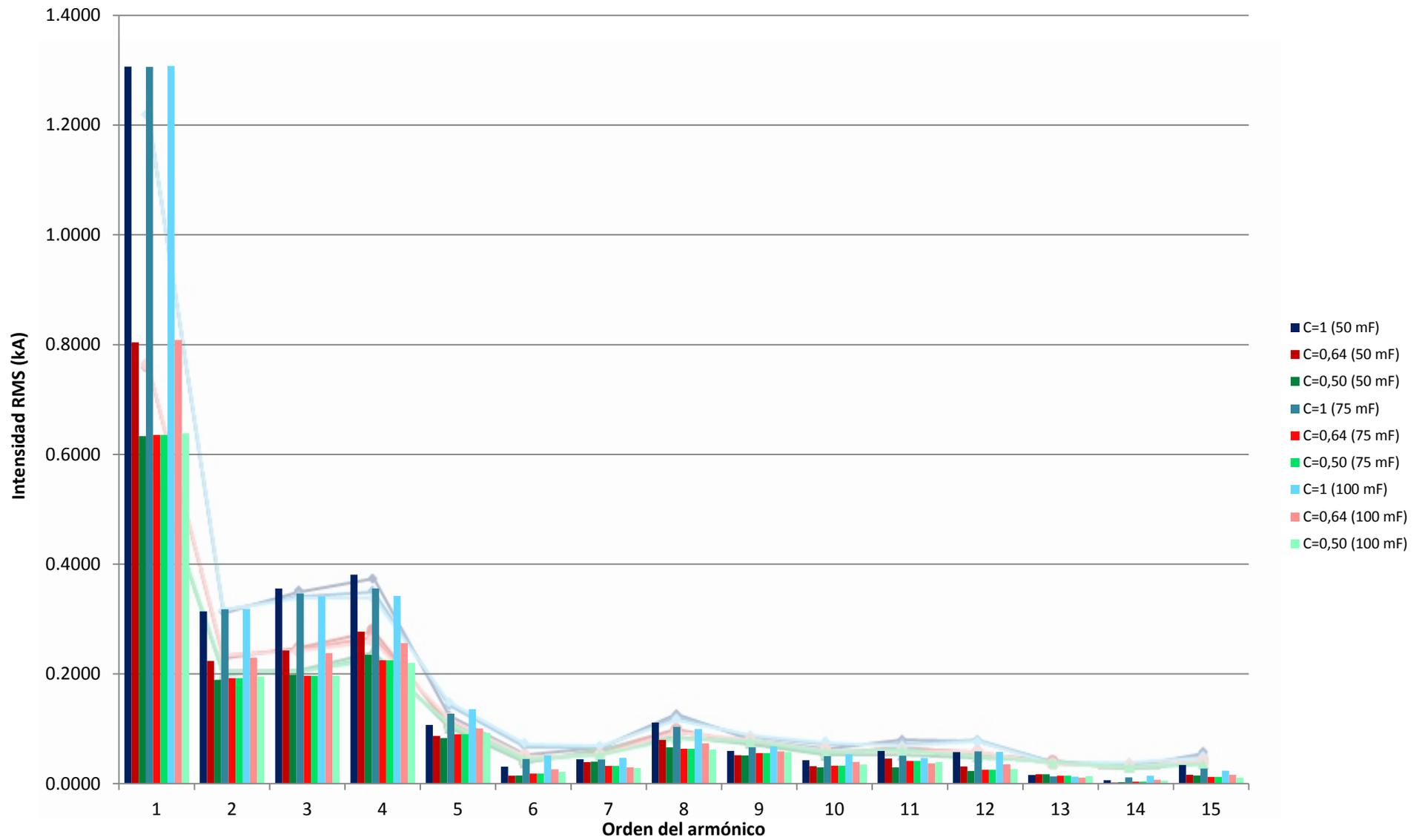


Figura 35: Transformada de Fourier realizada a la intensidad de corriente de la fase 1 (gráfico de barras).

Los armónicos de mayor magnitud a la vista de los resultados expuestos en la figura 35, son del orden 2 al 4, existiendo un ligero repunte en el orden 5 y del 8 al 12.

- *Para índices de plena carga ($C=1$):* No se observa en general que, con el cambio de la capacidad de los condensadores, exista un cambio drástico en la magnitud de los armónicos, al menos en armónicos de orden 1, 2, y del 7 al 15.

En el caso del tercer y cuarto armónico, conforme la capacidad del condensador pasa de 50 mF a 100 mF, la magnitud del armónico desciende. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en el apartado anterior, una disminución de la magnitud del tercer armónico produce menores sobretensiones, menos pérdidas activas y, para el caso de la carga puramente resistiva un ligero aumento del rendimiento. Además se observaba que estos efectos se atenuaban conforme el índice de carga disminuía, aunque se prestará especial atención a estas observaciones en las comprobaciones posteriores.

En cambio para el quinto y sexto armónico, la misma observación anterior se invierte, aumentando la magnitud del armónico con el mayor valor de los condensadores. El séptimo armónico mantiene su magnitud en su mayoría al variar la capacidad. El quinto y séptimo armónico en cargas puramente resistivas tenían efectos distintos a los del tercer armónico, pues provocaban una disminución, aunque ínfima del rendimiento del transformador, y también unas mayores caídas de tensiones, además de un mayor rizado de la onda de corriente.

- *Para índices de carga de máximo rendimiento ($C=0,64$):* Los mayores cambios se producen en los armónicos de primero al cuarto orden, en donde para una capacidad de 75 mF la magnitud de los armónicos disminuye de forma notable respecto a la misma situación simulada para capacidades de 50 mF y 100 mF.
- *Para un índice media carga ($C=0,50$):* La magnitud en todos los casos simulados es prácticamente similar, no existiendo diferencias significativas al variar la capacidad de los condensadores.

En cuanto a la caída de tensión, las tablas permiten observar cual es la tendencia del valor eficaz de la tensión en el devanado secundario, el cual es mayor para el caso del transformador funcionando a carga de máximo rendimiento. En cambio, para situaciones de plena carga, en vez de una caída de tensión, se ha sufrido sobretensiones en los devanados. Estas a su vez son modificadas por los distintos valores de los condensadores del filtro de paso bajo del rectificador. En todos los casos puede observarse como un aumento de la capacidad de los condensadores conlleva una mayor caída de tensión, lo cual hace que la mayor caída de tensión se sufra para los valores de capacidad de 100 mF. A su vez, conforme el índice de carga disminuye, esta corrección apreciada en la caída de tensión se hace cada vez más débil, como se pudo observar en el apartado anterior. Los datos enunciados se pueden comprobar en la tabla 43. El fuerte contenido en cuanto a tercer armónico puede haber provocado las sobretensiones que igualmente se observan en la tabla 43 para situaciones de plena carga, en donde el factor de contribución respecto a la totalidad de armónicos estudiados representa un 27,21%, respecto al 8,20% y 3,41% del quinto y séptimo

armónico. Así mismo, se puede observar como con el aumento de la capacidad, el factor de la contribución del quinto y séptimo armónico son mayores respecto a la situación de 50 mF, siendo el quinto armónico el que presenta un mayor aumento de la magnitud, lo cual debiera traducirse en mayores caídas de tensión. Este efecto de tensión, nuevamente, es menor cuanto menor sea el índice de carga.

		FASE 1 (Factor de Contribución)			AUMENTOS Y DISMINUCIONES DE MAGNITUD (*)		
		50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
Tercer armónico	C=1	27.21%	26.52%	26.11%		-2.58%	-3.98%
	C=0,64	30.19%	29.68%	29.43%		-1.39%	-1.98%
	C=0,50	31.34%	30.94%	30.78%		-0.95%	-0.95%
Quinto armónico	C=1	8.20%	9.76%	10.37%		19.04%	26.57%
	C=0,64	10.81%	12.00%	12.45%		11.30%	15.75%
	C=0,50	13.17%	14.16%	14.52%		7.88%	11.21%
Séptimo armónico	C=1	3.41%	3.38%	3.62%		-0.90%	6.14%
	C=0,64	4.89%	3.95%	3.70%		-19.06%	-23.88%
	C=0,50	6.38%	5.06%	4.49%		-20.32%	-28.98%

*Los aumentos y disminuciones se han practicados tomando como referencia los valores de magnitud de 50 mF para cada situación.

** El factor de contribución representa el % que la corriente formada por dicho armónico, tras realizar la transformada de Fourier, forma parte de la onda de corriente con todos los armónicos.

Tabla 42: Factor de contribución del tercer, quinto y séptimo armónico y aumentos y disminuciones de magnitud.

CAIDAS DE TENSIÓN EN EL SECUNDARIO										
I. de Carga		50 mF			75 mF			100 mF		
		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3
C=1		0.49%	0.65%	0.55%	0.27%	0.30%	0.29%	0.15%	0.19%	0.13%
		0.56%			0.29%			0.16%		
C=0,64		-2.21%	-2.13%	-2.24%	-2.31%	-2.30%	-2.32%	-2.35%	-2.34%	-2.43%
		-2.19%			-2.31%			-2.37%		
C=0,50		-2.03%	-2.04%	-2.08%	-2.11%	-2.10%	-2.20%	-2.14%	-2.14%	-2.22%
		-2.05%			-2.14%			-2.16%		

Tabla 43: Caída de tensión sufrida en el devanado secundario para cada una de las situaciones simuladas.

De las tablas 42 y 43 se pueden comprobar las suposiciones mencionadas anteriormente, en donde para situaciones con factor de plena carga (C=1) las caídas de tensión son menores e incluso existen sobretensiones debido a una mayor presencia del tercer armónico. Del mismo modo, La caída de tensión se acentúa para el índice de carga de máximo rendimiento en donde se obtienen las mayores caídas, provocadas por un aumento notable del quinto armónico y la ligera disminución del tercero. Para un índice de media carga (C=0,50), la disminución de tensión se debilita, en parte por el menor aumento del quinto armónico y la disminución súbita del séptimo, como se observa en la tabla 42 y 43.

Por último, conforme la capacidad del condensador aumenta, la magnitud en general de los armónicos disminuye, lo cual provoca un aumento cada vez más leve del quinto armónico, y disminuciones cada vez más significativas del séptimo, e igualmente en el tercer armónico. Esto se traduce en que las mayores caídas de tensiones se sufren a su vez para situaciones de capacidad de 100 mF.

En cuanto a las pérdidas, estas han sido recogidas en la tabla 44.

	Pérdidas en el Transformador (W)			AUMENTOS Y DISMINUCIONES (*)		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
C=1	8704.9478	8730.9152	8790.7099		0.30%	0.99%
C=0,64	5061.8786	5098.9475	5108.5103		0.73%	0.92%
C=0,50	4231.3709	4260.6916	4275.3963		0.69%	1.04%

*Los aumentos y disminuciones se han practicados tomando como referencia los valores de magnitud de 50 mF para cada situación.

Tabla 44: Pérdidas de potencia activa en el transformador en Watios para cada situación simulada.

De la tabla 44 se pueden obtener también importantes conclusiones. La primera de todas ellas es perceptible a simple vista como cabría esperar, y es que las pérdidas son mayores a índices de carga superior. Sin embargo, los mayores aumentos de pérdidas se dan para menores índices de carga, y dentro de esta tendencia, cuanto mayor sea la capacidad del condensador parece ser que los aumentos se acentúan ligeramente. Si se establece una relación con la presencia de armónicos, nuevamente los menores aumentos de pérdidas se dan para las situaciones de mayor índice de carga, que según la tabla 42 tienen un mayor contenido en tercer armónico. Conforme el índice de carga disminuye y la contribución del quinto y séptimo armónico se hace mayor, las pérdidas aumentan aunque estos dos armónicos de forma individual no presentaban esta tendencia, lo cual suscita a que se deba a una combinación de armónicos más que a la presencia de estos, además de la disminución del tercero.

Al igual que con la caída de tensión, también se observa una tendencia al aumentar la capacidad de los condensadores, la cual se traduce en un mayor aumento a su vez de las pérdidas.

En última instancia, se comprobará cual es el rizado tanto de las ondas de corriente como el de las ondas de tensión, con objeto de observar en que situaciones se produce un mayor o menor rizado de las ondas de corriente. Estas comparaciones solamente se realizarán para la fase 1 por simplificación del trabajo, pudiendo ser observadas en la figura 36. En el resto de fases se han observado las mismas tendencias expuestas que para la fase 1.

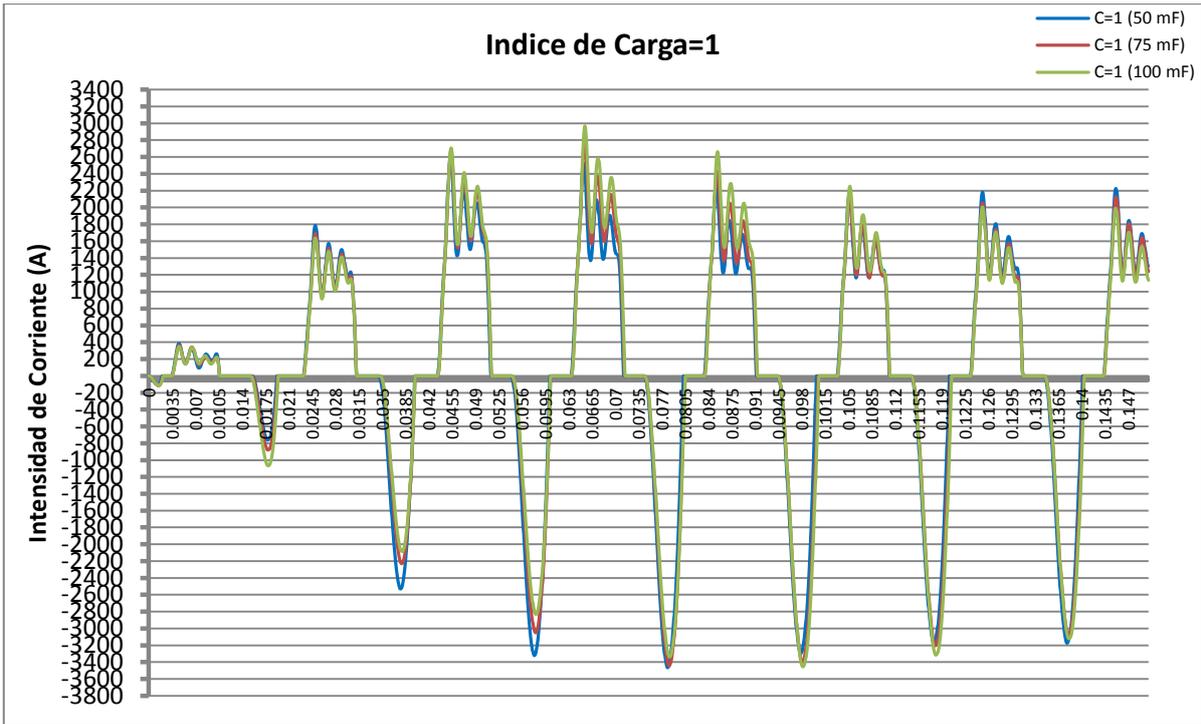


Figura 36: Onda de Intensidad de corriente para un índice de carga =1 y distintos valores de capacidad del condensador sobre el devanado secundario.

Tanto para un índice de carga la unidad, como para máximo rendimiento y media carga se observa como la onda de intensidad de corriente de 100 mF es la que presenta un mayor sobrepico hacia los 0,07 segundos, mientras que una vez que se normaliza la situación hacia el segundo 0,126 es la onda de 50 mF es la que presenta mayores oscilaciones. Esta diferencia es mayor para índices de carga diferentes a la unidad, como se observa en la figura 37.

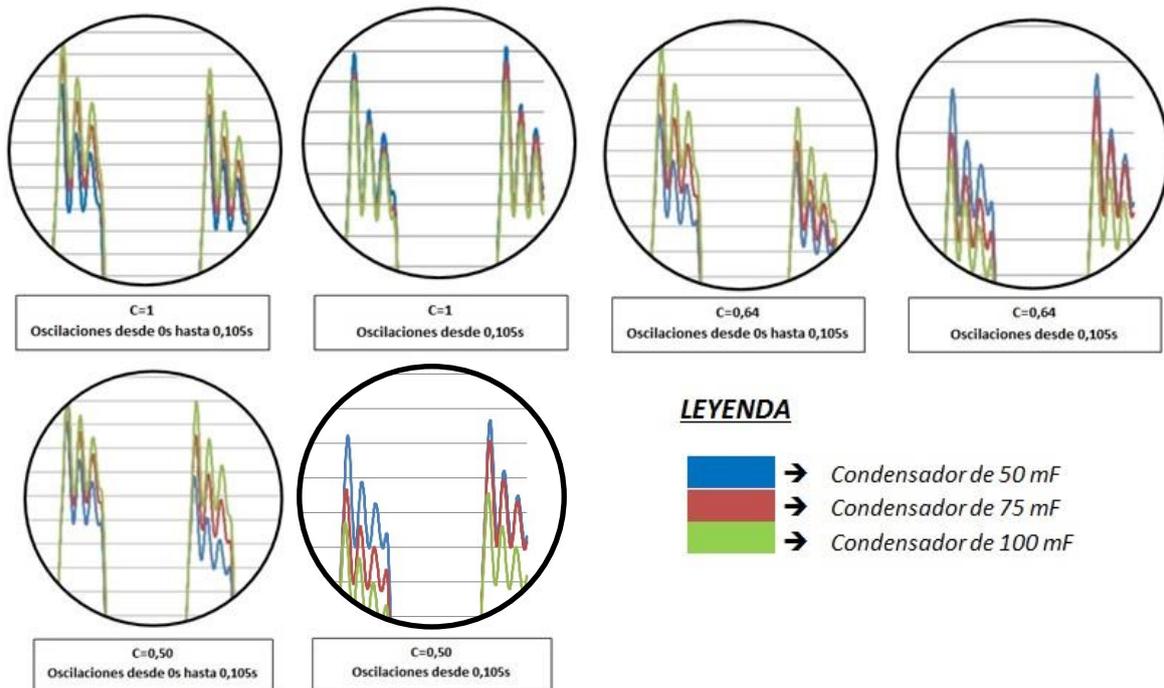


Figura 37: Oscilaciones de la onda de corriente para distintas muestras de tiempo en el devanado secundario.

Las oscilaciones de la tensión debido a la presencia de los armónicos se puede observar en la figura 38.

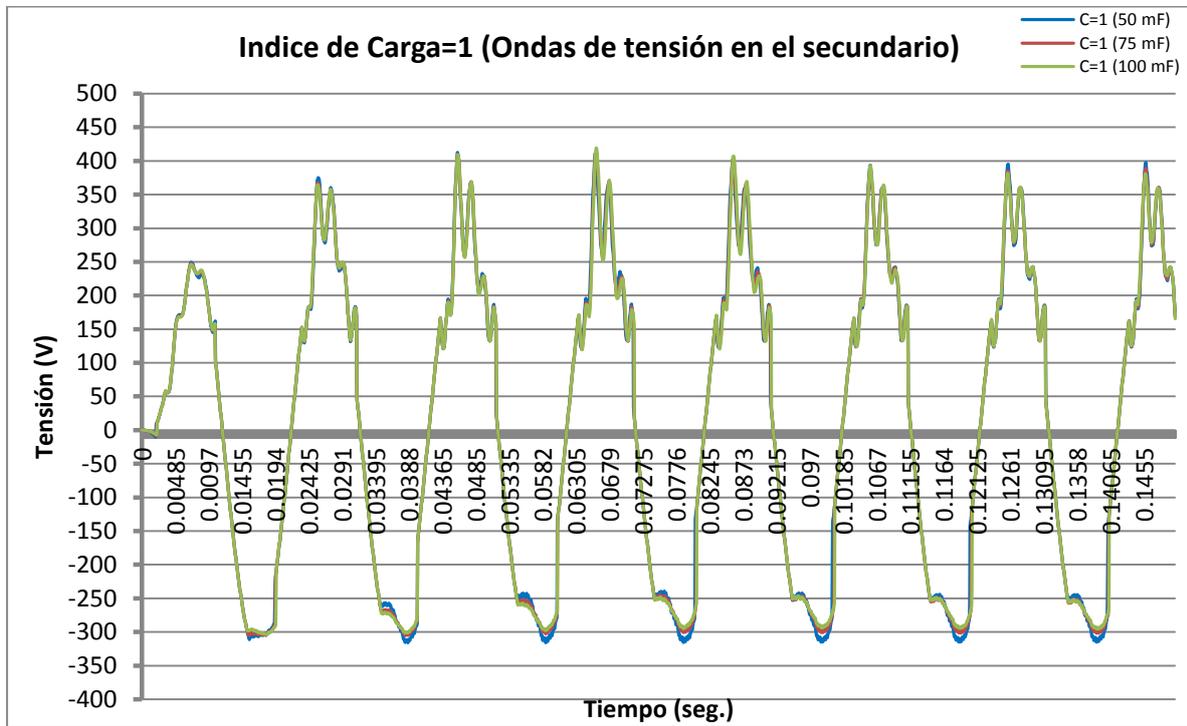


Figura 38: Contenido armónico de la onda de tensión para un índice de carga igual a la unidad, sobre el devanado secundario.

El rizado y las oscilaciones para el resto de los casos simulados para la tensión, a diferencia de la intensidad de corriente, no presentan comportamientos diferentes apreciables entre sí, salvo las caídas de tensión mencionadas. La forma y el rizado es similar en todas ellas, y a lo mostrado en la figura 38.

	50 mF	75 mF	100 mF
Tensión Rectificador (F-F) (V)			
C=1	509.0002	505.4627	503.5183
C=0,64	517.5073	514.8313	513.5623
C=0,50	526.9289	524.6414	523.5725
Tensión Rectificador (F-N) (V)			
C=1	247.4122	247.3447	247.2569
C=0,64	249.1976	249.1283	249.2454
C=0,50	252.5220	252.4220	252.5783

Tabla 45: Tensiones continuas del rectificador.

En la tabla 45, se reúnen todos los valores eficaces de la tensión continua tanto para fase-neutro como entre fases. Como era de esperar, los mayores rizados se presentan para los valores de capacidad menores, lo cual se traduce a su vez en un aumento del valor eficaz de la tensión. A su vez, a medida que el índice de carga disminuye, el aumento del valor eficaz también aumenta. Los mayores sobrepicos, igualmente, en cuanto a tensión continua se producen para las capacidades de 50 mF.

6.3.4.3. Variando la frecuencia de activación de los IGBTs del inversor

Por último se ha intentado comprobar cuáles son las repercusiones sobre el transformador de un cambio en la frecuencia del tren de pulsos PWM que comanda la activación de los 6 IGBTs de los que se compone el circuito inversor. Al igual que lo ocurrido en el apartado anterior, debido a las limitaciones de simulación que tiene la versión gratuita de PSCAD, solo se han podido efectuar las simulaciones sobre cargas puramente resistivas conectadas en estrella, y al igual que en los casos anteriores, se lleva al transformador a trabajar en los puntos de índice de carga igual a la unidad (plena carga), índice de carga de máximo rendimiento (0,64), e índice de carga 0,50 (media carga). Para ello, se han ido modificando las cargas con cada cambio en el valor de los condensadores, con objeto de que tras cada simulación, el transformador siga funcionando en el mismo punto de trabajo. Los valores de las cargas empleadas se muestran en la tabla 46. Los tiempos de simulación son idénticos que para las simulaciones variando la capacidad de los condensadores.

Índice de Carga	Carga resistiva (Ω)		
	750Hz	1100Hz	1500Hz
C=1	0,1247	0,1178	0,1105
C=0,64	0,2099	0,1993	0,1890
C=0,50	0,2858	0,2720	0,2480

Tabla 46: Valores de las cargas resistivas para cada una de las situaciones simuladas.

Realizando una comparación con los valores necesarios para llevar al transformador ante las mismas situaciones de carga, se puede observar como en este caso se ha incrementado el valor de la resistencia. Esta observación se puede realizar comprobando el valor para 1500 Hz y un valor de capacidad de condensador de 100 mF. Esta capacidad ha permanecido constante en todas las simulaciones, solamente variando la frecuencia decrementándola en un cuarto (1100Hz) y a la mitad (1500Hz).

En cuanto a los resultados, pueden visualizarse en las tablas 47, 48 y 49.

Índice de Carga	FASE 1					
	PRIMARIO			SECUNDARIO		
	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
	<i>Tensión (KV)</i>			<i>Tensión (V)</i>		
C=1	11.6500	11.6499	11.6498	230.6582	230.3531	230.3451
C=0,64	11.2969	11.2969	11.2968	224.5352	224.5352	224.5854
C=0,50	11.2970	11.2969	11.2968	225.1086	225.0772	225.0772
	<i>Intensidad (A)</i>			<i>Intensidad (A)</i>		
C=1	16.6700	16.6691	16.5607	1491.4233	1484.1217	1438.5915
C=0,64	10.7291	10.7291	10.5372	957.8021	957.8021	917.8059
C=0,50	8.3332	8.3337	8.4648	749.6317	744.6444	738.7284
	<i>Potencia Activa (kW)</i>			<i>Potencia Activa (kW)</i>		
C=1	300.4961	300.8646	300.0564	300.4619	298.7659	290.0996
C=0,64	186.2791	186.2791	183.4272	184.8080	184.8080	177.3391
C=0,50	143.0629	143.1816	145.9968	142.8853	141.9125	141.2291
	<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>			<i>Potencia Reactiva (kVAr)</i>		

C=1	114.0902	113.2688	110.5430	8.1872	5.4313	5.2659
C=0,64	72.8323	72.8323	70.2594	1.7572	1.7572	1.6844
C=0,50	57.1668	56.8935	58.8613	4.0044	3.9746	3.9424

Tabla 47: Resultados de la simulación del sistema Inversor con cargas resistivas para la Fase 1.

Índice de Carga	FASE 2					
	PRIMARIO			SECUNDARIO		
	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
	Tensión (KV)			Tensión (V)		
C=1	11.6424	11.6423	11.6422	230.5806	230.5248	230.4473
C=0,64	11.2895	11.2895	11.2894	224.5595	224.5595	224.6235
C=0,50	11.2896	11.2895	11.2894	225.1022	225.0892	225.0892
	Intensidad (A)			Intensidad (A)		
C=1	16.7442	16.9541	16.6313	1497.6951	1500.8191	1499.1469
C=0,64	10.8566	10.8566	10.6337	966.1301	966.1301	959.8819
C=0,50	8.3706	8.4060	8.5327	745.2343	750.2062	769.7552
	Potencia Activa (kW)			Potencia Activa (kW)		
C=1	303.0915	307.7405	299.5975	301.2997	303.5340	301.8502
C=0,64	188.8423	188.8423	184.2302	186.9101	186.9101	185.0945
C=0,50	143.6705	144.5037	146.5488	141.7991	143.2055	146.8157
	Potencia Reactiva (kVAr)			Potencia Reactiva (kVAr)		
C=1	104.2290	107.9882	106.0432	11.0286	10.8969	5.4828
C=0,64	67.5166	67.5166	67.5166	0.8327	0.8327	1.7646
C=0,50	52.3332	53.7845	55.8658	1.3717	1.3806	3.0567

Tabla 48: Resultados de la simulación del sistema Inversor con cargas resistivas para la Fase 2.

Índice de Carga	FASE 3					
	PRIMARIO			SECUNDARIO		
	50 mF	75 mF	100 mF	50 mF	75 mF	100 mF
	Tensión (KV)			Tensión (V)		
C=1	11.6439	11.6438	11.6437	230.4530	230.2960	230.2964
C=0,64	11.2910	11.2910	11.2909	224.5314	224.5314	224.4144
C=0,50	11.2911	11.2910	11.2909	224.9617	224.8988	224.8988
	Intensidad (A)			Intensidad (A)		
C=1	16.9871	16.9914	16.3136	1491.1668	1509.4085	1456.1124
C=0,64	10.8865	10.8865	10.4209	967.5305	967.5305	937.1091
C=0,50	8.4935	8.4330	8.3678	751.8191	748.8465	754.6204
	Potencia Activa (kW)			Potencia Activa (kW)		
C=1	308.9815	307.7802	294.5250	301.8250	304.7890	293.4384
C=0,64	189.0126	189.0126	180.7055	186.7600	186.7600	180.8208
C=0,50	145.9841	144.7525	143.7592	143.4518	142.6752	143.9846
	Potencia Reactiva (kVAr)			Potencia Reactiva (kVAr)		
C=1	110.8819	115.9232	111.3944	10.9608	8.3366	5.3235
C=0,64	74.1143	74.1143	73.8959	3.5468	3.5468	4.9875
C=0,50	58.0879	58.9152	59.6685	4.0163	3.9980	5.0989

Tabla 49: Resultados de la simulación del sistema Inversor con cargas resistivas para la Fase 3.

6.3.4.4. Conclusiones obtenidas

En primer lugar se observará como es la sucesión de los armónicos con objeto de poder establecer sendas correlaciones con los datos de las tablas y posteriores gráficas, además de poder establecer una comparación con los resultados obtenidos variando la capacidad de los condensadores del conjunto rectificador. Los resultados se muestran en las tablas 50, 51 y 52.

Orden	ARMONICOS C=1								
	FASE 1			FASE 2			FASE 3		
	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
1	1.3533	1.3478	1.3078	1.3483	1.3549	1.3610	1.3453	1.3628	1.3219
2	0.3422	0.3401	0.3185	0.3324	0.3253	0.3519	0.3120	0.3319	0.3263
3	0.3598	0.3555	0.3415	0.3712	0.3736	0.3619	0.3700	0.3739	0.3490
4	0.3523	0.3477	0.3424	0.3975	0.3978	0.3463	0.3969	0.3957	0.3475
5	0.1366	0.1397	0.1356	0.1141	0.1014	0.1388	0.0995	0.1083	0.1344
6	0.0530	0.0549	0.0515	0.0303	0.0289	0.0570	0.0253	0.0322	0.0520
7	0.0445	0.0464	0.0473	0.0454	0.0435	0.0458	0.0473	0.0441	0.0458
8	0.1009	0.0999	0.0997	0.1154	0.1173	0.0992	0.1173	0.1164	0.1022
9	0.0734	0.0721	0.0682	0.0668	0.0604	0.0709	0.0626	0.0632	0.0708
10	0.0533	0.0566	0.0536	0.0424	0.0395	0.0554	0.0405	0.0415	0.0532
11	0.0545	0.0500	0.0465	0.0703	0.0658	0.0454	0.0743	0.0644	0.0486
12	0.0642	0.0604	0.0582	0.0668	0.0562	0.0588	0.0636	0.0574	0.0581
13	0.0169	0.0139	0.0130	0.0257	0.0190	0.0134	0.0297	0.0186	0.0125
14	0.0152	0.0159	0.0144	0.0100	0.0038	0.0120	0.0111	0.0096	0.0174
15	0.0260	0.0239	0.0238	0.0317	0.0334	0.0236	0.0297	0.0274	0.0171

Tabla 50: Distribución y magnitud de los armónicos para cada fase y situación simulada con índice de plena carga.

Orden	ARMONICOS C=0,64								
	FASE 1			FASE 2			FASE 3		
	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
1	0.8482	0.8434	0.8084	0.8403	0.8472	0.8443	0.8461	0.8476	0.8243
2	0.2494	0.2474	0.2296	0.2384	0.2365	0.2533	0.2360	0.2387	0.2396
3	0.2538	0.2509	0.2380	0.2546	0.2585	0.2542	0.2585	0.2572	0.2457
4	0.2651	0.2625	0.2561	0.2891	0.2899	0.2615	0.2908	0.2887	0.2603
5	0.1027	0.1038	0.1006	0.0940	0.0849	0.1026	0.0849	0.0886	0.1010
6	0.0284	0.0291	0.0263	0.0175	0.0146	0.0296	0.0134	0.0153	0.0275
7	0.0273	0.0278	0.0299	0.0387	0.0387	0.0272	0.0403	0.0384	0.0293
8	0.0743	0.0743	0.0737	0.0824	0.0832	0.0744	0.0825	0.0826	0.0751
9	0.0602	0.0596	0.0587	0.0540	0.0510	0.0586	0.0495	0.0532	0.0590
10	0.0378	0.0403	0.0396	0.0278	0.0302	0.0409	0.0268	0.0332	0.0385
11	0.0374	0.0369	0.0373	0.0473	0.0475	0.0365	0.0472	0.0489	0.0377
12	0.0358	0.0376	0.0355	0.0312	0.0318	0.0367	0.0295	0.0354	0.0357
13	0.0140	0.0111	0.0113	0.0251	0.0216	0.0123	0.0241	0.0174	0.0126
14	0.0088	0.0073	0.0072	0.0061	0.0045	0.0108	0.0040	0.0028	0.0072
15	0.0187	0.0182	0.0165	0.0233	0.0232	0.0149	0.0259	0.0265	0.0230

Tabla 51: Distribución y magnitud de los armónicos para cada fase y situación simulada con índice de carga de máximo rendimiento.

Orden	ARMONICOS C=0,50								
	FASE 1			FASE 2			FASE 3		
	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
1	0.6459	0.6417	0.6387	0.6388	0.6443	0.6643	0.6451	0.6425	0.6512
2	0.2062	0.2041	0.1951	0.1966	0.1957	0.2137	0.1966	0.1960	0.2043
3	0.2040	0.2015	0.1966	0.2024	0.2057	0.2098	0.2070	0.2037	0.2037
4	0.2229	0.2208	0.2203	0.2387	0.2392	0.2254	0.2407	0.2380	0.2238
5	0.0938	0.0940	0.0927	0.0883	0.0823	0.0948	0.0831	0.0845	0.0937
6	0.0223	0.0224	0.0213	0.0182	0.0157	0.0229	0.0162	0.0157	0.0217
7	0.0254	0.0257	0.0287	0.0390	0.0398	0.0252	0.0403	0.0394	0.0278
8	0.0606	0.0612	0.0624	0.0653	0.0662	0.0629	0.0653	0.0658	0.0632
9	0.0580	0.0572	0.0575	0.0515	0.0506	0.0577	0.0486	0.0515	0.0576
10	0.0324	0.0336	0.0349	0.0250	0.0290	0.0355	0.0239	0.0298	0.0341
11	0.0370	0.0372	0.0391	0.0431	0.0458	0.0373	0.0419	0.0465	0.0376
12	0.0241	0.0264	0.0265	0.0193	0.0230	0.0283	0.0169	0.0244	0.0271
13	0.0160	0.0139	0.0135	0.0218	0.0187	0.0149	0.0199	0.0152	0.0130
14	0.0060	0.0055	0.0053	0.0035	0.0024	0.0071	0.0024	0.0018	0.0045
15	0.0119	0.0112	0.0112	0.0218	0.0204	0.0183	0.0150	0.0160	0.0177

Tabla 52: Distribución y magnitud de los armónicos para cada fase y situación simulada con índice de media carga.

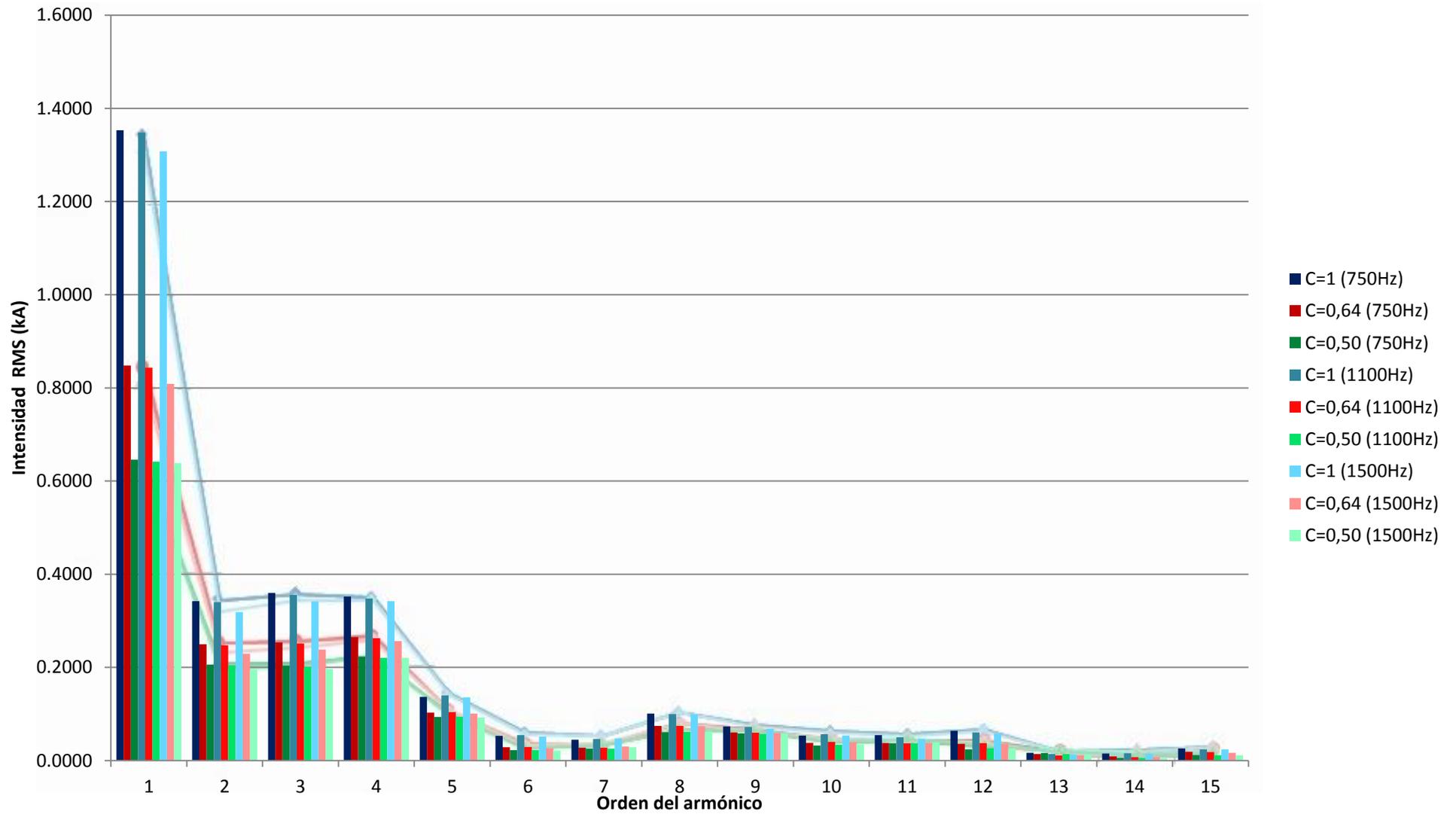


Figura 39: Transformada de Fourier realizada a la intensidad de corriente de la fase 1 (gráfico de barras) para las simulaciones sobre el circuito inversor.

Los armónicos de mayor magnitud en este caso son los de orden del segundo al cuarto, y en menor medida aunque también significativos, los de orden quinto y del octavo al duodécimo. Como se explicó en el apartado 2 y en el punto 6.3.3 de este trabajo, parece que al aumentar la frecuencia de activación de los IGBTs, la magnitud de los armónicos decrece ligeramente, por norma general, o mantienen su magnitud. A diferencia de lo ocurrido con las simulaciones sobre el circuito rectificador, no se observan otras diferencias significativas al variar la frecuencia de activación de los IGBTs además de las ya citadas.

Los armónicos segundo, tercero y cuarto tienen una magnitud bastante semejante. El armónico de tercer orden puede suscitar la aparición de sobretensiones en los devanados, lo cual se comprobará en las posteriores gráficas y tablas.

Sí que se observa de los datos expuestos en la figura 39 que la magnitud de los armónicos aminora ligeramente cuanto mayor sea la frecuencia (para 1500 Hz la magnitud es la menor de todas) como ya se ha mencionado. Este efecto se constata mayor para los armónicos de menor orden (2 y 3 sobre todo).

		CAIDAS DE TENSIÓN EN EL SECUNDARIO								
		750Hz			1100Hz			1500Hz		
I. de Carga		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3
C=1		0.29%	0.25%	0.20%	0.15%	0.23%	0.13%	0.15%	0.19%	0.13%
		0.25%			0.17%			0.16%		
C=0,64		-2.38%	-2.37%	-2.38%	-2.38%	-2.37%	-2.38%	-2.35%	-2.34%	-2.43%
		-2.37%			-2.37%			-2.37%		
C=0,50		-2.13%	-2.13%	-2.19%	-2.14%	-2.10%	-2.20%	-2.14%	-2.14%	-2.22%
		-2.15%			-2.15%			-2.16%		

Tabla 53: Caída de tensión para cada fase respecto a la variación de frecuencia de activación de los IGBTs.

		FASE 1 (Factor de Contribución)			AUMENTOS Y DISMINUCIONES DE MAGNITUD (*)		
		750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
Tercer armónico	C=1	26.59%	26.38%	26.11%		-1.17%	-5.09%
	C=0,64	29.93%	29.75%	29.43%		-1.13%	-6.25%
	C=0,50	31.58%	31.40%	30.78%		-1.24%	-3.65%
Quinto armónico	C=1	10.09%	10.37%	10.37%		2.31%	-0.71%
	C=0,64	12.11%	12.31%	12.45%		1.07%	-2.03%
	C=0,50	14.52%	14.65%	14.52%		0.27%	-1.10%
Séptimo armónico	C=1	3.29%	3.44%	3.62%		4.26%	6.22%
	C=0,64	3.22%	3.30%	3.70%		1.72%	9.49%
	C=0,50	3.94%	4.01%	4.49%		1.14%	12.72%

*Los aumentos y disminuciones se han practicados tomando como referencia los valores de magnitud de 750Hz para cada situación.

** El factor de contribución representa el % que la corriente formada por dicho armónico, tras realizar la transformada de Fourier, forma parte de la onda de corriente con todos los armónicos.

Tabla 54: Factor de contribución de los armónicos para las simulaciones sobre el circuito inversor.

En cuanto a la caída de tensión, se observa en la tabla 53 que conforme la frecuencia del inversor aumenta, las sobretensiones disminuyen, en parte a la menor contribución del tercer armónico dentro del espectro de frecuencia dado por la transformada de Fourier, lo cual puede verse en la tabla 54. En los casos de 750 Hz con índice de carga la unidad el tercer armónico tiene una mayor contribución, lo cual explicaría la mayor sobretensión respecto al resto de situaciones. De la misma forma parece ser que con la disminución del índice de

carga el séptimo armónico aumenta su contribución más que el tercero y el quinto, que disminuyen. Este efecto es amplificado cuanto mayor sea la frecuencia de activación de los IGTBs. Esto a su vez podría explicar que las caídas de tensión con índices de carga 0,64 y 0,50 no se diferencien tanto entre si cambiando la frecuencia, que como sucede con el índice de plena carga. Aumentar el índice de carga en cualquier caso parece provocar la disminución del factor de contribución de estos tres armónicos.

Igualmente se observa que las mayores caídas de tensión en este caso se corresponden con un índice de carga de máximo rendimiento como sucedía con las simulaciones en las que se variaba la capacidad de los condensadores. Sin embargo una diferencia notoria que se ha percatado de estas simulaciones respecto a las anteriores es que es el séptimo armónico el que aumenta su contribución conforme el índice de carga disminuye y la frecuencia aumenta. En las simulaciones sobre el circuito rectificador, era el quinto armónico el que aumentaba conforme el índice de carga y la capacidad de los condensadores “aumentaba” (Ver tabla 42).

En cuanto a las pérdidas se refiere, los resultados pueden observarse en la tabla 55.

	Pérdidas en el Trasnformador (W)			AUMENTOS Y DISMINUCIONES (*)		
	750Hz	1100Hz	1500Hz	750Hz	1100Hz	1500Hz
C=1	8982.5492	9296.4946	8790.7099		3.50%	-2.14%
C=0,64	5108.5103	5655.9444	5108.5103		10.72%	0.00%
C=0,50	4581.1781	4644.6357	4275.3963		1.39%	-6.67%

*Los aumentos y disminuciones se han practicado tomando como referencia los valores de magnitud de 750Hz para cada situación.

Tabla 55: Pérdidas de potencia activa en el transformador debidas al cambio de frecuencia de activación de los IGTBs en el inversor.

En cuanto a las pérdidas de potencia activa debido a las pérdidas en el hierro y al cobre, se observa que los mayores valores se dan para un índice de carga la unidad y una frecuencia de 1100Hz. Las pérdidas decrementan su valor conforme el índice de carga disminuye, pero se observa que los valores más altos son para una frecuencia de 1100 Hz, disminuyendo los valores para 750Hz y 1500 Hz. Los valores más bajos de pérdidas como cabría esperar suceden con una frecuencia de activación de 1500 Hz. Es reseñable que estos mayores incrementos de pérdidas se den para la situación de 1100Hz cuando en la tabla 54 no se observan cambios apreciables en la contribución de los diferentes armónicos, por lo que puede deberse a una ligera variación de todos los armónicos en conjunto.

Si realizamos una comparación con los resultados obtenidos durante las simulaciones en el rectificador, En este caso para las situaciones de 750Hz y 1100Hz las pérdidas son mucho mayores que las obtenidas al variar la capacidad de los condensadores como puede observarse en la tabla 44. A diferencia de lo obtenido en las simulaciones con el circuito rectificador, la variación de la frecuencia provoca cambios más severos y notables en las pérdidas de potencia activa que la variación de la capacidad de los condensadores.

Por último, al contrario de lo que sucedía con el rectificador, el quinto armónico ha disminuido su valor y no ha aumentado, y el séptimo ha hecho lo contrario, y esto parece haber influido en el valor de las pérdidas que en este caso han disminuido con el aumento de la frecuencia en vez de aumentar, como sucedía con el aumento de la capacidad de los condensadores, al disminuir igualmente el índice de carga (Ver tablas 42 y 44).

En cuanto al rizado de las ondas de corriente y tensión, en este caso no se han observado cambios en el rizado ni diferencias entre las ondas al variar la frecuencia de activación de los IGTBS. Solamente la disminución del valor eficaz conforme el índice de carga disminuye, pero nada más. Los resultados pueden ser observados en las figuras 40 y 41.

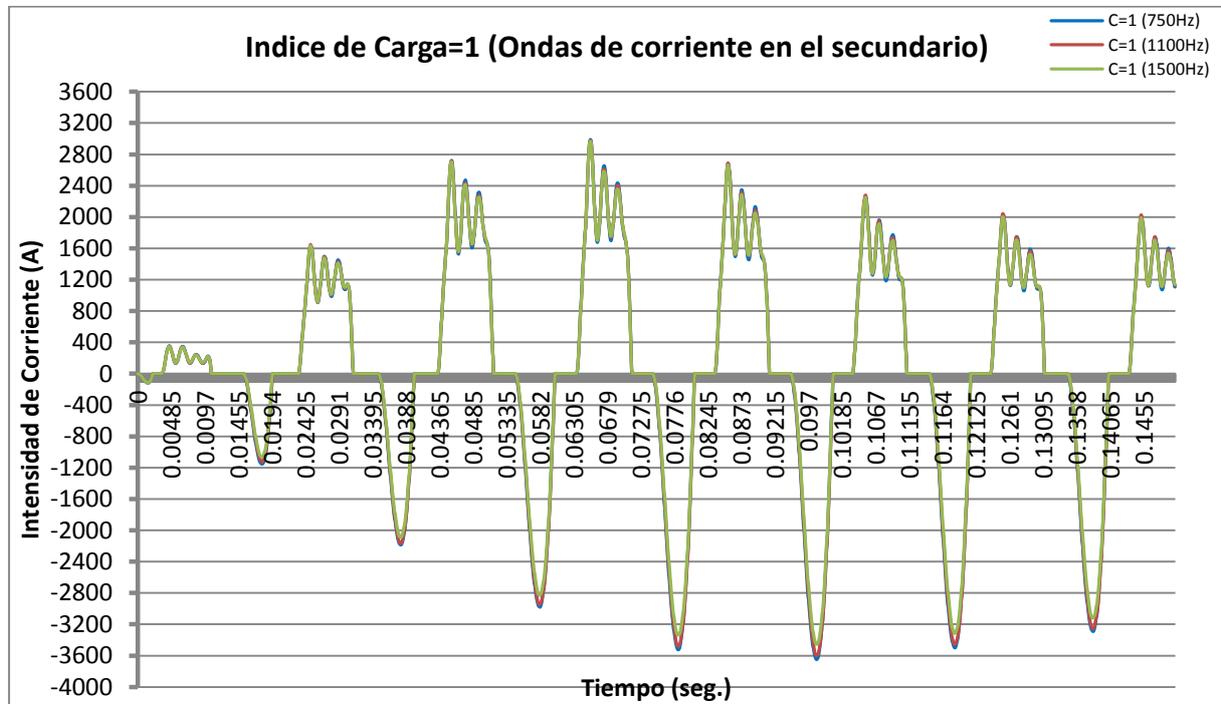


Figura 40: Ondas de corriente y rizado para el devanado secundario y fase 1.

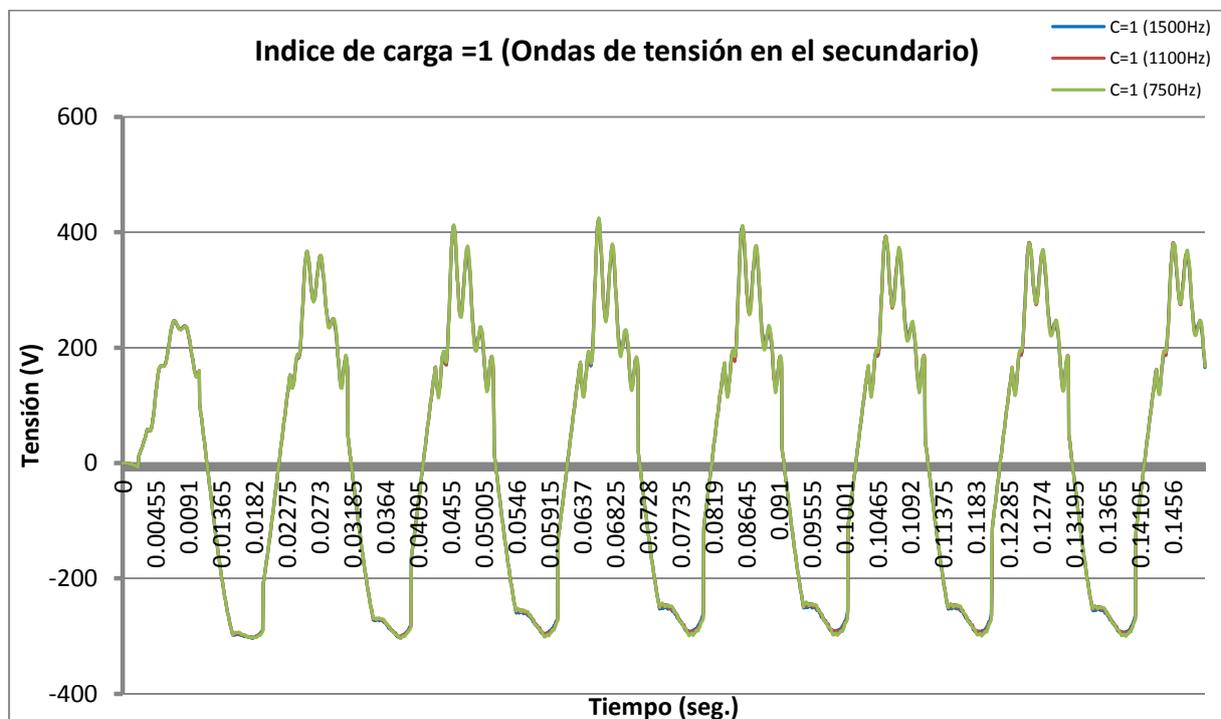


Figura 41: Ondas de tensión y rizado para el devanado secundario y fase 1.

En las figuras 40 y 41 solo se muestran los datos correspondientes a las simulaciones con índice de carga la unidad y variando la frecuencia. Las ondas son similares y las diferencias entre ellas inapreciables. Esta tendencia es igual para índice de carga de máximo rendimiento y media carga. Los resultados en cuanto a las ondas de tensión son parecidos a los obtenidos variando la capacidad de los condensadores del rectificador (mostrados en la figura 38), y no se notan diferencias al variar la frecuencia. Esta tendencia se repite en las demás fases.

Por último, se presentan en la tabla 56 los correspondientes valores eficaces a la tensión continua en el rectificador. Al igual que con el rizado de las ondas de corriente y tensión, no se observan diferencias entre los valores simulados, y el rizado de la onda es muy similar en todas ellas.

	750Hz	1100Hz	1500Hz
Tensión Rectificador (F-F) (V)			
C=1	247.3197	247.0768	247.2569
C=0,64	248.9784	248.9784	249.2454
C=0,50	252.9175	252.8342	252.5783
Tensión Rectificador (F-N) (V)			
C=1	503.8053	503.0700	503.5183
C=0,64	512.8269	512.8269	513.5623
C=0,50	524.6185	524.4428	523.5725

Tabla 56: Valores RMS de la tensión continua en el rectificador para las simulaciones variando la frecuencia de activación de los IGBTs.

En las gráficas citadas en estos últimos apartados, como ya se había citado se muestran resultados para el devanado secundario, pues en el primario las variaciones parecen no ser tan perceptibles.

6.3.5. Conclusiones obtenidas de PSCAD tras las simulaciones sobre el circuito rectificador/inversor

Al igual que como se hizo con las simulaciones con los armónicos y las cargas lineales e inductivas, se van a establecer una serie de puntos que suponen una ventaja y unos inconvenientes en cuanto a la utilización de PSCAD. Estos puntos aquí citados son una continuación y complemento de los enumerados en el apartado 6.2.4.

Aspectos positivos:

- ✓ A pesar de contar con un número finito de nodos para simular, ha sido posible realizar un circuito completo trifásico con rectificador e inversor, y aunque después presenta alguna limitación a la hora de tomar los datos precisamente por el citado máximo de nodos, se cree un aspecto positivo de la versión gratuita y de lo que es capaz de simular.
- ✓ Ha permitido realizar de forma óptima la transformada de Fourier hasta el armónico de corriente de orden 15, para cada una de las fases, pudiendo de esta forma establecer una comparación entre simulaciones sin la necesidad de realizar esta transformada con otros programas informáticos.

Aspectos negativos:

- ✓ La etapa de procesamiento de datos se ve como una tarea bastante compleja de realizar debido a las limitaciones existentes en cuanto a la exportación de datos a otros formatos como Excel. Esta exportación solamente ha sido posible hacerse mediante el procedimiento ya explicado de copiar los datos de las gráficas al portapapeles y pegarlos a su vez en un archivo de texto.
- ✓ Otro de los aspectos quizás algo negativo es que el incluir un amperímetro o un potenciómetro para realizar medidas consume un nodo, cosa que no ocurre al medir el voltaje. Esto hace que para realizar las simulaciones sobre el circuito rectificador/inversor presentado se deban de realizar sendas copias del archivo base para ir cambiando los amperímetros y potenciómetros de posición.

Gran parte de los aspectos positivos y negativos que se han presentado en estas simulaciones son también comunes a los del apartado 6.2.4, por lo que se recomienda su visualización para obtener los puntos completos.

7. CONCLUSIONES Y RESULTADOS GENERALES DEL TRABAJO

Tras la realización de todo el proceso de búsqueda bibliográfica, aprendizaje de la herramienta informática de PSCAD y las simulaciones con la herramienta se han podido obtener distintas conclusiones, tanto para la parte referente a los efectos de los armónicos sobre los transformadores de potencia, como para la parte referente a PSCAD.

7.1. Resultados

En cuanto a la parte de los efectos de los armónicos se ha centrado en la obtención de resultados para los armónicos de orden 3, 5 y 7, de los cuales se ha intentado observar tendencias al variar ciertos parámetros del circuito, como son las cargas, la capacidad de condensadores del filtro de paso bajo del rectificador y la frecuencia de los IGBTs del circuito inversor. Además se ha intentado ver cuál es su efecto individual sobre el transformador sin combinar con otros armónicos, con objeto de después ver si dichas tendencias se siguen en conjunción a otros armónicos.

- ➔ *Tercer armónico:* Provoca por norma general, como bien se sabe, sobretensiones en los devanados, a la vez que provoca una ligera disminución o mantenimiento de las pérdidas en potencia activa, a la vista de los resultados. Este efecto se acentúa cuanto mayor sea el índice de carga y si la carga no es meramente resistiva. Este armónico al ser homopolar de 150 Hz, provoca una disminución del valor pico de la onda de corriente, que puede que no presente rizado o ser muy ligero si este armónico es el dominante. Este armónico sobre un circuito rectificador-inversor disminuye conforme la capacidad de los condensadores del filtro de paso bajo aumentan y el índice de carga aumenta. En cambio, si lo que se varía es la frecuencia del inversor, las disminuciones son mayores cuanto mayor sea la frecuencia y el índice de carga se aproxime al de mayor rendimiento. En este sentido, parece que disminuye si el índice de carga disminuye también como también es previsible.
- ➔ *Quinto y séptimo armónico:* Provocan por norma general un aumento de las caídas de tensión. No tienen una relación directa con las pérdidas, las cuales en las simulaciones individuales se mantenían, y solamente crecían ligeramente si la carga es una combinación resistiva-inductiva respecto del caso sin armónicos. Con cargas resistivas las pérdidas eran iguales a las del caso sin armónicos. Además, provoca un mayor rizado en las ondas de corriente, caracterizado por un aumento del valor pico de la onda. En cuanto a circuitos rectificadores inversores, si se varía la capacidad de los condensadores del filtro de paso bajo, el quinto armónico aumenta su contribución al total, a medida que el índice de carga aumenta y la capacidad de los condensadores aumentan. El séptimo armónico también sigue esta tendencia. Sin embargo, a diferencia del quinto armónico, queda mucho más apantallado por la presencia de otros armónicos si el índice de carga disminuye, sufriendo una gran caída en cuanto a la contribución total en la tasa de distorsión armónica.

Si variamos la frecuencia del circuito inversor, los aumentos de la contribución de estos dos armónicos es contraria a la de las variaciones en el circuito rectificador, aumentando su contribución a medida que el índice de carga disminuye, a ir aumentando a la vez la frecuencia de activación de los IGBTs del inversor.

Para ver el resto de conclusiones mucho más específicas a cada simulación, se recomienda ver los subapartados 6.2.3, 6.3.4.2 y 6.3.4.4, en donde estas conclusiones se describen con más detalle en acompañamiento de gráficos y tablas para una mejor visualización.

7.2. Conclusiones

Realizando un análisis del trabajo en su completitud, respetando la planificación y los objetivos originales, como se puede comprobar en el apartado 1 de este documento. Se puede afirmar que han sido cubiertos en gran parte los objetivos perseguidos por este. Se ha podido realizar con efectividad simulaciones sobre circuitos alimentados por un transformador trifásico, y con distinto contenido armónico, tanto si estos se introducen de forma individual como de forma conjunta, lo cual es posible en ambos casos como se ha podido comprobar. Igualmente, se han podido comprobar fenómenos como las sobretensiones en los devanados y en que magnitud se producen, las pérdidas del transformador, el rizado de las ondas de corriente y tensión, entre otros y sus efectos sobre el transformador. Estos fenómenos suelen ser los precursores de los fallos en el aislamiento y calentamiento de los refrigerantes que el transformador utiliza, con la consecuente disminución de la vida útil de este.

Si bien se ha podido efectuar correctamente las medidas sobre el circuito simulado, observando que para las cargas resistivas-inductivas, sería interesante realizar un estudio mucho más detallado de porqué el método teórico no ha conseguido asemejarse a los datos obtenidos por PSCAD, al menos en el mismo grado que con cargas puramente resistivas.

Además de las simulaciones realizadas, se han realizado otras pruebas que comportaban la variación de algunos parámetros del transformador con objeto de poder medir las pérdidas del hierro y del cobre directamente de este, o al menos las corrientes que las provocaban con objeto de poderlas obtener en conjunción a las resistencias de cortocircuito y vacío obtenidas en este trabajo. Las pruebas fueron infructuosas. Se intentó medir estas pérdidas aplicando otros componentes diferentes de PSCAD, resultando que los multímetros incluidos en las librerías eran los más efectivos.

También se intentó de forma fallida por llegarse al máximo de nodos, medir la corriente y los armónicos sobre el neutro de la conexión en estrella en el transformador con objeto de poder observar una de las referencias teóricas dadas en el apartado 4.4.2. sobre el aumento de la corriente sobre dicho cable en transformadores trifásicos.

Estas simulaciones, con objeto de no hacer excesivamente extenso el trabajo, no se han incluido, también por no mostrar información de carácter relevante.

En cuanto a la idoneidad de la herramienta o programa de uso gratuito de PSCAD hay que recalcar ciertos aspectos valorativos que pueden recomendar o no su uso.

Su uso es recomendado si se tienen que realizar pruebas sobre circuitos monofásicos en los cuales es posible introducir un mayor número de elementos a simular, además de pequeños circuitos R-C, R-L-C o con electrónica de potencia sencilla. Por último, también permite la

combinación de estos anteriores para la realización de circuitos no muy complejos que además pueden incluir componentes propios creados por el usuario del programa, que dependiendo de qué tipo de componentes lo integren, pueden suponer un ligero ahorro de nodos, pero no en todas las situaciones. Por último, se ha visto que es posible realizar circuitos inversores/reductores trifásicos como el simulado, y variar la forma de cómo estos funcionan, pudiendo alterar elementos del rectificador e inversor, y así poder comprobar como varía su funcionamiento. Es posible también realizar circuitos que incluyan la parametrización de líneas aéreas y subterráneas, pero con la salvedad comentada de que no pueden ser excesivamente complejos por existir una limitación máxima de 15 nodos atendiendo a las leyes de las mayas de Kirchhoff, además del nodo de tierra. Tampoco se ha podido, por cómo está configurado el transformador, efectuar medidas directas sobre las pérdidas del hierro y del cobre, solamente pudiéndose obtener su cómputo global a través de un balance entre el devanado primario y el secundario. Estas pérdidas se pueden configurar dentro del transformador, pero después no se puede ver la influencia directa de cada armónico o su conjunto sobre estas pérdidas de forma individual. Solamente se ha podido suponer cual puede haber sido su tendencia de forma teórica, como sí se ha realizado en este trabajo.

No obstante, la versión gratuita imposibilita la exportación sencilla de datos a otros programas, ya sea Simulink, Matlab, Excel, etc. para realizar el tratamiento posterior de los datos obtenidos. La única forma que el autor de este trabajo ha encontrado de realizar la exportación a otros programas es mediante la copia al portapapeles de los datos de las gráficas para su posterior pegado en una nota de texto y así obtener un archivo de tipo csv que poder abrir con Excel, por ejemplo. Se desconoce si es posible aunque la versión sea gratuita realizar esta exportación de forma más sencilla. Después, estos archivos también pueden ser abiertos por otros programas de cálculo. Sin embargo, esto es bastante arduo y largo en el tiempo de realizar, suponiendo más de la mitad del tiempo el correspondiente a la exportación e importación de datos a otros programas, entre que se empiezan las simulaciones y se termina de procesar la información.

Otro de los aspectos determinantes tiene que ver también bastante con las propias limitaciones del ordenador que se emplee para la realización de las simulaciones, puesto que la rapidez con las que se pueden realizar depende tanto del tiempo fijado para la simulación, como de la memoria RAM disponible para realizarla. Equipos que tengan poca memoria y excesivos programas o aplicaciones ejecutándose en segundo plano y consumiendo memoria puede hacer que el proceso de simulación se extienda desde unos pocos segundos con la memoria libre, hasta varios minutos si la memoria está ocupada. Se recomienda apagar y encender los equipos en lugar de hibernarlos, suspenderlos o reiniciarlos con objeto de poder disponer del máximo de memoria libre, al cerrarse la mayoría de las aplicaciones en segundo plano durante estos procesos.

Igualmente se dispone de una librería muy grande de componentes que el propio programa incluye, además de poder incorporar otros a partir de otros medios. Sin embargo, en lo que se refiere a los transformadores de potencia se ha encontrado que a pesar de la gran variedad que parece existir, en realidad son casi todos semejantes o el mismo, y están en su mayor parte sin parametrizar, por lo que no se puede escoger uno directamente y simularlo, puesto que los resultados no serían fiables.

Al igual que con los efectos de los armónicos sobre los transformadores, se recomienda leer los apartados 6.2.4 y 6.3.5 en donde se explican cada uno de los aspectos favorables y desfavorables para el uso de la versión gratuita.

Como valoración final, recomiendo la versión gratuita de PSCAD para realizar circuitos de escasa o no excesiva complicación que incluyan componente armónico, puesto que se ha demostrado que el programa es capaz de realizar estas simulaciones de forma correcta y sin comportamientos anómalos. Es mejor si los circuitos son monofásicos a trifásicos, aunque estos se simulan igualmente, solo que en estos hay que tener precaución de no incluir un gran número de elementos para no llegar al máximo de nodos (15 más el de tierra) y componentes (5 definiciones). También tiene una excelente precisión y fiabilidad. Lo recomiendo también como herramienta de iniciación o aprendizaje del programa, con objeto de poder aprender cómo funciona y ver la idoneidad para el proyecto a realizar. No lo recomiendo para equipos antiguos y con escasa memoria o procesadores antiguos, puesto que las simulaciones pueden alargarse mucho en el tiempo, sobre todo si se tiene que realizar una gran cantidad. Tampoco lo recomiendo para la realización de circuitos complejos, puesto que no se pueden partir en módulos como en otros programas se permite, de manera que uniendo los módulos en un ordenador con una licencia de pago, estos funcionen. No se puede hacer, o al menos el autor de este trabajo no se ha percatado de esta funcionalidad. Circuitos como el rectificador/inversor con transformador, o con líneas áreas o subterráneas viene a ser la limitación de la versión gratuita, y tampoco lo recomiendo en demasía sin saber utilizar el programa pues fácilmente se llega al número máximo de nodos y es preciso realizar y eliminar ciertos componentes o instrumentos de medida para realizar la simulación, con lo que para hacerse con todos los datos que se había pensado, se deben realizar un mayor número de simulaciones, alternando los instrumentos de medida introducidos en distintas posiciones, o los componentes.

8. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

En este trabajo solamente se han seleccionado situaciones a estudio en donde se esperaba obtener resultados relevantes de cara a obtener datos en los que se pudiesen presentar tendencias que posteriormente se puedan también observar en la realidad. Es por ello que en los estudios no se han incluido casos en los que la carga en el secundario sea resistiva-capacitiva, puesto que las situaciones en las que un transformador ha de hacer frente a este tipo de cargas no son frecuentes. Con más frecuencia la carga se asemeja a situaciones en las que las cargas de consumo son resistivas e inductivas, por lo que los resultados anteriormente obtenidos podrían utilizarse en un futuro para la creación de modelos o tablas que de alguna forma puedan predecir el efecto que pueda tener este tipo de armónicos sobre un transformador real. Para ello, se tendría que realizar un estudio que contemplase más situaciones que las que se contemplan en este trabajo, en donde se ha decidido por simplificación y debido a que otro de los objetivos es el de testar el funcionamiento del programa PSCAD para la realización de futuros trabajos relacionados con el contenido armónico y sistemas eléctricos, realizar solamente pruebas con el transformador en plena carga, carga de máximo rendimiento y a media carga, puntos que son importantes en el funcionamiento de un transformador.

Un primer paso hacia este camino sería realizar las mismas simulaciones de este trabajo sobre un transformador real con objeto de comprobar la idoneidad definitiva de PSCAD con circuitos reales. O probar estas mismas simulaciones en otros programas dedicados a la simulación de circuitos eléctricos y electrónicos, con objeto de poder establecer una comparación. En parte, los componentes y valores de capacidad de los condensadores, resistencias, valores asignados para el circuito inversor/rectificador, etc. y demás valores dados a los componentes del trabajo se han escogido de acuerdo a piezas existentes en el mercado. Si pueden resultar escasos o poco comunes en algunas ocasiones, pero no se perseguía diseñar un circuito real en este trabajo, aunque también podría ser una posible línea de futuro.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arcila, J. D.. (Recuperado 2019). *Armónicos en Sistemas Eléctricos*. Ingeniería Especializada S.A.
- [2] Bollen, M.H.J. (2003). *What is Power Quality?*. Gothenburg (Suecia). Eselvier Inc.
- [3] Chapman, D.. (2011). *Application Note Harmonics: Causes and Effects*. European Copper Institute.
- [4] EATON Powerware (Desconocido). (Recuperado en 2019). *Harmonics in your electrical system . 1: EATON Corporation*.
- [5] Fornieles, F.. (Recuperado en 2019). *Armónicos: Efectos, Diagnósticos y Soluciones (Circuitor)*. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- [6] Hooman E. Mazin, Student Member, IEEE, Edwin E. Nino, Member, IEEE, Wilsun Xu, Fellow, IEEE, and Jing Yong, Member (2011). *A Study on the Harmonic Contributions of Residential Loads*. IEEE Standards Association.
- [7] IEEE. (2009). *IEEE-1159-2009 (IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality)*. IEEE Standards Association.
- [8] IEEE. (2014). *IEEE 519-2014 (IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control In Electronic Power Systems)*. IEEE Standards Association.
- [9] Jaekel, B., Ogunsola, A., Sandrolini, L.. (2009). *Recent development regarding IEC 61000-2-5, description and classification of electromagnetic environments*.
- [10] Jawad Ghorbani, M., Mokhtari, H..(2015). *Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems*. Morgantown (WV, USA). International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 5, No. 1. Páginas 166-174 .
- [11] Kiranmayi, R.. (2013). *Reduction of Harmonics in HVDC Transmission System using High Pulse Converter*. India. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering (IJRCCE) Vol. 1, No. 4. Páginas 1063-1067.
- [12] Mohammad A. S. Masoum y Ewald F. Fuchs. (2015). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition)*. Eselvier Inc. (Chapter 1, páginas 1-104).
- [13] Power Electronics (Desconocido). (Recuperado 2019). *Notas de Aplicación: Armónicos en Sectores Industriales*. Power Electronics.
- [14] Ras, E.. (1994). *Transformadores de potencia, de medida y de protección (7ª Edición)*. Barcelona. Boixareu Editores.

[15] Statista. (2016). *Number of mobile phone users worldwide from 2015 to 2020 (in billions)*. 2019, de Statista (The Statics Portal).

[16] Thet Mon Aye, Soe Win Naing. (2015). *Harmonics evaluation generated by electric arc furnace (EAF)*. Mandalay, Myanmar: International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Vol. 3, No. 5. Página 21.