

Análisis de la interacción armónica de cargas basadas en fuentes conmutadas en una red de baja
tensión

Duvan Gregorio Rivera Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Electricista

Director

Gabriel Alexis Malagón Carvajal

Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Eléctrica

Codirector

César Antonio Duarte Gualdrón

PhD. Electrical and Computer Engineering

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga, 2022

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios todo poderoso por darme el don de la vida, la inteligencia y la fortaleza para enfrentar los momentos adversos durante este proceso. A mis padres Elisa y Gregorio, por brindarme diariamente su apoyo incondicional, su amor y enseñarme el valor fundamental de la responsabilidad. A mis hermanas Yurley y Leidy, por ser uno de los pilares fundamentales en la construcción de mi vida profesional, por creer en mí y guiarme en los momentos más importantes. A mis compañeros y amigos, por brindarme su ayuda y compartir tantos momentos especiales. Mi más sincero y profundo agradecimiento a los directores del proyecto, los profesores Gabriel Malagón y César Duarte, por compartirme sus conocimientos y guiarme en el desarrollo de este trabajo de grado.

Duvan Gregorio Rivera Rodríguez

Resumen

Título: Análisis de la interacción armónica de cargas basadas en fuentes conmutadas en una red de baja tensión*

Autor: Duvan Gregorio Rivera Rodríguez**

Palabras clave: Armónico, Distorsión, Interacción armónica, Modelo, Frecuencia, Corriente, Fuentes conmutadas, SMPS, CFL, Acople.

Descripción: Los hogares colombianos poseen un gran número de cargas basadas en electrónica de potencia que tienen influencia en la red por sus altos niveles de distorsión de corriente; debido a esto, el presente trabajo de grado busca realizar un análisis de la distorsión armónica de corriente obtenidas cuando son conectadas múltiples cargas en el mismo punto de acople común (PCC), es decir cuando son agregadas. Este trabajo se centra en particular en las cargas no lineales basadas en fuentes conmutadas, SMPS (Por sus siglas en inglés *Switch-Mode Power Supply*), puesto que la mayoría de los electrodomésticos que se encuentran en los hogares corresponden a este tipo.

Debido a la contingencia de salud mundial provocada por la pandemia COVID-19, este trabajo de grado se ve orientado al trabajo de simulación por medio del software MatLab/Simulink, en donde se parte modelando las cargas en el dominio del tiempo, utilizando específicamente un modelo circuital equivalente. Debido a la incertidumbre en el número y características de los parámetros que conforman el modelo, estos son asignados aleatoriamente mediante un método probabilístico. Así mismo este trabajo se centra en la incidencia que puede tener la distorsión de tensión y la impedancia equivalente del sistema sobre los resultados de distorsión armónica de corriente y a su vez, estos dos últimos sobre la distorsión de tensión.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T). Director Gabriel Alexis Malagón Carvajal. Codirector César Antonio Duarte Gualdrón.

Abstract

Title: Analysis of the harmonic interaction of loads based on switched sources in a low-voltage network*

Authors: Duvan Gregorio Rivera Rodríguez**

Key words: Harmonic, Distortion, Harmonic Interaction, Model, Frequency, Current, Switch Mode Power Supply, SMPS, CFL, Coupling.

Description: Colombian homes have a large number of loads based on power electronics that have an influence on the network due to their high levels of current distortion, due to this the present degree project seeks to carry out an analysis of the harmonic current distortion obtained when multiple loads are connected at the same point of common coupling (PCC), that is, when they are added. This degree work focuses in particular on non-linear loads based on Switch Mode Power Supply (SMPS) since most of the electrical appliances found in homes correspond to this type.

Due to the global health contingency caused by the COVID-19 pandemic, this work is oriented to simulation work using the MatLab/Simulink software, where it is started by modeling the loads in the time domain, by specifically using an equivalent circuit model. Due to the uncertainty in the number and characteristics of the parameters that make up the model, these are randomly assigned using a probabilistic method. Likewise, this work focuses on the incidence that the voltage distortion and the equivalent impedance of the system can have on the results of current harmonic distortion and, in turn, the latter two on the voltage distortion.

* Bachelor Project

** Faculty of Physicomechanics Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering (E3T). Director Gabriel Alexis Malagón Carvajal. Codirector César Antonio Duarte Gualdrón.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| Resumen..... | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| Introducción | 11 |
| 1. Generalidades del proyecto..... | 14 |
| 1.1 Objetivo general..... | 14 |
| 1.2 Objetivos específicos | 14 |
| 1.3 Alcances..... | 17 |
| 2. Modelo para fuentes conmutadas en un punto de acople común..... | 17 |
| 2.1 Modelos circuitales de fuentes conmutadas..... | 18 |
| 2.1.1 Modelo circuital equivalente..... | 19 |
| 2.2. Modelado del sistema de distribución en Baja Tensión..... | 25 |
| 2.3. Formas de onda de la fuente de alimentación..... | 27 |
| 2.4. Índice de distorsión armónica total (THD)..... | 29 |
| 2.5. Factor de diversidad armónica (DF) | 30 |
| 3. Escenarios de simulación..... | 31 |
| 3.1 Simulación de cargas individuales..... | 31 |
| 3.2 Agregación de cargas..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Función de optimización para la agregación de cargas. | 34 |
| 4. Resultados de simulación de la interacción armónica | 36 |
| 4.1 Corrientes individuales | 37 |
| 4.1.1 SMPS no-PFC | 37 |
| 4.1.2 SMPS p-PFC | 39 |
| 4.1.3 CFL | 41 |
| 4.1.4 Análisis de resultados para cargas individuales..... | 43 |
| 4.2 Agregación de cargas sin impedancia de red..... | 45 |
| 4.2.1 Agregación SMPS no-PFC | 45 |
| 4.2.2 Agregación SMPS p-PFC | 48 |
| 4.2.3 Agregación CFL..... | 51 |
| 4.2.4 Agregación Mixta | 54 |
| 4.2.5 Análisis de resultados | 57 |
| 4.3 Agregación de cargas con impedancia de red..... | 62 |
| 4.3.1 Impedancia de red mínima (Z_{sys} mínima) | 63 |
| 4.3.2 Impedancia de red nominal (Z_{sys} nominal)..... | 64 |
| 4.3.3 Impedancia de red máxima (Z_{sys} máxima)..... | 66 |
| 4.3.4 Análisis de resultados | 68 |
| 4.4 Agregación de cargas con frecuencia fundamental 60 Hz..... | 73 |
| 4.4.1. Agregación de cargas fuente de alimentación flat-top..... | 74 |
| 4.4.2 Agregación de cargas fuente de alimentación señal E3T | 75 |
| 4.4.3 Análisis de resultados | 77 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 5. Conclusiones | 81 |
| 6. Anexos | 85 |
| Referencias Bibliográficas | 106 |
| Apéndices..... | 108 |

LISTA DE TABLAS

| | Pag. |
|---|------|
| Tabla 1. Distribuciones de probabilidad para los parámetros del modelo circuital equivalente .. | 23 |
| Tabla 2. Valores impedancia de la red en Baja Tensión..... | 27 |
| Tabla 3. Contenido armónico ondas de alimentación sinusoidal, flat-top y pointed top..... | 28 |
| Tabla 4. Contenido armónico respecto al fundamental, distorsión armónica total para cargas individuales | 44 |
| Tabla 5. Factores de diversidad armónica ante fuente de alimentación sinusoidal | 58 |
| Tabla 6. Factores de diversidad armónica ante fuente de alimentación flat-top..... | 59 |
| Tabla 7. Factores de diversidad armónica ante fuente de alimentación pointed-top | 60 |
| Tabla 8. Índices de distorsión armónica para la agregación de cargas | 61 |
| Tabla 9. Factores de diversidad armónica ante diferentes impedancia de red..... | 70 |
| Tabla 10. Comparativa de factores de diversidad con o sin impedancia de red | 71 |
| Tabla 11. Contenido armónico respecto al fundamental, distorsión armónica total para la agregación de cargas | 72 |
| Tabla 12. Factores de diversidad armónica para cargas agregadas a 60 Hz | 79 |
| Tabla 13. Factores de diversidad armónica para cargas agregadas a 60 Hz (Onda E3T)..... | 80 |
| Tabla 14. Contenido armónico respecto al fundamental, distorsión armónica total para la agregación de cargas a 60 Hz..... | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pag. |
|--|------|
| Figura 1. Modelo circuital equivalente carga luminaria CFL..... | 20 |
| Figura 2. Modelo circuital de la red en Baja Tensión..... | 26 |
| Figura 3. Formas de onda utilizadas en redes de distribución en Baja Tensión | 29 |
| Figura 4. Diagrama de flujo para obtener la tensión y corriente para la agregación de cargas | 33 |
| Figura 5. Diagrama de flujo para determinar la gráfica del factor de diversidad armónica | 34 |
| Figura 6. Corriente individual y contenido armónico carga SMPS no-PFC ante fuente Sinusoidal | 38 |
| Figura 7. Corriente individual y contenido armónico carga SMPS no-PFC ante fuente flat-top . | 38 |
| Figura 8. Corriente individual y contenido armónico carga SMPS no-PFC ante fuente pointed-to | 39 |
| Figura 9. Corriente individual y contenido armónico carga SMPS p-PFC ante fuente sinusoidal | 40 |
| Figura 10. Corriente individual y contenido armónico carga SMPS p-PFC ante fuente flat-top . | 40 |
| Figura 11. Corriente individual y contenido armónico carga SMPS p-PFC ante fuente pointed top | 41 |
| Figura 12. Corriente individual y contenido armónico carga CFL ante fuente sinusoidal | 42 |
| Figura 13. Corriente individual y contenido armónico carga CFL ante fuente flat-top | 42 |
| Figura 14. Corriente individual y contenido armónico carga CFL ante fuente pointed-top..... | 43 |
| Figura 15. Impacto de la agregación de cargas tipo SMPS no-PFC en un punto de acople común | 46 |
| Figura 16. Factores de diversidad para agregación de cargas tipo SMPS no-PFC..... | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 17. Impacto de la agregación de cargas tipo SMPS p-PFC en un punto de acople común | 49 |
| Figura 18. Factores de diversidad para agregación de cargas tipo SMPS p-PFC | 50 |
| Figura 19. Impacto de la agregación de cargas tipo CFL en un punto de acople común | 52 |
| Figura 20. Factores de diversidad para agregación de cargas tipo CFL | 53 |
| Figura 21. Impacto de la agregación de cargas mixtas en un punto de acople común | 55 |
| Figura 22. Factores de diversidad para agregación de cargas mixtas | 56 |
| Figura 23. Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red mínima) | 63 |
| Figura 24. Factor de diversidad de cargas agregadas con impedancia de red mínima | 64 |
| Figura 25. Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red nominal) | 65 |
| Figura 26. Factor de diversidad de cargas agregadas basdas en fuentes conmutadas (impedancia de red nominal) | 66 |
| Figura 27. Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red máxima) | 67 |
| Figura 28. Factor de diversidad de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red máxima) | 68 |
| Figura 29. Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz | 74 |
| Figura 30. Factor de diversidad de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz | 75 |
| Figura 31. Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz (Onda típica E3T) | 76 |
| Figura 32. Factor de diversidad de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz (Onda típica E3T) | 77 |

Introducción

Las redes de distribución en Baja Tensión se han visto expuestas al aumento considerable de cargas basadas en electrónica de potencia y la pregunta es cual puede llegar a ser el posible impacto de estas cargas sobre la misma. Entre los diferentes usos que tienen estas cargas se encuentran los aparatos comúnmente utilizados en los hogares Colombianos, tales como los electrodomésticos, luminarias ahorradoras y aparatos de entretenimiento, específicamente las cargas basadas en fuentes conmutadas. Dichas se conocen como *Switch Mode Power Supply* (SMPS) y *Compact Flourocent Lamp* (CFL), las cuales poseen menor consumo energético, sin embargo, al ser agregadas sobre un punto de acople común pueden ocasionar un aumento en la distorsión armónica de las señales de corriente y tensión en la red de distribución. Un ejemplo de esto es la conexión simultanea de muchos usuarios cuyos aparatos eléctricos en sus hogares constan de una fuente conmutada para su funcionamiento, como lo son televisores, computadores personales, videograbadoras, equipos de audio, hornos a microondas, y lámparas fluorescentes compactas (CFL), lo que puede provocar un incremento en la distorsión armónica de la corriente. Estimar el impacto que produce la conexión de diversas cargas en un punto de acople común no implica sólo un reto a la hora de realizar el modelado, sino también un reto en los tiempos de cómputo, en el análisis del efecto de diversidad (variación del ángulo de fase de los armónicos de corriente), el cual a menudo se estudia sin tener en cuenta la impedancia del sistema, y el efecto de atenuación (posible disminución de la distorsión debido a la interacción de la distorsión de tensión y corriente y la impedancia del sistema) (Suarez et al., 2005), en este trabajo se analiza la incorporación de la misma considerando múltiples y diferentes cargas conectadas en paralelo con iguales y distintos niveles de potencia.

Las cargas basadas en fuentes conmutadas presentan un comportamiento no lineal debido a los componentes electrónicos por los cuales están compuestas, este trabajo de grado se basa en el análisis del comportamiento de manera individual y en conjunto de este tipo de cargas (SMPS y CFL) mediante un modelo en el dominio del tiempo basado en circuitos (circuit-based) también llamado modelo circuital equivalente permitiendo la obtención de los datos de tensión y corriente de múltiples cargas. En la literatura (Malagón, 2019; Malagón et al., 2021) definen el modelo de las cargas switch mode power supply a partir de un puente rectificador monofásico, en el que se incluye el modelo completo o solo de los algunos parámetros de un modelo circuital equivalente, para el presente trabajo de grado no se incluye el filtro EMI y el parámetro de inductancia de entrada, para el caso de luminarias tipo CFL la resistencia equivalente es modelada como un parámetro dependiente de la tensión *dc-link* como lo muestra (Malagón, 2019), en donde esta resistencia equivalente presenta dos estados de operación en función a la tensión en el *dc-link* como se presenta en (Collin A. J., 2013). Para la selección de las cargas que son tenidas en cuenta en la simulación los parámetros para cada una se determinan a través de una función de densidad probabilidad propuesta por (Collin et al., 2014).

Este trabajo de grado presenta dos escenarios de carga para el análisis de la interacción armónica de cargas basadas en fuentes conmutadas en una red de baja tensión, el primero se realiza según lo propuesto en (Collin et al., 2014), donde se definen los parámetros del modelo circuital para las cargas trabajadas a 230 V 50 Hz, analizando el comportamiento de las señales de corriente individuales ante diferentes señales de alimentación sinusoidal, *flat-top* y *pointed-top* normalmente usadas en los sistemas distribución de Baja Tensión para modelar la tensión en condiciones controladas, en el sector residencial-comercial y en el sector industrial,

respectivamente, como también, su contenido armónico y el factor de diversidad armónica. En el segundo escenario, se repite el procedimiento descrito anteriormente, con la diferencia de que para este se emplean las expresiones usadas en (Malagón et al., 2021) determinando el modelo circuital equivalente para la cargas trabajadas a 60 Hz y utilizando la impedancia de red normalizada para México mediante la norma IEC 60725, este ultimo escenario busca plantear la base para próximas investigaciones en materia de agregación de cargas conectas al mismo punto de acople común para un frecuencia de 60 Hz y un modelado de red en el sector residencial Colombiano. Debido a la contingencia de salud mundial provocada por la pandemia COVID-19 y la imposibilidad de hacer medidas en laboratorio, todos estos escenarios fueron implementados mediante algoritmos en el software MatLab realizando simulaciones para la estimación del factor de diversidad, tensión y corriente en el dominio del tiempo para cada uno de los casos propuestos en este trabajo de grado, bajo las normas IEC mencionadas anteriormente, estos parámetros son presentados la sección 2.2.

1. Generalidades del proyecto

1.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de la distorsión armónica de un conjunto de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas conectadas al mismo punto de acople común frente a cambios de la impedancia equivalente del sistema y la distorsión de tensión.

Este objetivo se propone con el fin de realizar un análisis de la distorsión armónica de distintas cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas conectadas al mismo punto de acople común, por ejemplo, se utilizan cargas tipo *Switch Mode Supply Source* (SMPS no-PFC y SMPS p-PFC) y *Compact Fluorecent Lamp* (CFL) realizando simulaciones con tres valores de impedancia normalmente usadas en la redes de Baja Tensión. Para ello se proponen escenarios de carga variando la distorsión de tensión en la alimentación, evaluando la distorsión armónica y estimando el factor de diversidad armónica para cada escenario de carga propuesto.

1.2 Objetivos específicos

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Proponer diferentes modelos equivalentes circuitales para las cargas y la impedancia equivalente del sistema a partir de la selección aleatoria de sus parámetros

Para dar cumplimiento a este objetivo se propone un algoritmo, el cual se implementa en el software MatLab, que simula las cargas y proporciona las medidas de corriente y tensión del modelo en el dominio del tiempo, a partir de la selección de los parámetros de inductancia, capacitancia, resistencia de entrada y potencia del modelo equivalente mediante distribuciones de probabilidad proporcionadas por la literatura.

Para el modelado de la impedancia de red se escogen los parámetros propuestos por la norma IEC 60725, la cual sintetiza valores de impedancia normalizados para países europeos, norteamericanos, asiáticos y latinoamericanos. El modelo equivalente consiste en una impedancia de red en serie compuesta por una resistencia y una inductancia equivalente que representa todas los elementos conectados en la red de Baja Tensión para el sector residencial.

- Establecer escenarios de análisis evaluando el comportamiento de la distorsión armónica de corriente ante diferentes variaciones de la onda de tensión de alimentación, por ejemplo, *flat-top* o achatada, *pointed-top* o puntiaguda, sinusoidal y/o formas de onda típicas del edificio E3T.

Para dar cumplimiento a este objetivo, se realiza el modelado de las señales de tensión de las fuentes de alimentación sinusoidal, *flat-top*, *pointed-top* y ondas típicas del edificio E3T, se modelan diferentes escenarios de carga en donde se utilizan estas señales de alimentación, como por ejemplo, agregación de cargas SMPS no-PFC, SMPS p-PFC, CFL y una combinación entre ellas llamada agregación mixta.

- Estimar la distorsión armónica individual y total en las señales de corriente obtenidas para cada carga, así como la señal de corriente del conjunto de cargas.

Para dar cumplimiento a este objetivo se propone un algoritmo iterativo, el cual se implementa en el software MatLab, que realiza una agregación de las cargas en forma bottom – up, es decir, hallando las corrientes individuales de cada carga y luego estimar la señal de corriente del conjunto de cargas. En este algoritmo se modela la interacción de las diferentes cargas con la impedancia equivalente del sistema, primero se analiza el comportamiento del modelo con la señal de alimentación en el punto de acople común y se obtiene la corriente para la primera iteración ($k=1$), por medio de las leyes de Kirchhoff se calcula la caída de tensión en la impedancia del sistema en una red de Baja Tensión, este procedimiento se repite para cada iteración hasta hallar a un error mínimo.

Para el experimento se parte de la tensión en el punto de acople común igual a la tensión de alimentación, el algoritmo realiza iteraciones en las cuales va variando la señal de tensión de alimentación, se obtiene la corriente producida por el conjunto de cargas agregadas hasta encontrar la mínima diferencia cuadrática entre la corriente en la iteración ($k-1$) y la corriente (k), una vez obtenida la corriente óptima se halla el factor de diversidad armónica mediante la fórmula mostrada en (J.A. Suárez, 2005), con sus respectiva gráfica para cada uno de los escenarios planteados.

1.3 Alcances

Este trabajo se centra en el estudio de la distorsión armónica de cargas agregadas basadas en SMPS (*Switch-Mode Power Supply*) conectadas a un punto de acople común en una red de baja tensión. En la literatura se presenta variedad de tipos de cargas basadas en SMPS monofásicos, las de sin control para la corrección del factor de potencia (*no_Power Factor Correction no_PFC*) y las que sí lo tienen (*Power Correction Factor PFC*), cómo lo es el tipo pasivo (*passive_Factor Correction p_PFC*) las cuales son estudiados en este trabajo de grado. Asimismo, este trabajo utiliza la estrategia de abajo hacia arriba (*bottom-up - BU*), es decir, se tiene en cuenta en forma independiente cada una de las cargas del circuito ramal y se estima la señal de corriente en el punto de acople común utilizando cómo fuente de alimentación señales *flat-top*, *pointed-top*, sinusoidal y/o formas de onda del edificio E3T. Cabe aclarar, que debido a la incertidumbre en el número y características que conforman el modelo se emplea un método probabilístico para así establecer los parámetros del modelo circuital equivalente de cada una de las cargas. A causa de la contingencia de salud se decidió sustituir las medidas de laboratorio por señales de tensión obtenidas mediante simulaciones y modelos en el dominio del tiempo.

2. Modelo para fuentes conmutadas en un punto de acople común

El presente capítulo refiere artículos e investigaciones que exponen conceptos utilizados para el análisis de cargas no lineales, en especial las cargas basadas en fuentes conmutadas que al ser agregadas en un punto de acople común (PCC) pueden generar un impacto armónico en las

redes de distribución. Conceptos como: modelos en el dominio del tiempo de cargas del tipo *Switch Mode Power Supply* (SMPS) y *Compact Fluorecent Lamp* (CFL), señales de tensión normalizadas y usadas en las redes de distribución de Baja Tensión, modelos circuitales del sistema de Baja Tensión, factor de diversidad armónica y, distorsión armónica de corriente son considerados en este capítulo.

A partir de los conceptos básicos, la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo se basa en cuatro etapas:

1. Realizar el modelado de las cargas mediante el modelo circuital equivalente para las cargas SMPS no-PFC, SMPS p-PFC y CFL.
2. Modelar la impedancia del sistema de distribución de Baja Tensión, a través de un circuito con impedancia equivalente.
3. Modelar las formas de onda sinusoidal, *pointed-top*, *flat-top* y forma de onda típica del edificio E3T para la tensión de alimentación en el sistema de distribución seleccionado.
4. Implementar una estrategia de simulación para diferentes escenarios de carga, fuentes de alimentación e impedancias de red mediante el software MatLab/SimuLink.

2.1 Modelos circuitales de fuentes conmutadas

Las investigaciones sobre el impacto armónico en la red de distribución debido a pequeñas cargas domiciliarias, como por ejemplo, televisores, computadores personales, videograbadoras, equipos de audio hornos a microondas y lámparas fluorescentes comenzaron en forma a finales de

los años 90. Estudios preliminares han propuesto diferentes modelos para determinar el comportamiento armónico de cargas basadas en fuentes conmutadas partiendo de un modelo alternativo para representar cargas no lineales del sistema de potencia mediante una matriz de admitancia de “frecuencia cruzada” (Fauri, 1997). Diferentes autores han propuesto modelos en el dominio del tiempo y la frecuencia para el dimensionamiento de las cargas SMPS y bombillas CFL. Por ejemplo, (Thunberg et al., 1999) proponen un modelo de fuente de corriente constante con enfoque de Norton para modelar redes de distribución del lado de la carga, (Balci et al., 2008) evalúan las sensibilidades de los modelos mencionados anteriormente para el sistema, que cubre algunas de las cargas de producción armónica, bajo los diversos casos de forma de onda de las tensiones de alimentación.

2.1.1 Modelo circuital equivalente

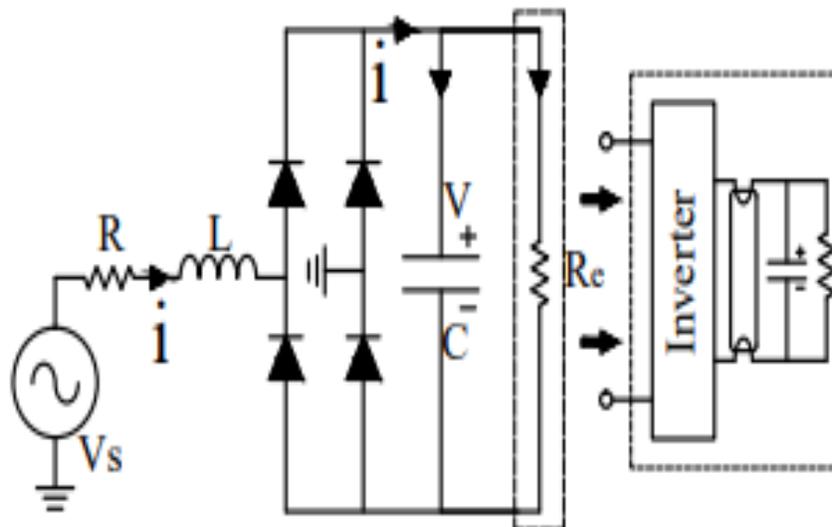
La mayoría de los aparatos electrónicos usados en el sector residencial se pueden representar a través de un modelo eléctrico equivalente. Normalmente los hogares colombianos poseen electrodomésticos de bajo consumo, como por ejemplo, televisores, DVD's, equipos de sonido, computadores de escritorio, portátiles y aparatos de cocción de alimentos, entre otros.

Los modelos de carga son importantes para determinar el estado de un sistema ante cambios en las condiciones de operación, no obstante, diversos estudios (Collin, 2014) han demostrado que las cargas electrónicas de potencia requieren un voltaje de alimentación DC estrechamente regulado para poder funcionar, que se obtiene rectificando el voltaje de la red a corriente continua y luego controlando el voltaje DC a través de una capacitancia a los circuitos

electrónicos suministrados. El método convencional de representar la conversión de corriente alterna a corriente a continua es a través de un puente rectificador no controlado, sin embargo, no proporciona la calidad requerida por las cargas de la electrónica de potencia, es por esto, que al modelo se le incluyen circuitos y componentes de control adicionales para proporcionar un voltaje de corriente continua controlado. Por lo cual, la topología del modelo circuital que se ha utilizado se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Modelo circuital equivalente para una carga luminaria CFL



Nota. Tomado de Métodos de modelado y simulación para la evaluación de la distorsión de cargas basadas en fuentes conmutadas considerando los fenómenos de diversidad y atenuación-amplificación (p.60), por G. A. Malagón, 2019, UIS.

Generalmente, las cargas SMPS no-PFC, p-PFC, y CFL se representan mediante el modelo circuital equivalente mostrado en la Figura 1. Se aprecia que este modelo está compuesto por los

siguientes parámetros: un puente rectificador de onda completa, una resistencia R de entrada, una inductancia L o filtro de entrada (que representan la suma total de las impedancias en serie del circuito rectificador), una capacitancia C del *dc-link* y una resistencia equivalente R_e . Esta última resistencia modela en la parte derecha de la Figura 1 los elementos aguas abajo del *dc-link*, por ejemplo, para el caso de las luminarias tipo CFL, el inversor, el tubo de la luminaria y capacitancias (Malagón, 2019).

A partir del modelo circuital equivalente mostrado en la Figura 1, (Malagón et al., 2015) presentan un modelo de espacio de estados continuo mediante el análisis circuital para dos estados (carga y descarga) presentes en los puentes rectificadores de media onda. El análisis realizado es el siguiente:

Estado de carga:

En el estado de carga, los diodos $D1$ y $D2$ conducen en el semiperiodo positivo de la tensión de alimentación V_s ; por el contrario $D3$ y $D4$ permanecen inactivos. Los diodos $D3$ y $D4$ conducen durante el semiperiodo negativo; por el contrario $D1$ y $D2$ no conducen. Cada par de diodo inicia su funcionamiento cuando la tensión en bornes del capacitor V es menor que la tensión rectificadora de la fuente, y la conducción se detiene cuando la corriente de entrada alcanza su valor cero. De acuerdo con (Malagón et al., 2015) y las leyes de Kirchhoff este comportamiento se puede modelar mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_s(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + v(t) \quad (1)$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_e} \quad (2)$$

Estado de descarga:

En este estado, los diodos no conducen y la corriente de entrada es igual a cero. Asimismo, V_{st} corresponde al valor inicial de la tensión del capacitor en el dc-link una vez finalizado el estado de carga y $v(t)$ corresponde a la tensión en el *dc-link*, la cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$v(t) = V_{st} e^{\left(-\frac{t}{R_e C}\right)} \quad (3)$$

Re – escribiendo (1) y (2):

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) - \frac{1}{L} v(t) + \frac{1}{L} V_s(t) \quad (4)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t) - \frac{1}{R_{ew} C} v(t) \quad (5)$$

De (4) y (5) se obtiene el modelo de espacio de estados continuo

$$\begin{bmatrix} \frac{di(t)}{dt} \\ \frac{dv(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_s(t) \quad (6)$$

Luego de las desagregaciones mostradas, se presenta la ecuación (7) que describe el modelo discreto de espacio de estados, el cual corresponde a la solución del modelo considerando un periodo de muestreo de la simulación Δt :

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha} \begin{bmatrix} \beta & -\frac{\Delta t}{L} \\ \frac{\Delta t}{C} & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t - \Delta t) \\ v(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2L} (1 + a) \\ c \end{bmatrix} [V_s(t - \Delta t) + V_s(t)] \quad (7)$$

Donde:

$$a = \frac{\Delta t}{2C R_{eq}} \quad b = \frac{\Delta t R}{2L} \quad c = \frac{\Delta t^2}{4CL} \quad d = \frac{\Delta t^2 R}{4CL R_{eq}}$$

$$\alpha = 1 + a + b + c + d \quad \beta = 1 + a - b - c - d \quad \gamma = 1 - a + b - c - d$$

Los parámetros del modelo circuital equivalente son definidos en (Collin S. Z., 2014) mediante distribuciones de probabilidad normales y uniformes. En la Tabla 1, se observan las distribuciones de probabilidad para cargas SMPS no-PFC con una potencia normalizada de 50 W, cargas SMPS p-PFC con potencia nominal de 250 W y cargas CFL con potencia de 11 W.

Tabla 1

Distribuciones de probabilidad para los parámetros del modelo circuital equivalente

| Carga | Parámetro | Distribución | Valor (pu) |
|-------------|-------------------|--------------|--|
| SMPS no-PFC | C | Normal | $\mu = 0,088 \quad \sigma = 0,006$ |
| | R | Uniforme | [0,0015, 0,0019] |
| | L | Uniforme | $[9,45 \times 10^{-9}, 2,84 \times 10^{-8}]$ |
| | P _{dc} | Normal | $\mu = 0,5 \quad \sigma = 0,16$ |
| SMPS p-PFC | C | Normal | $\mu = 0,088 \quad \sigma = 0,006$ |
| | R | Uniforme | [0,0077, 0,0094] |
| | L | Normal | $\mu = 1,2 \times 10^{-4} \quad \sigma = 6,1 \times 10^{-5}$ |
| | P _{dc} | Normal | $\mu = 0,5 \quad \sigma = 0,16$ |
| CFL | C | Normal | $\mu = 0,012 \quad \sigma = 8,5 \times 10^{-4}$ |
| | R | Uniforme | [0,9, 1,1] |
| | L | Constante | $1,25 \times 10^{-7}$ |
| | P _{tube} | Uniforme | [0,87, 1,02] |

Nota. Adaptado de Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks, por S. Z. Djokic y A. J. Collin, 2014, 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power.

Resistencia equivalente R_e

De acuerdo con diferentes investigaciones (Cresswell, 2009; Collin, 2014) la resistencia equivalente R_e observada en el modelo circuital mostrado en la Figura 1, puede variar dependiendo de la carga en estudio. Por ejemplo, para cargas SMPS y para una condición dada el puente rectificador de onda completa suministra tensión constante y corriente constante. La ecuación (8) muestra el valor de la resistencia para cargas SMPS no-PFC y SMPS p-PFC:

$$R_e = \frac{V_{dc}^2}{P_{dc}} \quad (8)$$

Donde:

V_{dc} es el voltaje de enlace DC instantáneo en Voltios, P_{dc} es la demanda de potencia requerida por la carga en Watts y R_e es la resistencia equivalente del modelo en Ohms.

Similarmente, la resistencia equivalente R_e para el modelo de lámparas CFL, consta de dos estados, estos estados pueden ser representados mediante funciones polinómicas y lineales representando los dos estados de carga y descarga del modelo circuital equivalente. En las ecuaciones (9) y, (10) se observan las funciones para la resistencia equivalente de luminarias CFL:

$$R_{e-carga} = 0,01928V_{dc}^2 + 11,69V_{dc} + 1110 \quad (9)$$

$$R_{e-descarga} = 24,5 V_{dc} + 94,29 \quad (10)$$

2.2. Modelado del sistema de distribución en Baja Tensión

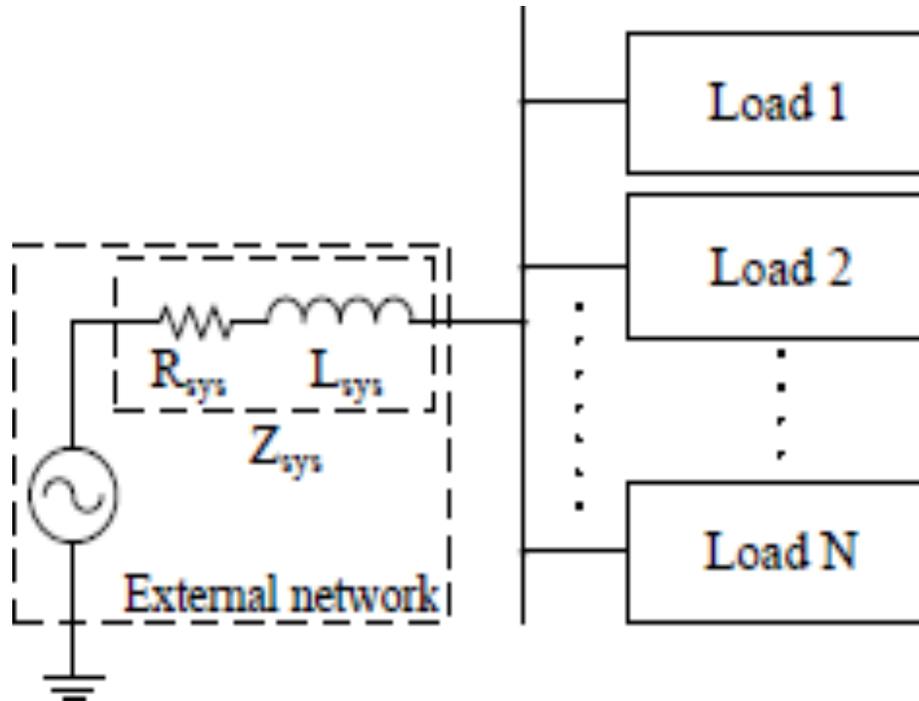
La penetración cada vez mayor de las fuentes conmutadas conectadas en un punto de acople común (PCC) puede generar problemas de calidad de energía y estabilidad de voltaje, lo cual ha motivado diversos estudios para aumentar la confiabilidad y la seguridad del sistema de distribución en Baja Tensión, lo cual requiere diseñar e implementar modelos para planificar y mantener las redes existentes.

Actualmente el sistema de distribución está compuesto de cables aéreos y/o subterráneos, apoyos, transformadores de distribución, y sistemas auxiliares que en conjunto conforman la infraestructura del sistema de energía eléctrica. De hecho, estas instalaciones poseen varios tipos de equipos, múltiples niveles de voltaje. Con el fin de simplificar el análisis de gestión o planificación de equipos de red de distribución, el diagrama de conexión eléctrica de una línea es la forma más utilizada (Lixian Wu et al., 2018), para el modelado de redes en Baja Tensión.

La Figura 2 muestra el modelado del sistema de Baja Tensión considerado en el presente trabajo de grado, el cual se basa en el diagrama de conexión eléctrica de una línea con impedancia de red, Z_{sys} . Los parámetros representativos de este modelo son la resistencia, R_{sys} , y la inductancia de red, L_{sys} . El conjunto de los parámetros muestran la conexión de las cargas individuales a la red de Baja Tensión.

Figura 2

Modelo circuital de la red en Baja Tensión



Nota. Tomado de Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks, por S. Z. Djokic y A. J. Collin, 2014, 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).

Las Tabla 2 parametriza los valores de la impedancia de red bajo la norma IEC 60725, dichos valores dependen de la región donde se realiza el estudio y el tipo de carga, para el cumplimiento del alcance de este trabajo de grado se usan los parámetros normalizados para Reino Unido (230 V 50 Hz) y México (120 V 60 Hz).

Tabla 2*Valores impedancia de la red en Baja Tensión**(a) Valores de impedancia de red para Reino Unido (230V 50Hz)*

| Valor | Impedancia del sistema (Ω) | R_{sys} (Ω) | L_{sys} (mH) |
|-------|-------------------------------------|------------------------|----------------|
| Min | 0,12 + j0,11 | 0,12 | 0,35 |
| Nom | 0,25 + j0,23 | 0,25 | 0,73 |
| Max | 0,46 + j0,45 | 0,46 | 1,43 |

(b) Valores de impedancia de red para México (120V 60Hz)

| Valor | Impedancia del sistema (Ω) | R_{sys} (Ω) | L_{sys} (mH) |
|-------|-------------------------------------|------------------------|----------------|
| Min | - | - | - |
| Nom | 0,10 + j0.07 | 0,1 | 0,18 |
| Max | - | - | - |

Nota. Adaptado de Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks, por S. Z. Djokic y A. J. Collin, 2014, 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power.

2.3. Formas de onda de la fuente de alimentación

Las empresas comercializadoras de energía eléctrica suplen a sus clientes con tensiones de diferentes características, por ejemplo, en la mayoría de países europeos la frecuencia fundamental es 50 Hz y la magnitud nominal de tensión es 230 V, en cambio, países latinoamericanos como México, Colombia, entre otros tienen normalizada su tensión a frecuencia fundamental 60 Hz y

120 V. En la Tabla 3, se observa el contenido armónico para las formas de onda encontradas normalmente en las redes de distribución tanto en países Europeos (230V 50Hz) y Latinoamericanos (120 V 60Hz).

Las redes de Baja Tensión poseen ondas típicas normalmente usadas por los comercializadores de energía eléctrica, la cuales alimentan a una o varias cargas. En el presente proyecto de grado se usan las formas de onda sinusoidal pura, *flat-top* o achata, *pointed-top* o puntiaguda y formas de onda normalmente encontradas en el edificio E3T.

Tabla 3

Contenido armónico ondas de alimentación sinusoidal, flat-top y pointed-top.

| Armónicos de Tensión | Frecuencia red 50Hz | | | Frecuencia red 60Hz | | | |
|----------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|-------|
| | Sinusoidal | <i>Flat-top</i> | <i>Pointed-top</i> | Sinusoidal | <i>Flat-top</i> | <i>Pointed-top</i> | E3T |
| Magnitud (V) | | | | | | | |
| 1 | 230 | 223,5 | 230 | 120 | 116,6 | 120 | 130 |
| 3 | - | 5,3 | 7 | - | 2,7 | 3,7 | 0,4 |
| 5 | - | 3,7 | 7 | - | 1,9 | 3,7 | 2,8 |
| 7 | - | 2 | 0,11 | - | 1 | 0,06 | 1,3 |
| Ángulo (°) | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | - | 0 | 180 | - | 0 | 180 | 154,7 |
| 5 | - | 180 | 0 | - | 180 | 0 | 162,7 |
| 7 | - | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 62,3 |
| THD _v (%) | 0 | 3,1 | 4,3 | 0 | 3,1 | 4,3 | 2,4 |

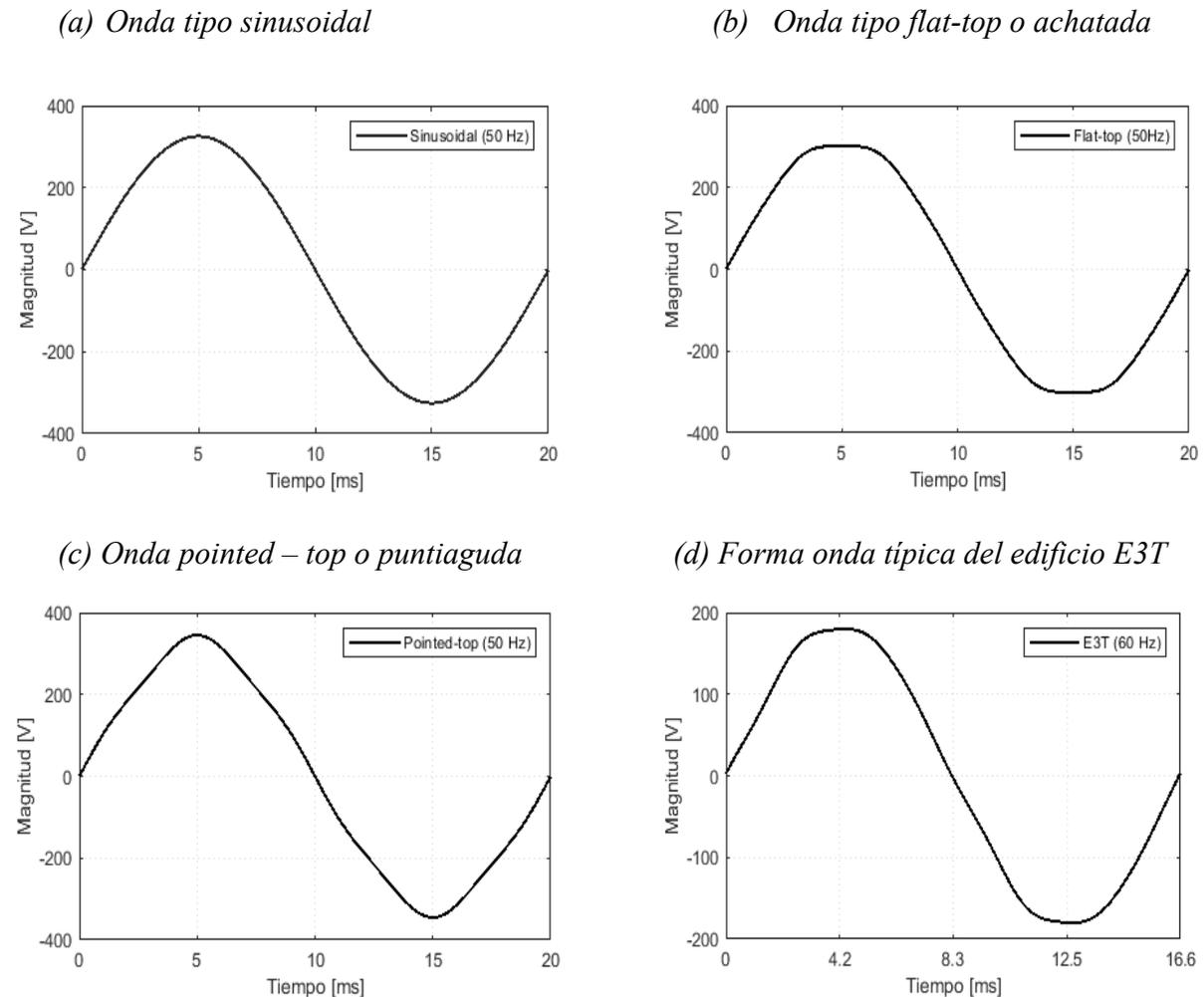
Nota. Adaptado de Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED), por A. M. Blanco et al., 2013, IEEE Grenoble Conference.

Asimismo, en la Figura 3 se observa gráficamente las formas de onda para tres tipos de señales, señal sinusoidal usada por variedad de autores para realizar análisis de la distorsión armónica a través de algoritmos de simulaciones, señal tipo *flat-top* o achatada que es causado por

el uso masivo de rectificadores monofásicos y señal *pointed-top* usada para las redes industriales y generado por el uso masivo de rectificadores de seis pulsos (Blanco et al., 2013).

Figura 3

Formas de onda utilizadas en redes de distribución en Baja Tensión



2.4. Índice de distorsión armónica total (THD)

Cómo una estrategia para cuantificar los niveles de distorsión producida por la respuesta en corriente de las cargas individuales usadas en el sector residencial se usa el índice de distorsión

armónica total (En inglés, *Total Harmonic Distortion*) la cual se sintetiza en la ecuación (11), este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor rms de la componente fundamental, este índice puede tomar valores cercanos a cero, como también, valores por encima del cien por ciento, como sucede en la cargas basadas en fuentes conmutadas y que fueron objeto de investigación para este trabajo de grado.

$$\%THDi = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} I_N^2}}{I_1} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

N = orden armónico

I₁ = Valor eficaz de la onda fundamental de corriente

I_N = Valor eficaz de la corriente en el armónico N

2.5. Factor de diversidad armónica (DF)

Las dispersiones en el ángulo de fase de las corrientes armónicas de cargas individuales provocan una disminución de las mismas en la red. Este efecto, conocido como diversidad, se debe principalmente a la diferencia entre las fases producidas por los armónicos de corriente de cada carga y la impedancia de red (Mansoor et al., 1995).

La ecuación (12), muestra el índice del factor de diversidad armónica para cualquier armónico N y c número de cargas agregadas, dicho índice se define como el valor absoluto de la relación entre la suma total de los fasores del armónico N para “C” cargas agregadas y la suma total de la magnitud del fasor del amónico N para “C” cargas agregadas. Este valor varía entre 0 y

1. Un bajo valor de este índice implicará una cancelación importante para el armónico bajo análisis y un valor cercano a la unidad implicará una menor cancelación.

$$DF_N = \left| \frac{\sum_c^c I_{N,c}}{\sum_c^c |I_{N,c}|} \right| \quad (12)$$

Donde:

N = Número del armónico en estudio

$I_{N,c}$ = Fasor de corriente para el armónico inyectado (N) correspondiente a la carga c

C = Número total de cargas agregadas

3. Escenarios de simulación

El presente capítulo describe los algoritmos y el proceso de obtención de los resultados para el cumplimiento de los objetivos planteados en la sección 1.2.

3.1 Simulación de cargas individuales

Cómo se mostró en la sección 2.1 la mayoría de las cargas usadas en el sector residencial están basadas en electrónica de potencia, generando así altos niveles de distorsión que son inyectados al sistema. Estas cargas se dividen en tres tipos: *Switch Mode Power Supply* no-PFC, p-PFC y *Compact Fluorecent Lamp*.

Para este trabajo de grado se han seleccionado 200 cargas de tipo SMPS no-PFC, p-PFC y *Compact Flourecent Lamp*. Se seleccionan sus parámetros de resistencia R de entrada, inductancia L , capacitancia C del *dc-link* y una resistencia equivalente R_e para cuatro escenarios de carga: agregación de cargas SMPS no-PFC, agregación de cargas SMPS p-PFC, agregación de cargas CFL y agregación de cargas mixtas. Estos parámetros se definen de manera aleatoria mediante las distribuciones de probabilidad presentadas en la sección 2.1.1. (los parámetros determinados para las cargas se encuentran en el Anexo 1).

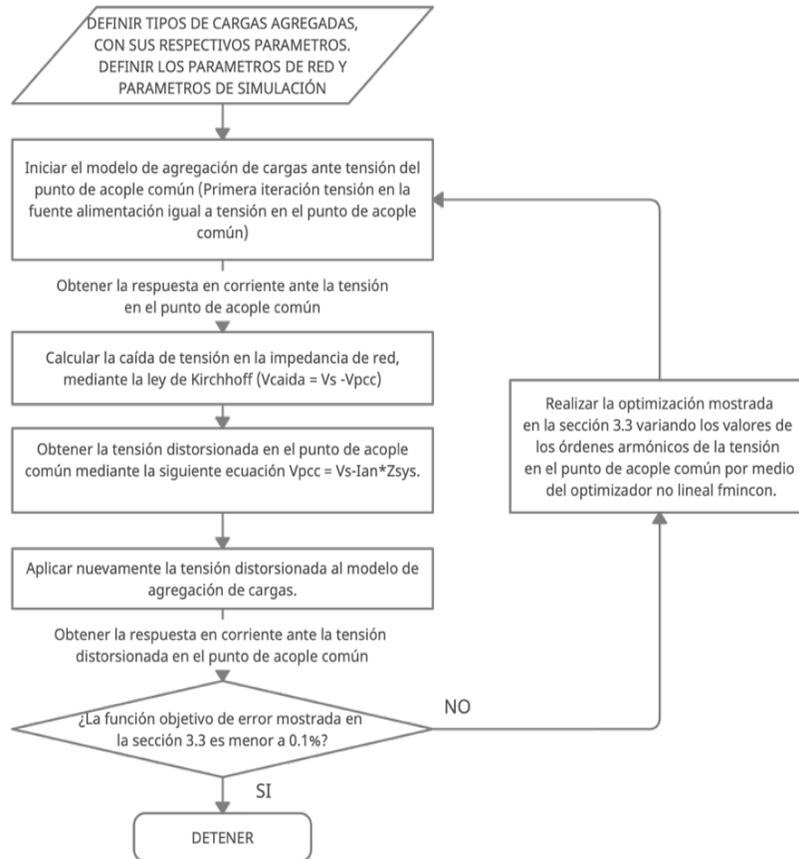
Haciendo uso del modelo probabilístico en el dominio del tiempo de las cargas SMPS y CFL implementado en MatLab/Simulink por (Malagón et al., 2019), se realizó un algoritmo donde se ponen a prueba cada uno de los tres tipos de cargas, descritas anteriormente, ante las formas de onda sinusoidal pura, *flat-top* y *pointed-top* usadas en estudios, sectores residenciales y sectores industriales respectivamente, encontrando así la forma de onda de corriente, su contenido armónico y su distorsión armónica total.

3.2 Agregación de cargas

Por otra parte, debido a las múltiples cargas basadas en fuentes conmutadas encontradas en la red de Baja Tensión, fue necesario la implementación de un algoritmo en el software MatLab/Simulink el cual proporciona las señales de corriente producidas por las cargas mostradas en el Anexo 1 y la señal de tensión en el punto de acople común. Dicho algoritmo se describe en la Figura 4.

Figura 4

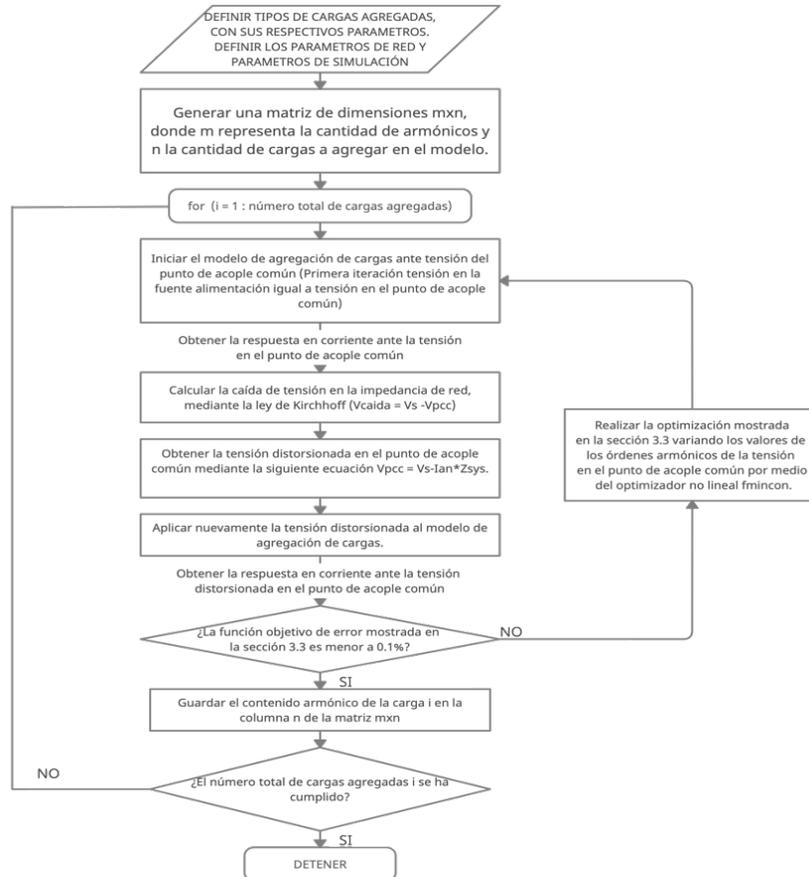
Diagrama de flujo para obtener la tensión y corriente para la agregación de cargas



Como una estrategia para el análisis del impacto de la distorsión armónica en las redes de distribución en Baja Tensión, se propone realizar una comparación del factor de diversidad armónica en distintos escenarios de carga, como por ejemplo, la agregación de cargas con iguales características sin impedancia equivalente de red, agregación de cargas con impedancia equivalente de red y un análisis del factor de diversidad armónica para las cargas a una frecuencia de 60 Hz. La Figura 5 muestra el algoritmo implementado en el software MatLab/Simulink para obtener las gráficas del factor de diversidad para los escenarios de carga analizados en el presente trabajo de grado.

Figura 5

Diagrama de flujo para determinar la gráfica del factor de diversidad armónica



3.3 Función de optimización para la agregación de cargas.

Cómo un método para determinar la tensión en el punto de acople común en los escenarios de carga con impedancia de red equivalente mostrada en la sección 2.2, se propone la formulación de un problema de optimización, el cual compara la corriente total para la iteración k (i_k) con la corriente total en la iteración $k-1$ (i_{k-1}), a través de la función del Error Medio Cuadrático (*Mean Sqear Error – MSE*) en (14). Este error se asume en función de las magnitudes de tensión y ángulos de fase de tensión para cada orden armónico trabajado, cabe resaltar que los límites

escogidos para la magnitud no superan los valores propuestos por la norma EN 50160 2010.

Entonces, el vector de variables de decisión X en (13) se define como:

$$X = [magV_{pcc1}, angV_{pcc1}, magV_{pcc3}, angV_{pcc3}, \dots, magV_{pccN}, angV_{pccN}]^T \quad (13)$$

Donde:

$magV_{pccN}$: magnitud de la tensión correspondiente al armónico N

$angV_{pccN}$: ángulo de fase de la tensión correspondiente al armónico N

La función objetivo de error E^2 para n muestras en el dominio del tiempo se define como:

$$E^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (i_k(V_{pcc}, X)_t - i_{(k-1)}(V_{pcc})_t)^2 \quad (14)$$

Donde:

n = número total de muestras de la señal de corriente

V_{pcc} = tensión en el punto de acople común (PCC)

$i_k(V_{pcc}, X)_t$ = respuesta en corriente ante tensión distorsionada en el punto de acople común para la muestra t y la iteración k

$i_{(k-1)}(V_{pcc})_t$ = respuesta en corriente ante tensión distorsionada en el punto de acople común para la muestra t y la iteración k-1

Para resolver el problema de optimización en (15), se implementa el optimizador no lineal `fmincon` proporcionado por la toolbox del software MatLab/Simulink:

$$X^* = \operatorname{argmin} E^2(X)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}
 -10\% V_{S_1} &< \operatorname{mag}V_{pcc_1} < 10\% V_{S_1} \\
 \operatorname{ang}V_1^{\min} &< \operatorname{ang}V_{pcc_1} < \operatorname{ang}V_1^{\max} \\
 -10\% V_{S_3} &< \operatorname{mag}V_{pcc_3} < 10\% V_{S_3} \\
 \operatorname{ang}V_3^{\min} &< \operatorname{ang}V_{pcc_3} < \operatorname{ang}V_3^{\max} \\
 -10\% V_{S_5} &< \operatorname{mag}V_{pcc_5} < 10\% V_{S_5} \\
 \operatorname{ang}V_5^{\min} &< \operatorname{ang}V_{pcc_5} < \operatorname{ang}V_5^{\max} \\
 &\vdots \\
 -10\% V_{S_N} &< \operatorname{mag}V_{pcc_N} < 10\% V_{S_N} \\
 \operatorname{ang}V_N^{\min} &< \operatorname{ang}V_{pcc_N} < \operatorname{ang}V_N^{\max}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Cabe mencionar que, en los casos donde la magnitud del armónico N, V_{S_N} , sea igual a 0 el limite superior se escoge como $10\% V_{S_1}$, es decir, 10% con respecto la tensión nominal que para los casos con frecuencia fundamental 50 Hz es 230 V y para la frecuencia fundamental 60Hz es 120 V.

4. Resultados de simulación de la interacción armónica

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para dos escenarios de análisis, el primer escenario con parámetros de red 230V 50Hz y el segundo, con parámetros de red 120V 60Hz, usando el modelo circuital equivalente para cargas tipo *Switch Mode Power Source* (SMPS)

no-PFC, SMPS p-PFC) y *Compact Flourecent Lamp* (CFL), asimismo, incluyendo el modelado de la red de Baja Tensión en un sistema de distribución, como se describe en las secciones 2.1.1 y 2.2, respectivamente.

Para cada escenario de análisis se presentan las gráficas de tensión de alimentación del sistema, corriente de carga, diagrama de barras para cada armónico de corriente y gráficas del factor de diversidad armónica. Para el primer escenario de carga, se trabaja con los datos propuestos por (Collin, 2014) y así se realiza el análisis del comportamiento de las mismas, y el segundo, se utilizan las expresiones matemáticas propuestas en (Malagón et al., 2021) para el cálculo de los modelos circuitales equivalentes.

4.1 Corrientes individuales

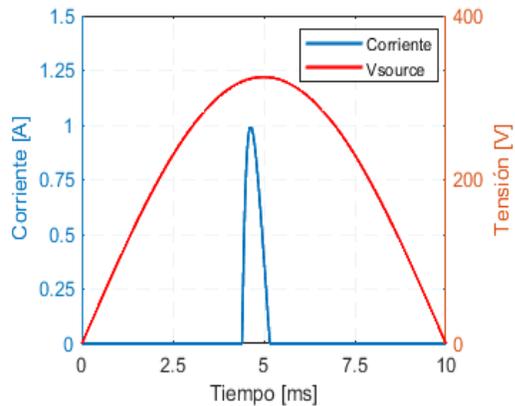
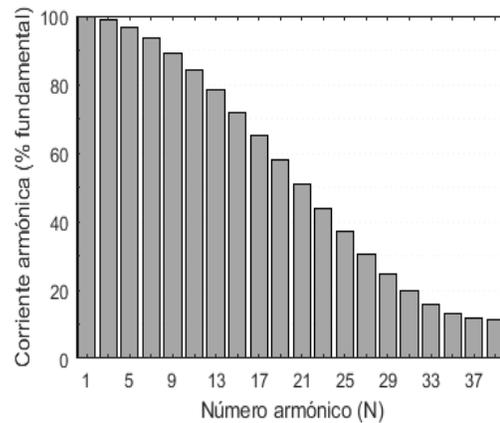
En esta sección se presenta el análisis y las gráficas para el escenario de carga individuales, incluyendo el contenido armónico de corriente para cada caso de estudio.

4.1.1 SMPS no-PFC

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el escenario de carga SMPS utilizando tres tipos de formas de onda en la alimentación: sinusoidal, *flat-top* y *pointed-top* y con parámetros previamente escogidos a través de las distribuciones de probabilidad mostradas en la Tabla 1, cada gráfica muestra la respuesta de corriente correspondiente (con sus componentes armónicas) para cada fuente de alimentación:

Figura 6

Corriente individual y contenido armónico carga SMPS no-PFC ante fuente Sinusoidal

(a) *Corriente individual SMPS no-PFC*(b) *Contenido armónico***Figura 7**

Corriente individual y contenido armónico carga SMPS no-PFC ante fuente flat-top

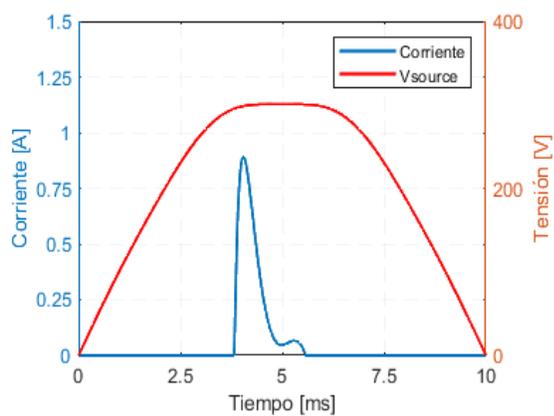
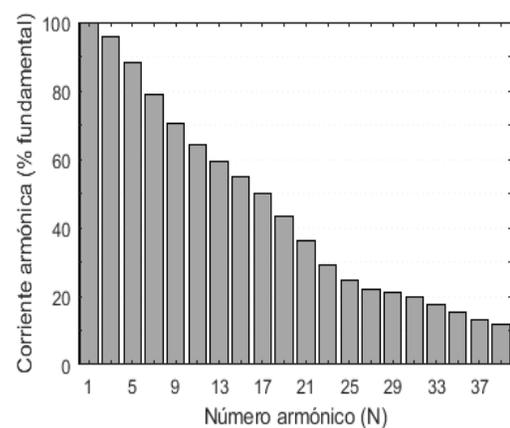
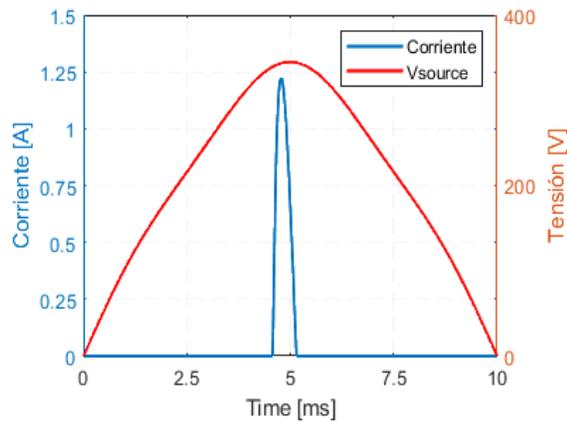
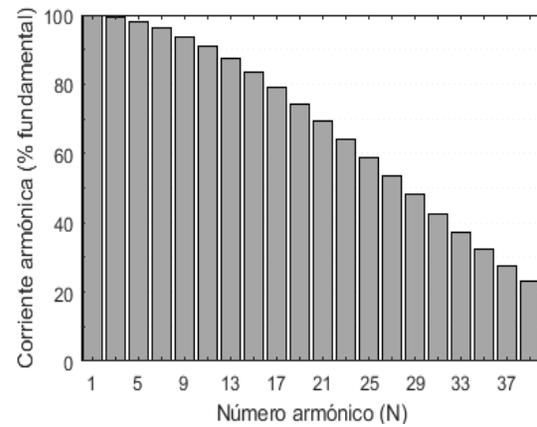
(a) *Corriente individual SMPS no-PFC*(b) *Contenido armónico*

Figura 8

Corriente individual y contenido armónico carga SMPS no-PFC ante fuente pointed-top

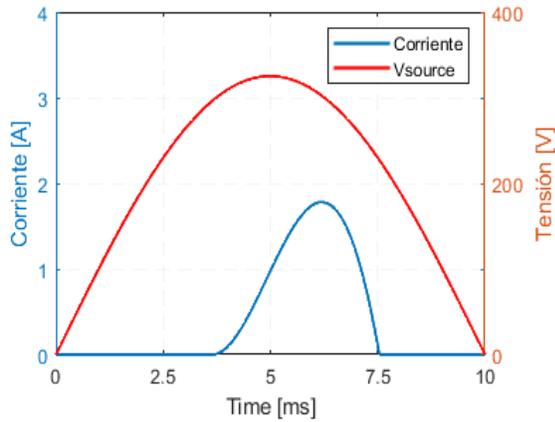
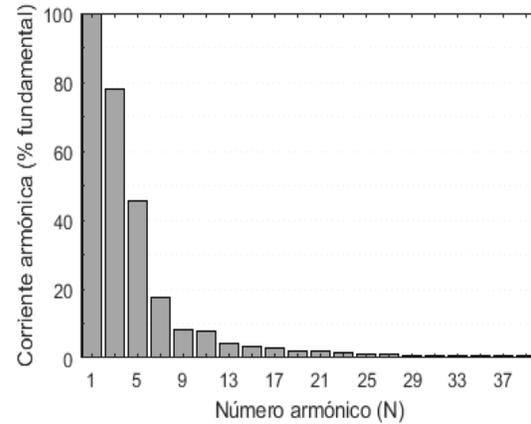
(a) *Corriente individual SMPS no-PFC*(b) *Contenido armónico*

4.1.2 SMPS *p*-PFC

De igual forma, se presentan los resultados para el escenario de carga SMPS passive-PFC tomando como tensión de alimentación las formas de onda mostradas en el numeral anterior, se puede observar gráficamente las formas de onda de la corriente de entrada, tensión de entrada, Vsource y el contenido armónico de la corriente. Los parámetros de la carga se seleccionaron mediante la distribución de probabilidad mostrada en la Tabla 1.

Figura 9

Corriente individual y contenido armónico carga SMPS p-PFC ante fuente sinusoidal

(a) *Corriente individual SMPS p-PFC*(b) *Contenido armónico***Figura 10**

Corriente individual y contenido armónico carga SMPS p-PFC ante fuente flat-top

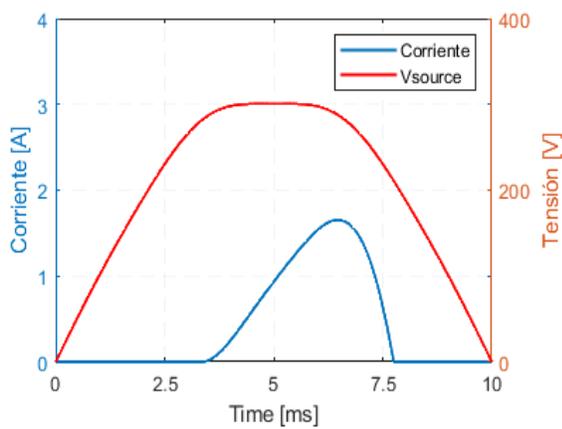
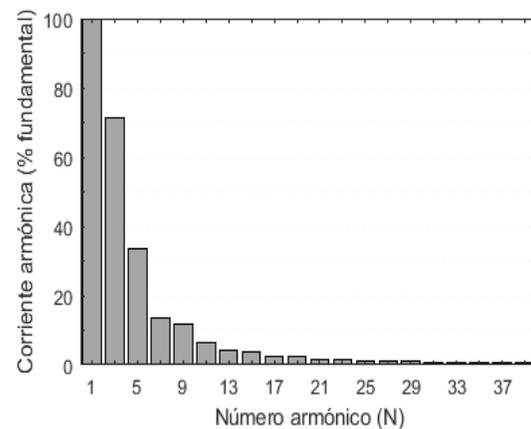
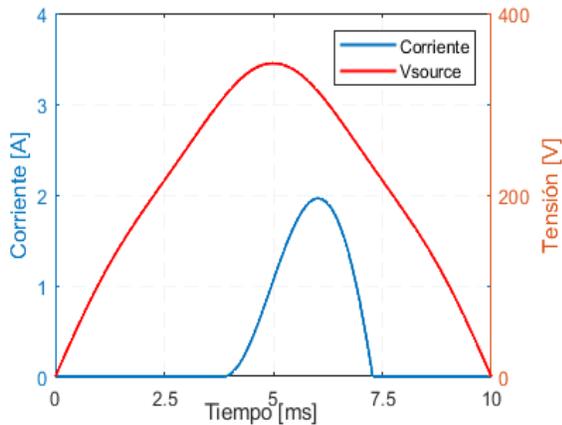
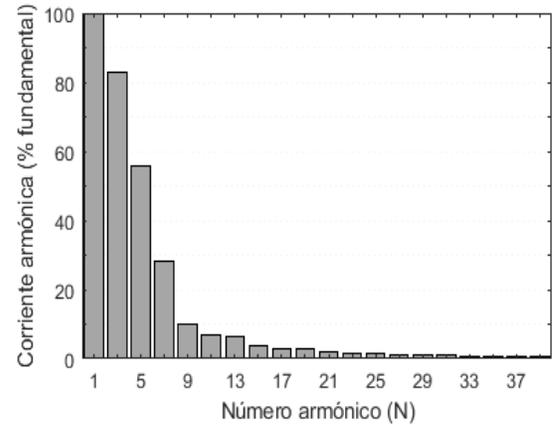
(a) *Corriente individual SMPS p-PFC*(b) *Contenido armónico*

Figura 11

Corriente individual y contenido armónico carga SMPS p-PFC ante fuente pointed top

(a) Corriente individual SMPS p-PFC*(b) Contenido armónico*

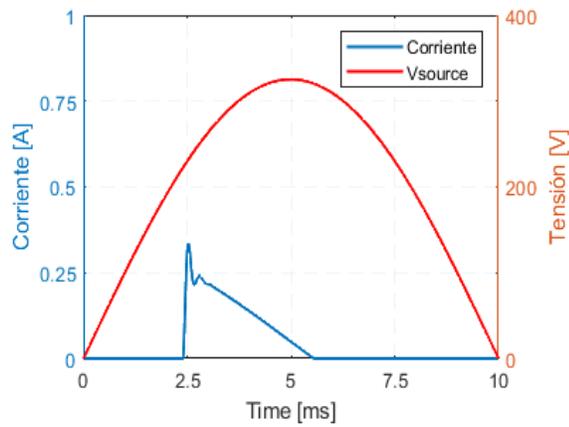
4.1.3 CFL

Por último, en la Figuras 12-14 se presentan los resultados obtenidos para el escenario de carga individual tipo CFL, ante tres formas diferentes de onda en la fuente de alimentación. Se observa gráficamente la corriente corriente individual, la tensión de alimentación, V_{source} , y el contenido armónico de la corriente, los parámetros de la carga se determinaron a través de las distribuciones de probabilidad mostradas en la sección 2.1.1.

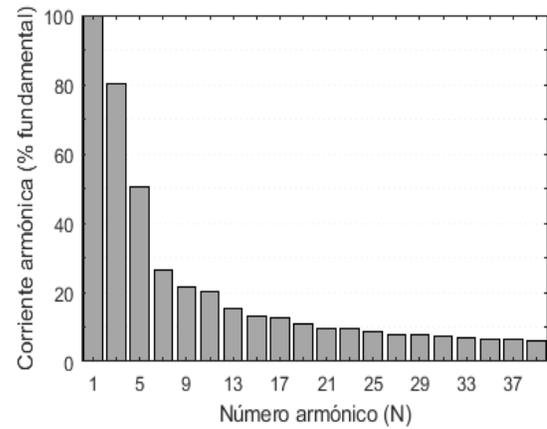
Figura 12

Corriente individual y contenido armónico carga CFL ante fuente sinusoidal

(a) *Corriente individual CFL.*

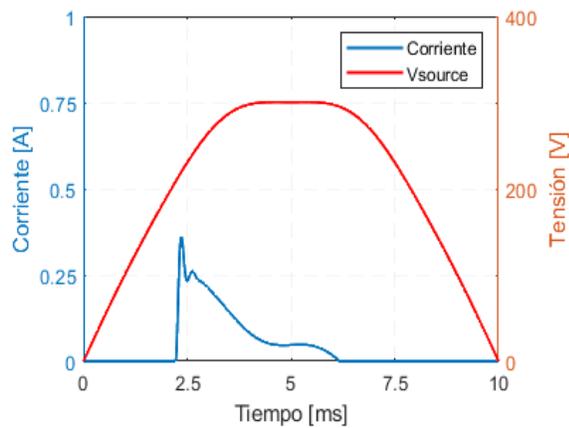


(b) *Contenido armónico*

**Figura 13**

Corriente individual y contenido armónico carga CFL ante fuente flat-top

(a) *Corriente individual CFL*



(b) *Contenido armónico*

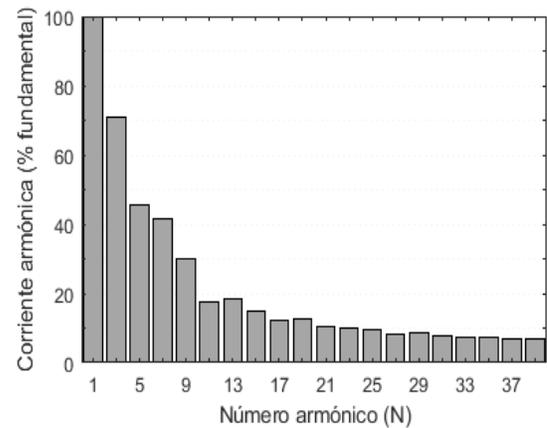
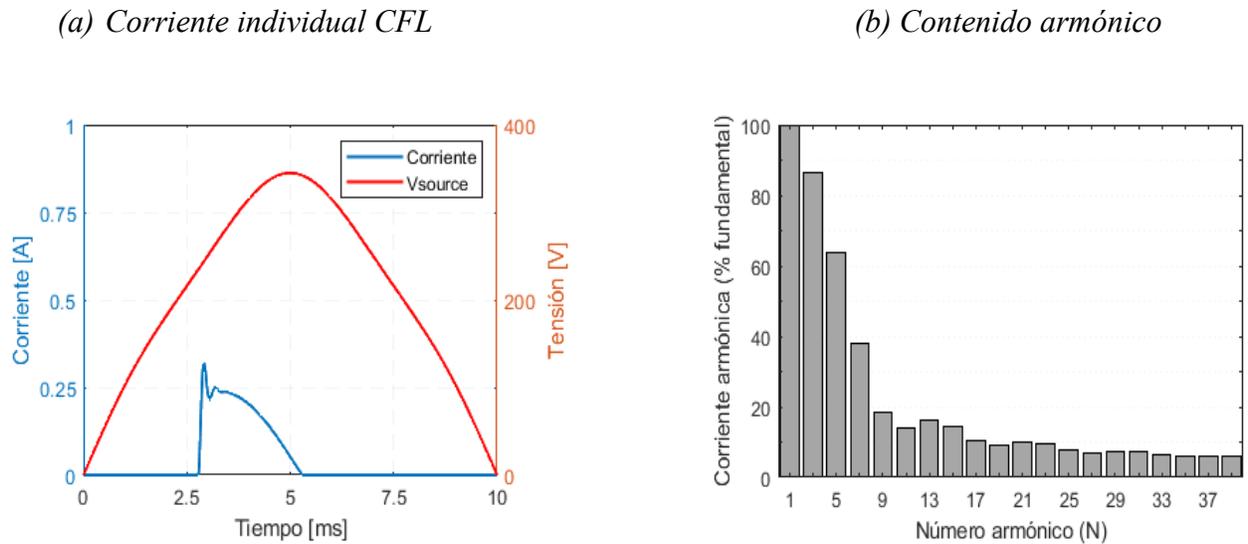


Figura 14

Corriente individual y contenido armónico carga CFL ante fuente pointed-top



4.1.4 Análisis de resultados para cargas individuales.

En las Figuras 6-14 se observa gráficamente un leve incremento en el valor pico en la magnitud de la señal de corriente para los escenarios de cargas SMPS con fuente de alimentación *pointed-top*, aumentando 25% con respecto a la alimentación sinusoidal en cargas SMPS no-PFC y un 5% en cargas SMPS p-PFC. En cambio, las luminarias CFL mantienen su valor pico constante con una media de 337 [mA].

En las Figuras 6-14 (b), se observa gráficamente el contenido armónico inyectado por cada una de las cargas bajo análisis, en estas se evidencia que la carga SMPS no-PFC contiene altos niveles de distorsión, sin depender directamente de la señal de alimentación, asimismo, se evidencia un incremento de aproximadamente 3,87% en el 3^{er} armónico, 11,41% en el 5^{to} y,

21,77% en el 7^{mo} armónico ante fuente *flat-top* comparada con señales sinusoidales. Para el caso de las cargas SMPS p-PFC y CFL se presenta mayor magnitud en comparación con su fundamental en los armónicos 3^{ro}, 5^{to}, 7^{mo}.

De la Tabla 1, se puede observar que, las cargas SMPS no_PFC y CFL poseen altos niveles de distorsión armónica de corriente con respecto al escenario de carga SMPS p-PFC aumentando en un 187,64%, ante señal sinusoidal pura, 172,93%, ante *flat-top* y un 198,34% ante *pointed-top* en las cargas SMPS no_PFC y un 19,65%, ante sinusoidal pura, 36,69%, ante *flat-top*, 17,99% *pointed-top* en las luminarias CFL. Asimismo, se observa que, la calidad de energía eléctrica mejora en las cargas SMPS p-PFC obteniendo resultados inferiores en el índice de distorsión armónica (THD) respecto a las tres cargas en estudio.

De igual forma, a través de la Tabla 1, se puede observar que, la señal de alimentación óptima para obtener el menor índice total de distorsión (THD) es la tipo *flat-top*, obteniendo un resultado de 221,76% en cargas SMPS no-PFC, 81,25% en cargas SMPS p-PFC y 111,06% en cargas CFL, en base a esto, el mejor escenario posible para obtener mejores resultados en la calidad de energía eléctrica es el de carga SMPS p-PFC ante fuente de alimentación *flat-top*.

Tabla 4

Contenido armónico respecto al fundamental, distorsión armónica total para cargas individuales

| Carga | Sinusoidal | | | | | <i>Flat-top</i> | | | | | <i>Pointed-top</i> | | | | |
|----------------|------------|----|----|----|----------|-----------------|----|----|----|----------|--------------------|----|----|----|----------|
| | 3 | 5 | 7 | 9 | THDi (%) | 3 | 5 | 7 | 9 | THDi (%) | 3 | 5 | 7 | 9 | THDi (%) |
| SMPS no-PFC | 99 | 97 | 93 | 89 | 267,82 | 96 | 88 | 79 | 71 | 221,76 | 99 | 98 | 96 | 94 | 312,78 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|-----|--------|----|----|----|----|--------|----|----|----|-----|--------|
| SMPS | 78 | 46 | 18 | 8,2 | 93,11 | 71 | 33 | 13 | 12 | 81,25 | 83 | 56 | 28 | 9.8 | 104,84 |
| p-PFC | | | | | | | | | | | | | | | |
| CFL | 80 | 50 | 27 | 21 | 111,41 | 71 | 46 | 41 | 30 | 111,06 | 87 | 64 | 38 | 18 | 123,7 |

4.2 Agregación de cargas sin impedancia de red

Diversos estudios (Collin, 2014; Cresswell et al., 2009) han demostrado que realizar la agregación de 200 cargas SMPS en el Punto de Acople Común produce valores asintóticos en el factor de diversidad armónica (DF) presentado en la sección 2.5. Es por esto que en la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos para el escenario de carga agregando tipos de carga SMPS y CFL en un mismo punto de acople común. Para el primer caso, se realiza el análisis con impedancia de red ideal, es decir $Z_{sys} = 0$, para luego en la sección 4.3 desarrollar el análisis con impedancia de red diferente a 0. Se presentan los resultados de agregación para cargas tipo SMPS no-PFC, SMPS p-PFC, CFL y mixtas, mostrando las gráficas de la forma de onda, contenido armónico de la corriente y el factor de diversidad armónica, ante las señales de alimentación propuestas en la sección 2.3.

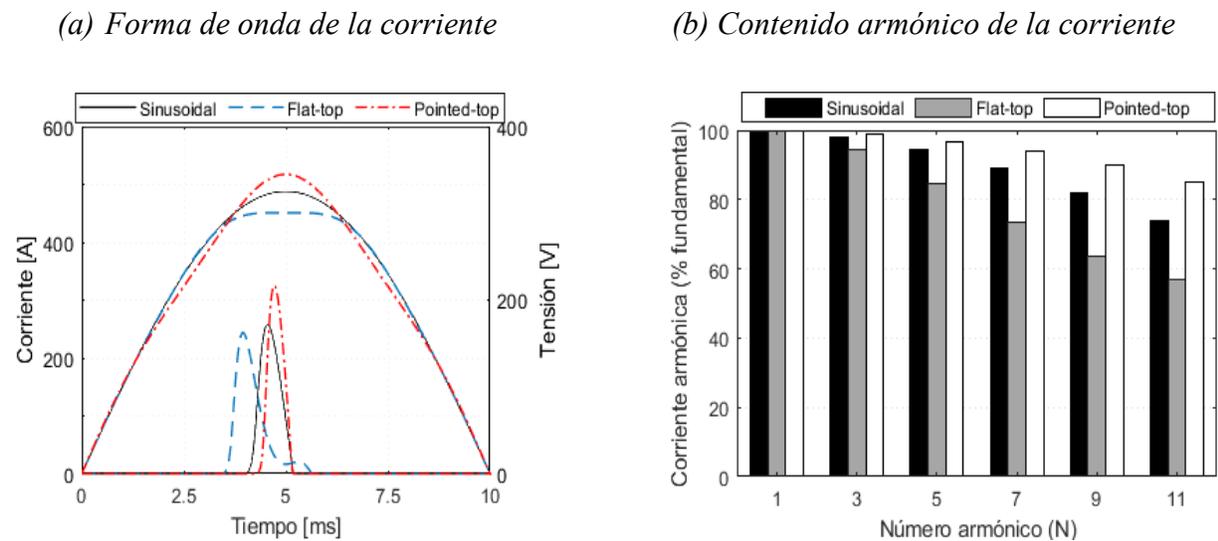
4.2.1 Agregación SMPS no-PFC

En el Anexo 1 se observan los valores de los parámetros (resistencia R de entrada, inductancia L , capacitancia C del *dc-link* y potencia P_{dc}) utilizados en el modelo circuital equivalente para las cargas tipo SMPS no-PFC. Estos valores fueron obtenidos mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en la Tabla 1.

Se observan las formas de onda, contenido armónico de la respuesta en corriente antes tres diferentes señales de alimentación (sinusoidal, *flat-top* y *pointed top*).

Figura 15

Impacto de la agregación de cargas tipo SMPS no-PFC en un punto de acople común

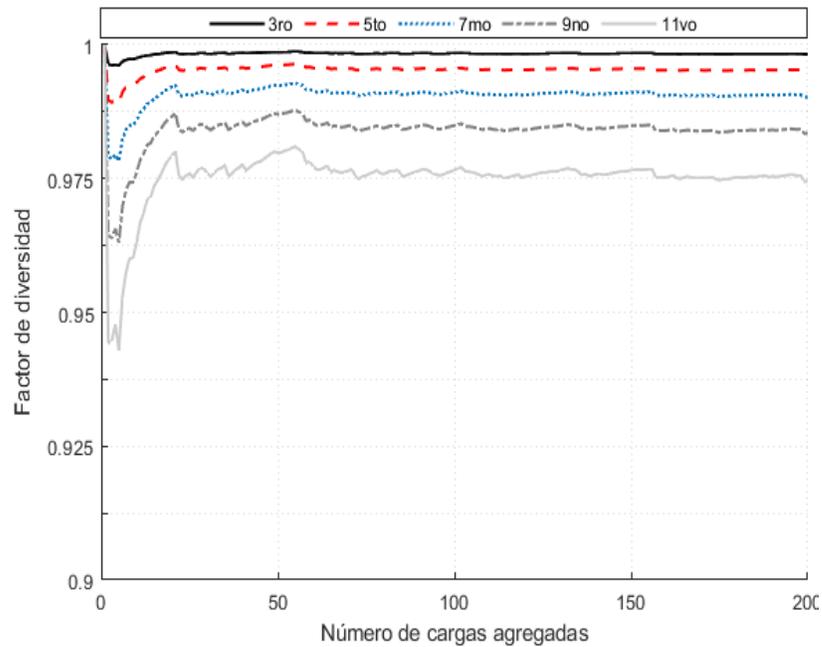


Asimismo, en la Figura 16 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas SMPS no-PFC agregadas en un punto de acople común y variaciones en las señales de alimentación (sinusoidal, (a), *flat-top*, (b), *pointed-top*, (c)), cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

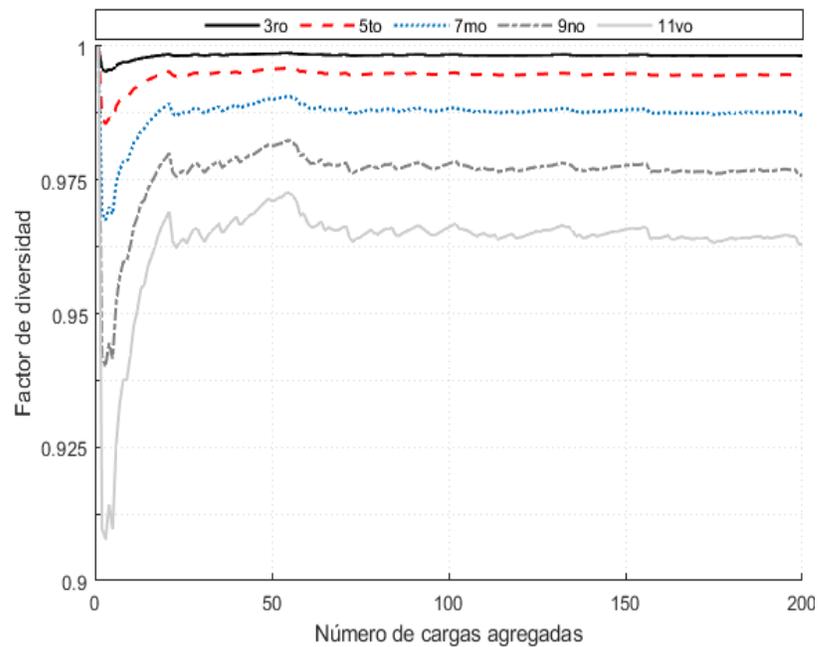
Figura 16

Factores de diversidad para agregación de cargas tipo SMPS no-PFC

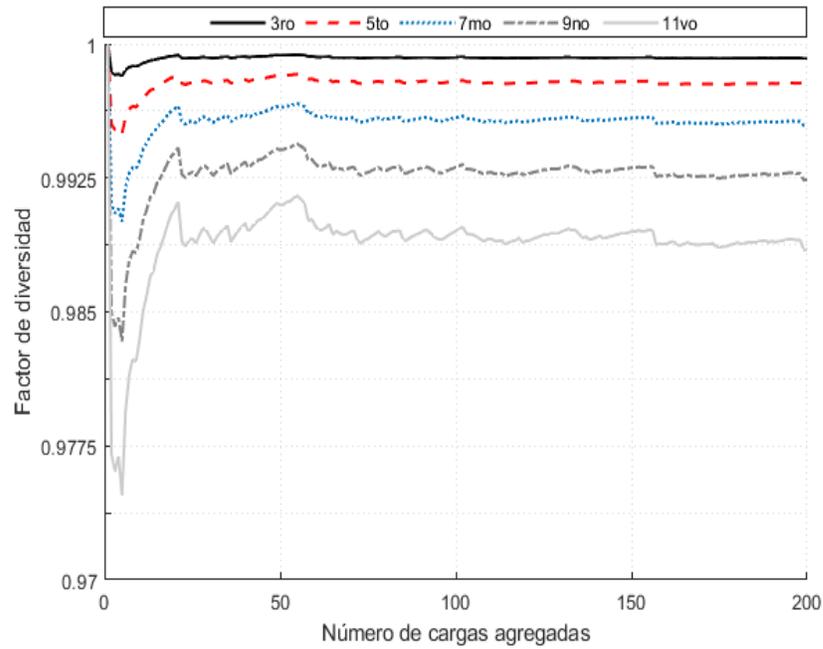
(a) Cancelación armónica carga tipo SMPS no-PFC (Alimentación sinusoidal)



(b) Cancelación armónica carga tipo SMPS no-PFC (Alimentación flat-top)



(c) Cancelación armónica carga tipo SMPS no-PFC (Alimentación pointed-top)

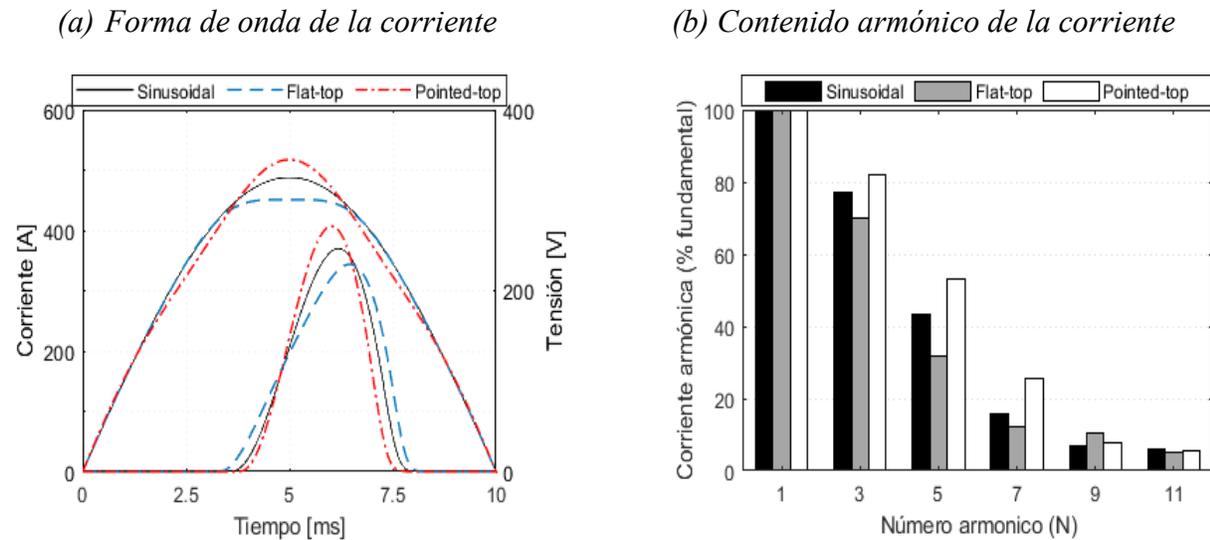


4.2.2 Agregación SMPS p-PFC

El Anexo 2 presenta los valores determinados para el escenario de carga en el cual se agregan cargas tipo SMPS p-PFC. Dichos parámetros son determinados mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en la Tabla 1. Se presentan las formas de onda y el contenido armónico de las señales de corriente para las tres señales de alimentación consideradas, así como también, en la Figura 18 se presenta el comportamiento del factor de diversidad armónica para cada carga agregada.

Figura 17

Impacto de la agregación de cargas tipo SMPS p-PFC en un punto de acople común

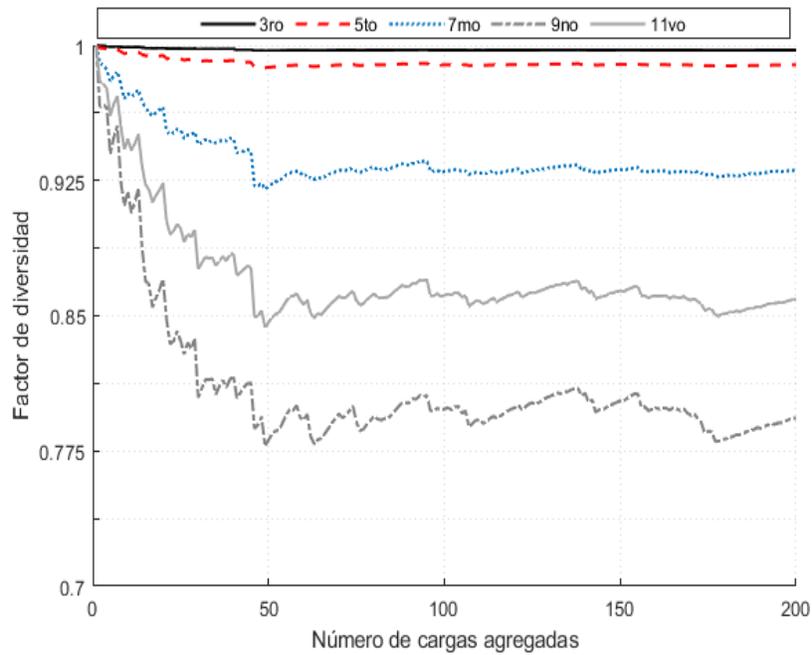


Asimismo, en la Figura 18 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas SMPS p-PFC agregadas en un punto de acople común y variaciones en las señales de alimentación (sinusoidal, (a), *flat-top*, (b), *pointed-top*, (c)), cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

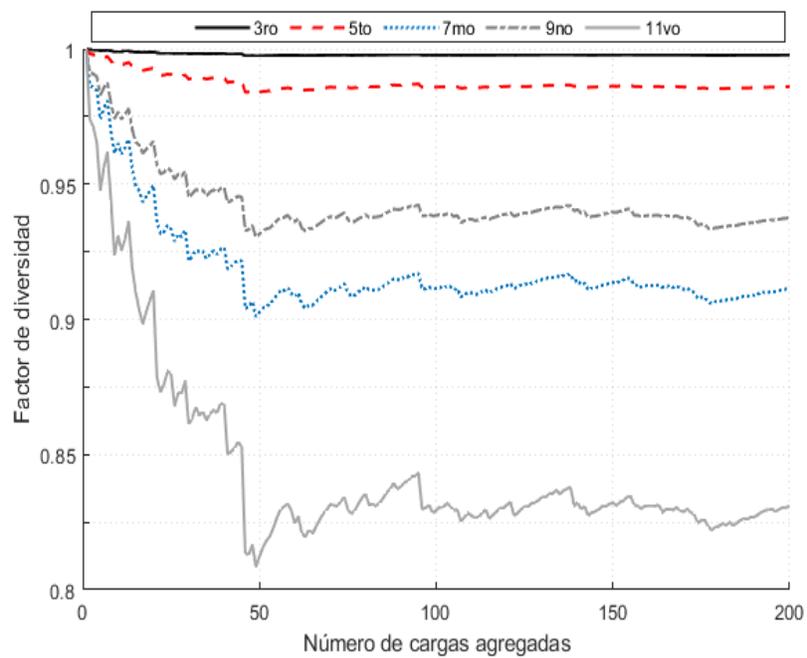
Figura 18

Factores de diversidad para agregación de cargas tipo SMPS p-PFC

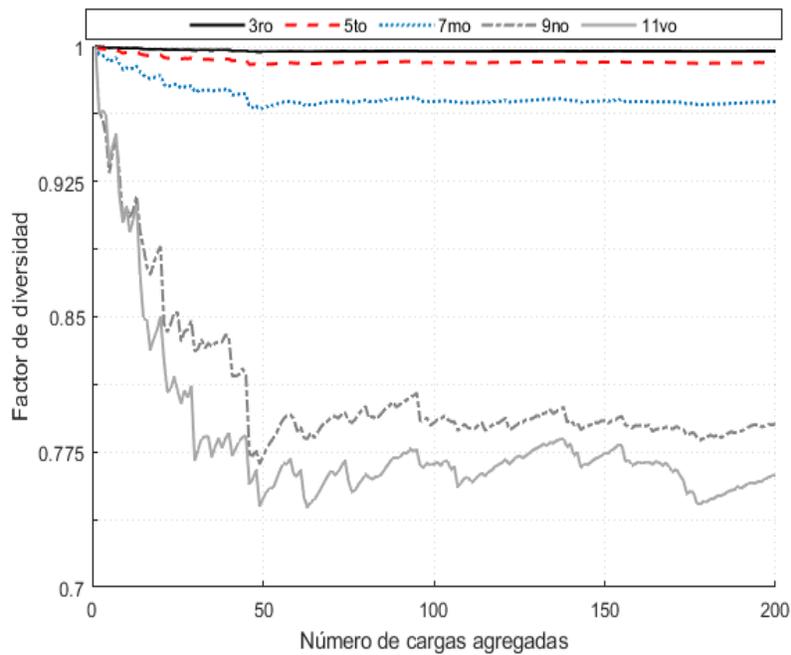
(a) Cancelación armónica carga tipo SMPS p-PFC (Alimentación sinusoidal)



(b) Cancelación armónica carga tipo SMPS p-PFC (Alimentación flat-top)



(c) Cancelación armónica carga tipo SMPS *p*-PFC (Alimentación pointed-top)



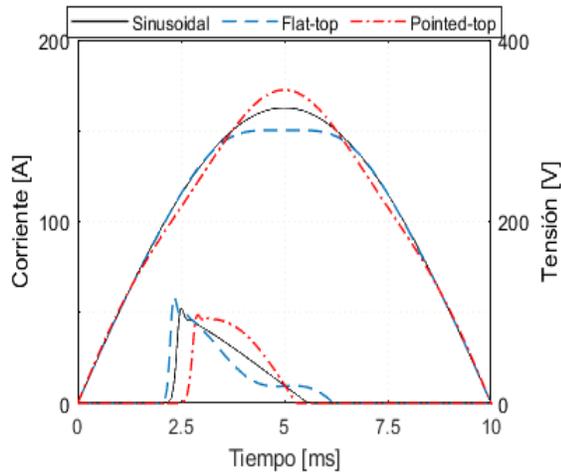
4.2.3 Agregación CFL

El Anexo 3 presenta los parámetros del modelo circuital equivalente determinados mediante las distribuciones de probabilidad presentados en la Tabla 1 para las cargas tipo CFL. De igual forma que los capítulos detallados anteriormente, se observan las gráficas de la forma de onda y contenido armónico para la corriente total de las cargas tipo CFL en un punto de acople común, asimismo, se observa en la Figura 20 la gráfica del factor de diversidad armónico para cada carga agregada.

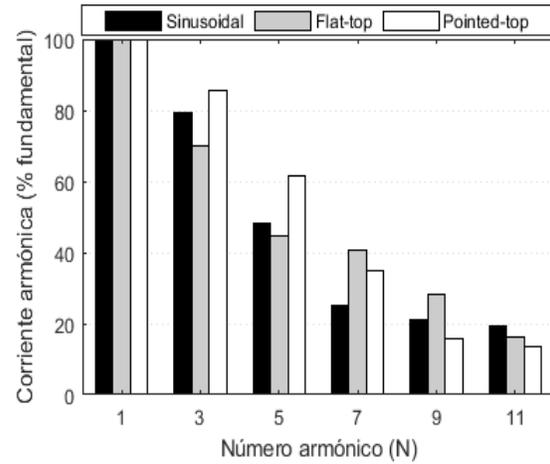
Figura 19

Impacto de la agregación de cargas tipo CFL en un punto de acople común

(a) *Formas de ondas de la corriente*



(b) *Contenido armónico de las corriente*

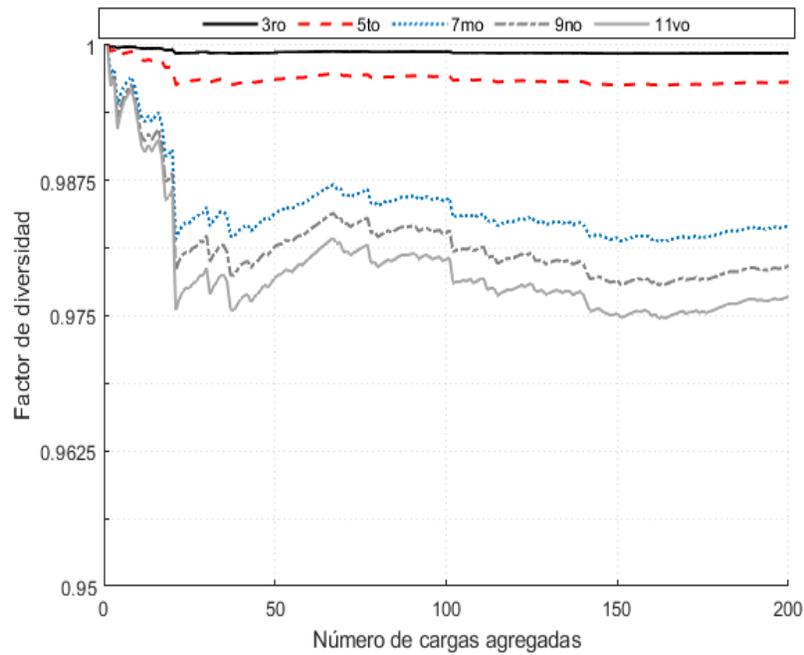


Asimismo, en la Figura 20 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de luminarias CFL agregadas en un punto de acople común y variaciones en las señales de alimentación (sinusoidal, (a), *flat-top*, (b), *pointed-top*, (c)), cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

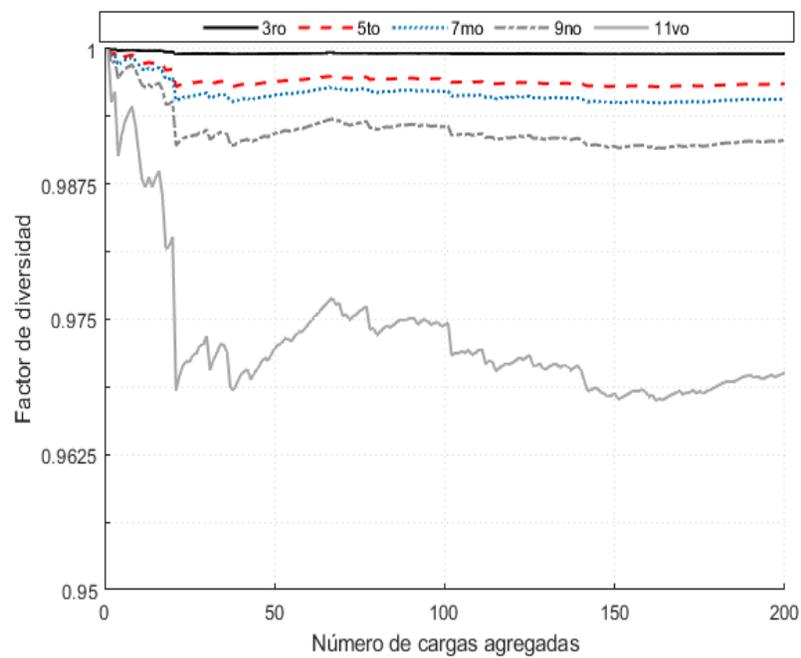
Figura 20

Factores de diversidad para agregación de cargas tipo CFL

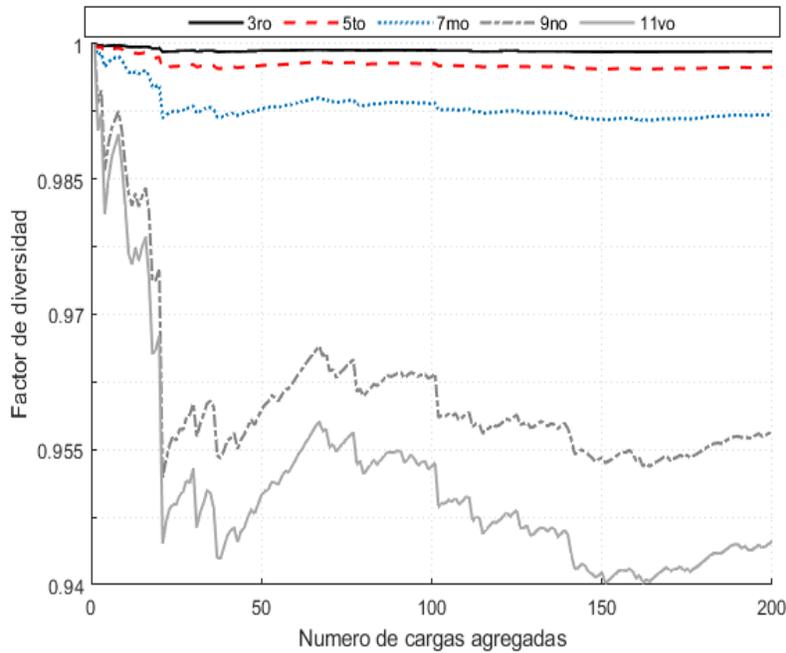
(a) Cancelación armónica carga tipo CFL (Alimentación sinusoidal)



(b) Cancelación armónica carga tipo CFL (Alimentación flat-top)



(c) Cancelación armónica carga tipo CFL (Alimentación pointed-top)



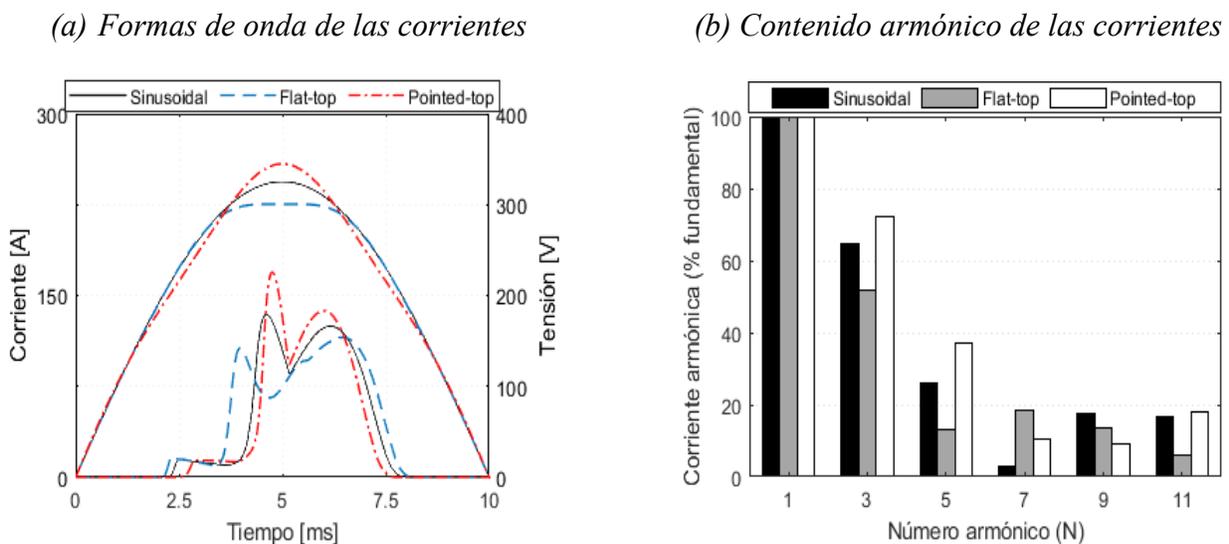
4.2.4 Agregación Mixta

Como un escenario de análisis se realiza la agregación de manera aleatoria de 200 cargas basadas en fuentes conmutadas, entre las cuales se encuentran 72 cargas tipo SMPS no-PFC, 61 SMPS p-PFC y 67 CFL's. Los parámetros definidos para el modelo circuital de cada una de las cargas escogidas se pueden observar en el Anexo 4. Esta selección aleatoria de cargas se realiza con ayuda del comando "randi" proporcionado por la toolbox del software MatLab/Simulink, dicho comando genera números enteros pseudoaleatorios distribuidos uniformemente, los cuales representan las cargas mencionadas.

En la presente sección, se muestran gráficamente las figuras donde se observa las formas de onda, contenido armónico de la respuesta en corriente para tres diferentes señales tensión de alimentación (sinusoidal, *flat-top* y *pointed top*), asimismo, en la Figura 22 se observa las gráfica del factor de diversidad armónica para dichas señales de alimentación

Figura 21

Impacto de la agregación de cargas mixtas en un punto de acople común

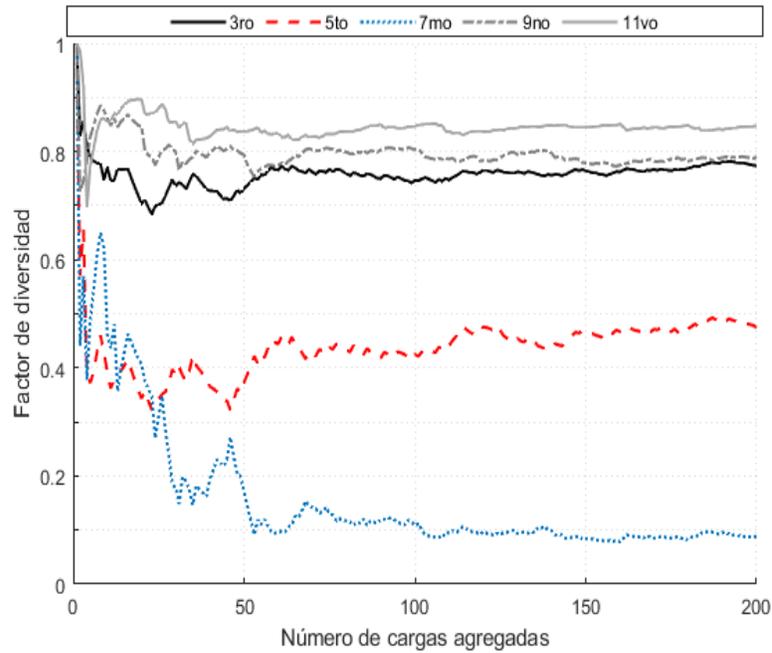


Asimismo, en la Figura 22 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas mixtas agregadas en un punto de acople común y variaciones en las señales de alimentación (sinusoidal, (a), *flat-top*, (b), *pointed-top*, (c)), cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

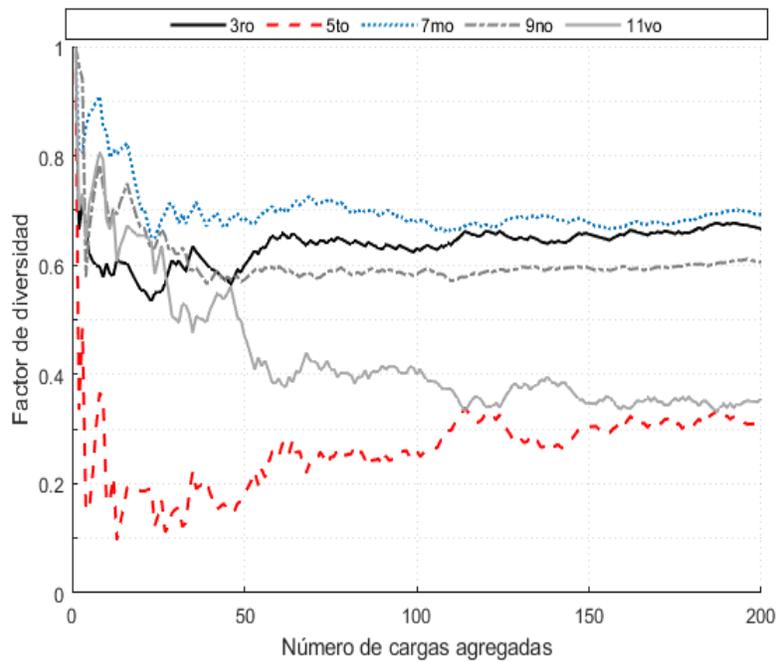
Figura 22

Factores de diversidad para agregación de cargas mixtas

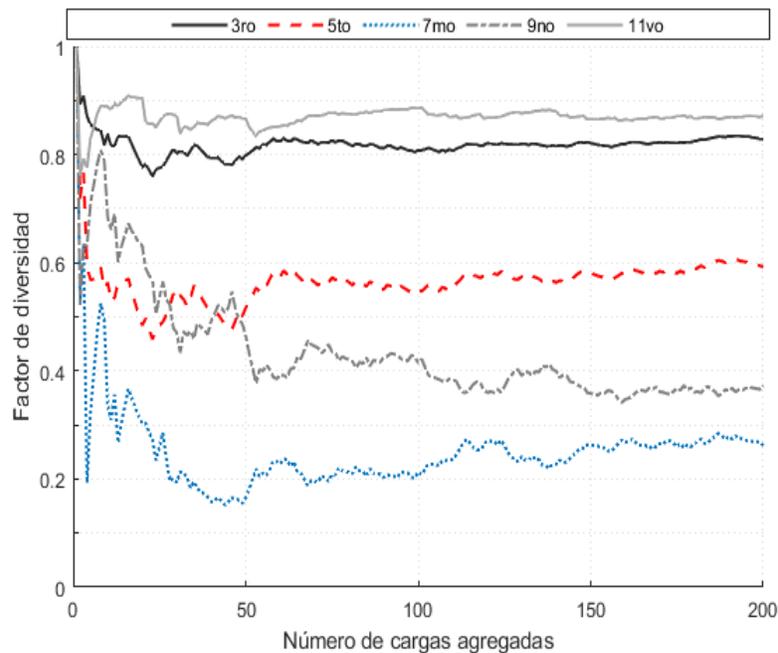
(a) Cancelación armónica cargas mixtas (Alimentación sinusoidal)



(b) Cancelación armónica cargas mixtas (Alimentación flat-top)



(c) Cancelación armónica carga tipo CFL (Alimentación pointed-top)



4.2.5 Análisis de resultados

En las Figuras 15, 17, 19 y 21 se puede observar el impacto de la agregación en diferentes cargas mostradas, en este sentido, las formas de onda de la corriente, así como su valor pico es directamente proporcional a la fuente de alimentación que la supe, dado que, cuando la fuente de alimentación es tipo *flat-top* el valor pico de la corriente se reduce aproximadamente en 7,71%, 22,2% con respecto a las señales sinusoidales y *pointed-top* respectivamente, esto es debido principalmente a la forma típica de la señal *flat-top*.

En la Tabla 5, se pueden observar los resultados para los escenarios de carga en los cuales se realiza la conexión de 200 cargas, sobre un punto de acople común con alimentación sinusoidal pura. En esta tabla se puede observar que, al realizar la agregación de cargas con iguales

características el factor de diversidad armónica (DF) no se reduce considerablemente, siendo el 15^{avo} armónico que presenta menor valor en el factor de diversidad para la agregación de cargas del mismo tipo, sin embargo, al realizar una comparación directa de los valores del factor de diversidad en este armónico se puede observar que las cargas SMPS p-PFC obtiene la mayor cancelación, con un aumento del 45,02% con respecto a las cargas SMPS no-PFC y un 43,95% con respecto a las cargas CFL en el armónico bajo estudio. Al realizar la agregación mixta de cargas SMPS y CFL se puede observar que, se presenta una alta cancelación en la totalidad de los armónicos estudiados, obteniendo la mayor cancelación en el 7^{mo} armónico, el cual en comparación con el armónico que presenta menor cancelación (11^{avo}) aumenta en un 89.61%.

Tabla 5

Factores de diversidad armónica ante fuente de alimentación sinusoidal

| Orden armónico | Factor de diversidad (DF) | | | |
|-------------------|-----------------------------------|---------------|-------|--------------|
| | Fuente de alimentación sinusoidal | | | |
| | SMPS no-PFC | SMPS p-PFC | CFL | MIXTAS |
| 3 | 0,998 | 0,997 | 0,999 | 0,774 |
| 5 | 0,995 | 0,989 | 0,997 | 0,474 |
| 7 | 0,990 | 0,931 | 0,983 | 0,088 |
| 9 | 0,983 | 0,793 | 0,980 | 0,790 |
| 11 | 0,974 | 0,859 | 0,977 | 0,847 |
| 13 | 0,963 | 0,672 | 0,952 | 0,580 |
| 15 | 0,947 | 0,653 | 0,940 | 0,633 |

En base a la Tabla 6, se procede a realizar el análisis del escenario de carga con fuente de alimentación *flat-top* al agregar cargas del mismo tipo y mixtas, evidenciándose que se mantiene la tendencia de disminuir el factor de diversidad conforme el número armónico se vuelve mayor siendo el 15^{avo} armónico el que presenta menor valor en el factor de diversidad para la agregación de cargas del mismo tipo, sin embargo, al realizar una comparación directa de los valores del factor de diversidad se puede observar que las cargas SMPS p-PFC obtiene la mayor cancelación, con un aumento del 23,94% con respecto a las cargas SMPS no-PFC y un 27,12% con respecto a las cargas CFL en el armónico bajo estudio. Al realizar la agregación mixta de cargas SMPS y CFL se puede observar que, se presenta una alta cancelación en la totalidad de los armónicos estudiados, obteniendo la mayor cancelación en el 5^{to} armónico, el cual en comparación con el armónico que presenta menor cancelación (13^{avo}) aumenta en un 65,45%

Tabla 6

Factores de diversidad armónica ante fuente de alimentación flat-top

| Orden armónico | Factor de diversidad (DF) | | | |
|-------------------|--|---------------|-------|--------------|
| | Fuente de alimentación <i>flat-top</i> | | | |
| | SMPS no-PFC | SMPS p-PFC | CFL | MIXTAS |
| 3 | 0,998 | 0,998 | 1,000 | 0,666 |
| 5 | 0,994 | 0,986 | 0,997 | 0,302 |
| 7 | 0,987 | 0,911 | 0,995 | 0,694 |
| 9 | 0,976 | 0,937 | 0,992 | 0,606 |

| | | | | |
|----|-------|--------------|-------|--------------|
| 11 | 0,963 | 0,831 | 0,970 | 0,357 |
| 13 | 0,951 | 0,770 | 0,977 | 0,874 |
| 15 | 0,937 | 0,756 | 0,961 | 0,651 |

Igualmente, en la Tabla 7, se puede observar que, los resultados obtenidos para los escenarios de carga en los cuales se realiza la conexión de 200 cargas, sobre un punto de acople común con alimentación *pointed-top*, en ella se puede observar que, al realizar la agregación de cargas con iguales características el factor de diversidad armónica (DF) no se reduce considerablemente, siendo el 15^{avo} armónico el que presenta menor valor en el factor de diversidad para la agregación de cargas del mismo tipo, sin embargo, al realizar una comparación directa de los valores del factor de diversidad en este armónico se puede observar que las cargas SMPS p-PFC obtiene la mayor cancelación, con un aumento del 75,27% con respecto a las cargas SMPS no-PFC y un 67,92% con respecto a las cargas CFL en el armónico bajo estudio. Al realizar la agregación mixta de cargas SMPS y CFL se puede observar que, se presenta una alta cancelación en la totalidad de los armónicos estudiados, obteniendo la mayor cancelación en el 7^{mo} armónico, el cual en comparación con el armónico que presenta menor cancelación (11^{avo}) aumenta en un 69,92%.

Tabla 7

Factores de diversidad armónica ante fuente de alimentación pointed-top

| Orden | Factor de diversidad (DF) |
|----------|---|
| armónico | Fuente de alimentación <i>pointed-top</i> |

| | SMPS no-PFC | SMPS p-PFC | CFL | MIXTAS |
|----|----------------|---------------|-------|--------------|
| 3 | 0,999 | 0,997 | 0,999 | 0,829 |
| 5 | 0,998 | 0,991 | 0,997 | 0,592 |
| 7 | 0,995 | 0,969 | 0,992 | 0,262 |
| 9 | 0,992 | 0,791 | 0,957 | 0,372 |
| 11 | 0,988 | 0,762 | 0,945 | 0,871 |
| 13 | 0,984 | 0,797 | 0,958 | 0,840 |
| 15 | 0,978 | 0,558 | 0,937 | 0,671 |

De la Tabla 8, se puede observar que, al realizar la agregación del mismo tipo de cargas el índice de distorsión armónica aumenta considerablemente con respecto al escenario de conexión de cargas mixtas. Para realizar una comparación directa, se calcula la razón de cambio entre los dos escenarios más críticos, es decir, entre la agregación de cargas SMPS no-PFC y la agregación de cargas mixtas, obteniendo como resultado una proporción de 3:1 para la tensión sinusoidal, 3.17:1 para la tensión *flat-top* y 3.04:1 para la tensión *pointed-top*.

Tabla 8

Índices de distorsión armónica para la agregación de cargas

| índice de distorsión armónica total (THDi) | | | |
|--|------------------------|---------------------|------------------------|
| Cargas | Fuente de alimentación | | |
| | Sinusoidal (%) | <i>Flat-top</i> (%) | <i>Pointed-top</i> (%) |
| SMPS no-PFC | 227,32 | 193,84 | 270,37 |

| | | | |
|------------|-------------|--------------|--------------|
| SMPS p-PFC | 90,32 | 79 | 101,55 |
| CFL | 105,24 | 105,11 | 116,92 |
| Mixtas | 75,7 | 61,06 | 88,88 |

4.3 Agregación de cargas con impedancia de red

Según (A. M Blanco, 2013), menciona que la forma onda *flat-top* en las redes de Baja Tensión es causada por el uso masivo de las cargas basadas en circuitos rectificadores, es por esto que para la presente sección se muestran los resultados para la agregación de 200 cargas mostradas en el Anexo 4 utilizando como tensión de alimentación una señal flat-top y realizando variaciones en la impedancia de la red como se presenta en la sección 2.2.

A continuación, se muestran las gráficas de la forma de onda para la tensión de alimentación de las cargas, es decir, la tensión en el Punto de Acople Común (PCC) y la forma de onda de la corriente de entrada, el contenido armónico de la corriente y sus respectivas gráficas del factor de diversidad armónico para los tres escenarios de carga: impedancia de red mínima mostrada en la sección 4.3.1, impedancia de red nominal mostrada en la sección 4.3.2 e impedancia máxima la sección 4.3.3.

4.3.1 Impedancia de red mínima (Z_{sys} mínima)

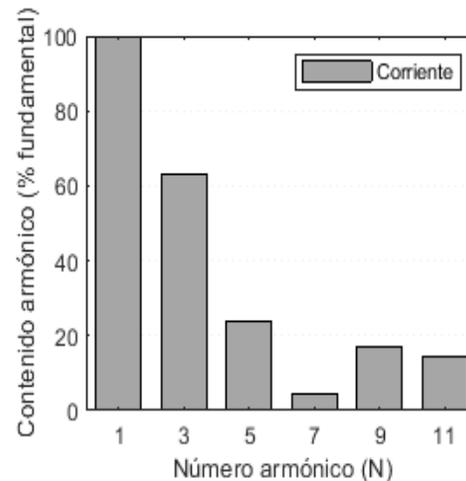
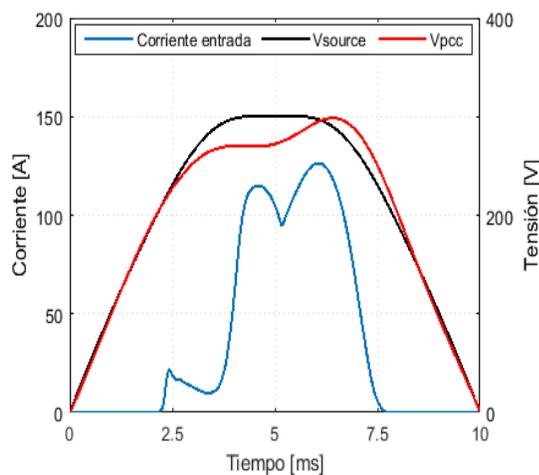
Para el caso de impedancia de red mínima, Z_{sys} min, los valores para la impedancia de red se tomaron a partir de la Tabla 2 y los parámetros del modelo circuital equivalente para cada una de las cargas pueden ser observados en el Anexo 4.

Figura 23

Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red mínima)

(a) Forma de onda de la corriente y tensiones

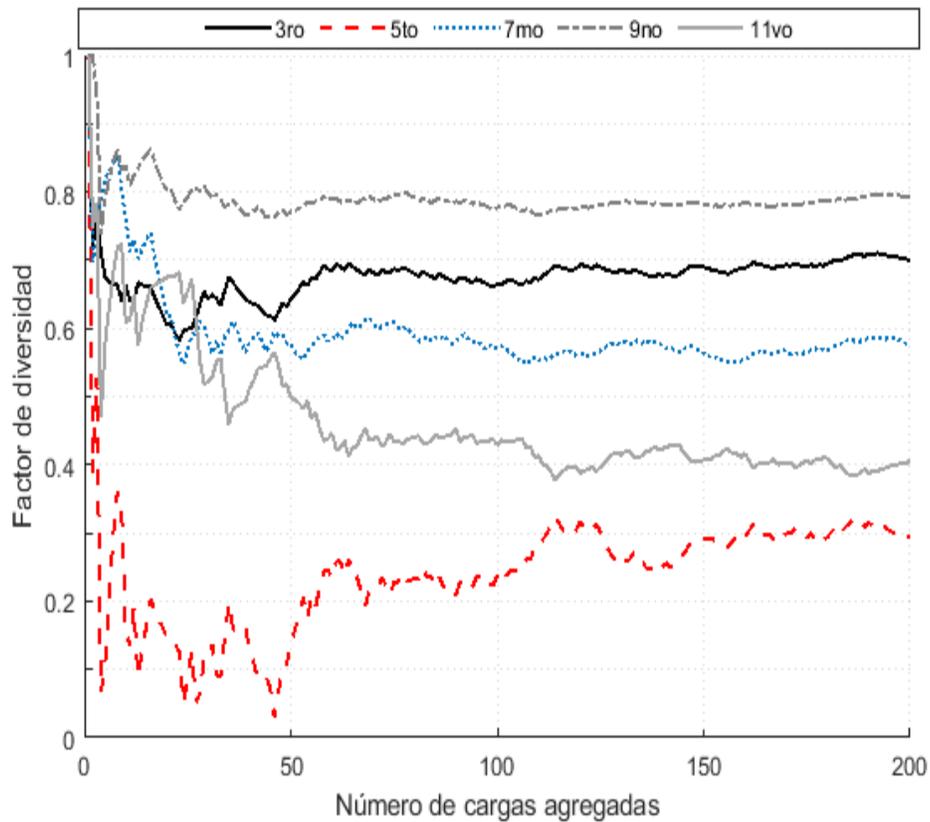
(b) Contenido armónico



Asimismo, en la Figura 24 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas mixtas agregadas en un punto de acople común con impedancia de red mínima y señal de alimentación *flat-top*, cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

Figura 24

Factor de diversidad de cargas agregadas con impedancia de red mínima



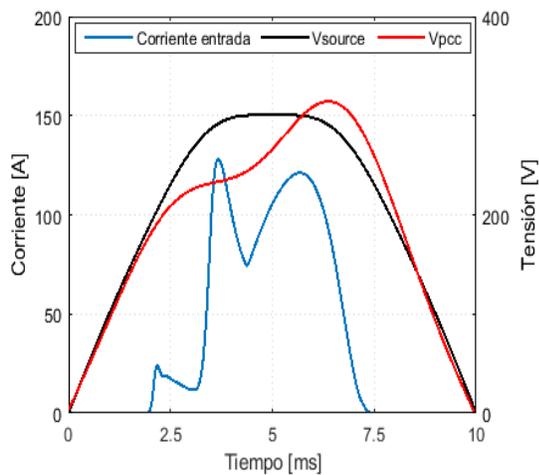
4.3.2 Impedancia de red nominal ($Z_{sys\ nominal}$)

Para el caso de impedancia de red nominal, $Z_{sys\ nom}$, los valores para la impedancia de red se tomaron a partir de la Tabla 2 y los parámetros del modelo circuital equivalente para cada una de las cargas pueden ser observados en el Anexo 4.

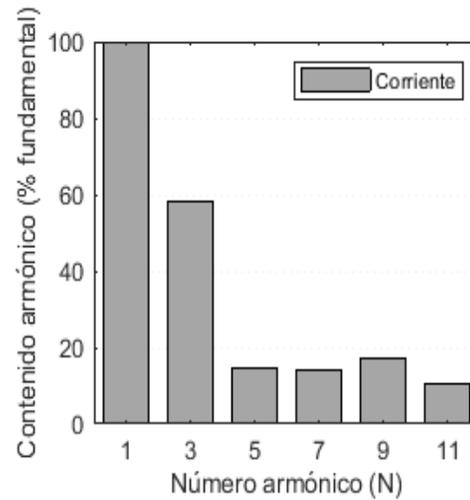
Figura 25

Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red nominal)

(a) *Forma de onda de la corriente y tensiones*



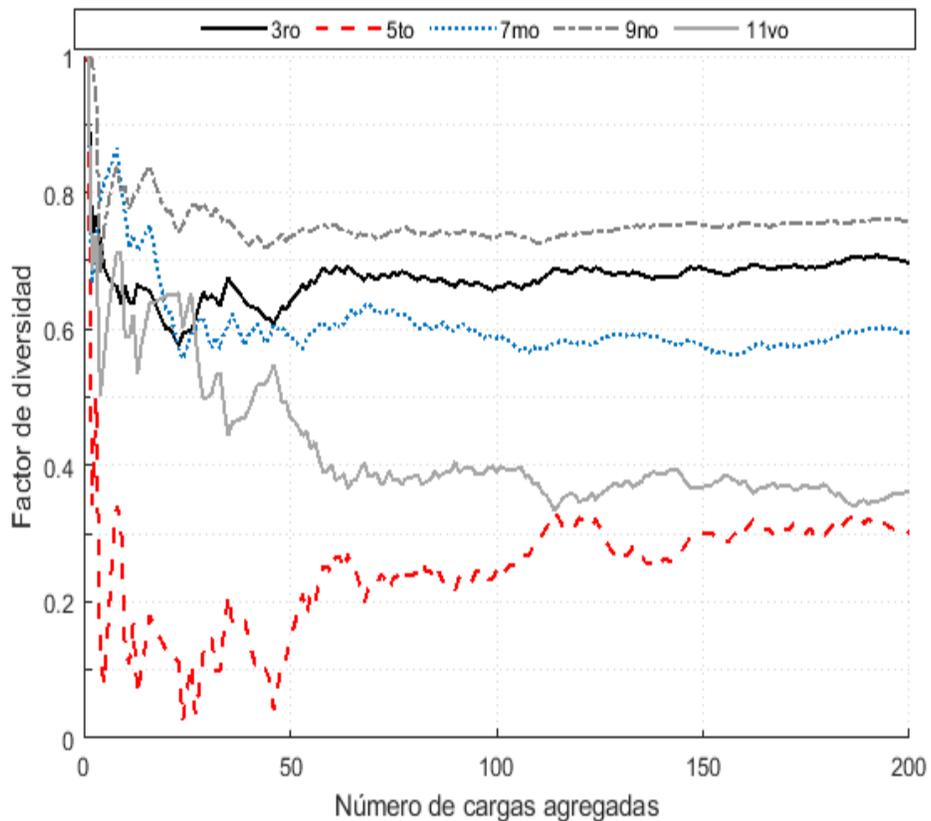
(b) *Contenido armónico*



Asimismo, en la Figura 26 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas mixtas agregadas en un punto de acople común con impedancia de red nominal y señal de alimentación flat-top, cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

Figura 26

Factor de diversidad de cargas agregadas basdas en fuentes conmutadas (impedancia de red nominal)



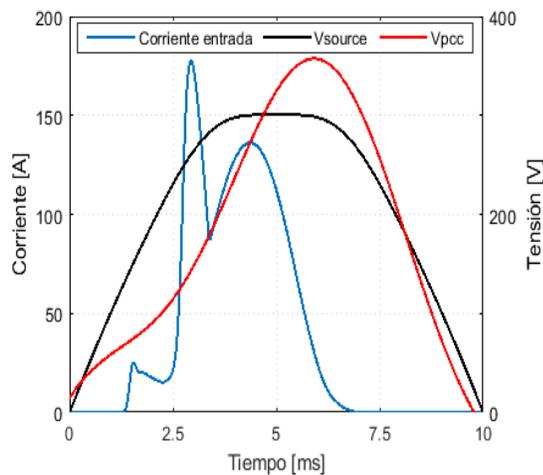
4.3.3 Impedancia de red máxima (Z_{sys} máxima)

Para el caso de impedancia de red máxima, Z_{sys} max, los valores para la impedancia de red se tomaron a partir de la Tabla 2 y los parámetros del modelo circuital equivalente para cada una de las cargas pueden ser observados en el Anexo 4.

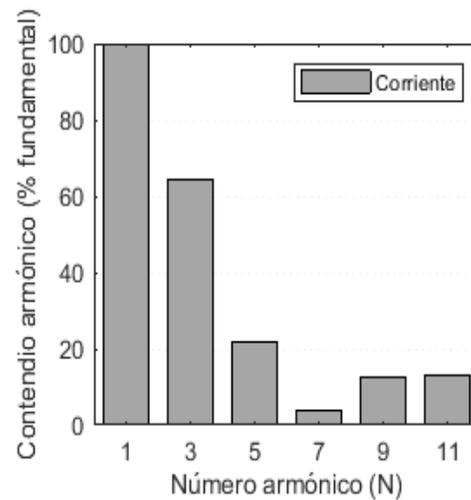
Figura 27

Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red máxima)

(a) *Forma de onda de la corriente y tensiones*



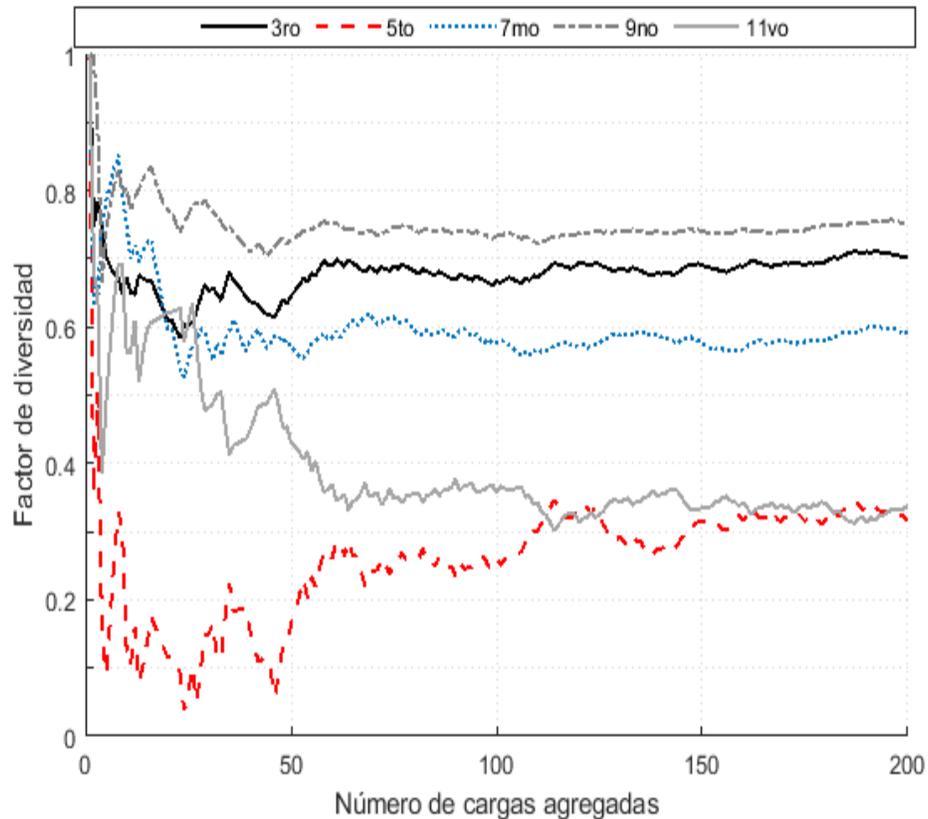
(b) *Contenido armónico*



Asimismo, en la Figura 26 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas mixtas agregadas en un punto de acople común con impedancia de red máxima y señal de alimentación flat-top, cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

Figura 28

Factor de diversidad de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas (impedancia de red máxima)



4.3.4 Análisis de resultados

En las figuras del impacto de agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas, se puede observar que, la forma de onda de la respuesta en corriente ante la conexión de 200 cargas no varía significativamente con respecto a las formas de ondas encontradas en la sección 4.2.4, sin embargo, la interacción de las cargas no lineales conectadas en un punto de acople común (PCC) producen una distorsión armónica (THD) en la señal de tensión con un valor de 8,48% para el escenario de carga con impedancia de red mínima, 12,45% con impedancia de red nominal y 22,08% en el caso de impedancia de red máxima, lo cual indica claramente que la distorsión

armónica de la señal de tensión en el punto de acople común se reduce notablemente con la impedancia equivalente mínima, con una diferencia porcentual de 31,88% con respecto a la impedancia nominal y 61,59% respecto a la impedancia máxima.

De la Tabla 9 se puede observar que, el mayor caso de cancelación armónica se presenta en el armónico 5^{to} con impedancia de red nominal ($R_{sys} = 0,25 \Omega$, $L_{sys} = 0,73 \text{ mH}$), con un valor de 0.299, comparando este valor con los obtenidos para la impedancia de red mínima (5^{to} armónico) disminuye en un 12,82%, y para la impedancia de red máxima (5^{to} armónico) disminuye en un 5,38%. También se observa que los valores más altos para el factor de diversidad armónica se encuentran en el 9^{no}, y el 13^{avo}, para las impedancias de red mínima (Z_{sys} mínima), nominal (Z_{sys} nominal) y máxima (Z_{sys} máxima) respectivamente, con una relación de 96,08% entre impedancia de red nominal con respecto a la red mínima y del 98% entre impedancia de red nominal con respecto a la red máxima.

Asimismo, de la Tabla 9 se puede observar que, el escenario con impedancia de red nominal, Z_{sys} nominal, presenta alta cancelación armónica en la totalidad de los armónicos estudiados, excepto en el 7^{mo}, donde realizando una comparación directa con los escenarios estudiados aumenta en 38,93% con respecto a la mínima y un 0,67% con respecto al máximo valor de impedancia de red, asimismo, el 13^{avo} presenta mayor cancelación armónica en el escenario del valor de impedancia mínima aumentando en un 22,96% con respecto al valor nominal de la impedancia. Por medio del anterior análisis se puede decir que, la cancelación armónica depende del valor de la impedancia de red, sin embargo, no mantiene la tendencia de obtener menores

valores en el factor de diversidad armónica en la totalidad de los armónicos estudiados en comparación con los escenarios de carga realizados.

Tabla 9

Factores de diversidad armónica ante diferentes impedancias de red

| Orden armónico | Factor de diversidad (DF) | | |
|----------------|---------------------------|------------------|------------------|
| | Z _{sys} | Z _{sys} | Z _{sys} |
| | Minima | Nominal | Máxima |
| 3 | 0,728 | 0,697 | 0,701 |
| 5 | 0,343 | 0,299 | 0,316 |
| 7 | 0,429 | 0,596 | 0,592 |
| 9 | 0,816 | 0,756 | 0,752 |
| 11 | 0,547 | 0,362 | 0,337 |
| 13 | 0,604 | 0,784 | 0,800 |
| 15 | 0,633 | 0,630 | 0,633 |

En base al escenario de agregación de cargas mixtas sin impedancia de red equivalente (sección 4.2.4) y el escenario de cargas mixtas con impedancia de red equivalente (sección 4.3.1, sección 4.3.2 y sección 4.3.3) se obtiene la Tabla 10, en donde muestra una comparación directa entre los factores de diversidad de los escenarios realizados de agregación de cargas mixtas con tensión de alimentación *flat-top*, en ella se puede observar que, el 5^{to} armónico presenta la mayor cancelación para los cuatro escenarios de carga mostrados, en cambio, el armónico que presenta poca cancelación armónica es el 13^{avo} para los escenarios de carga sin impedancia de red,

impedancia nominal e impedancia máxima, y el 9^{no} para la impedancia mínima, dichos escenarios aumentan su valor del factor de diversidad en un 189,4% para el escenario sin impedancia de red, 162,21% para la impedancia de red nominal, 153,16% para la impedancia de red máxima y 137,9% para la impedancia mínima, estos porcentajes muestran el incremento del factor de diversidad con respecto el 5^{to} armónico para cada escenario de carga.

Tabla 10

Comparativa de factores de diversidad con o sin impedancia de red

| Orden armónico | Factor de diversidad (DF) | | | |
|----------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | $Z_{sys} = 0$ | Z_{sys} | Z_{sys} | Z_{sys} |
| | | Mínima | Nominal | Máxima |
| 3 | 0,666 | 0,728 | 0,697 | 0,701 |
| 5 | 0,302 | 0,343 | 0,299 | 0,316 |
| 7 | 0,694 | 0,429 | 0,596 | 0,592 |
| 9 | 0,606 | 0,816 | 0,756 | 0,752 |
| 11 | 0,357 | 0,547 | 0,362 | 0,337 |
| 13 | 0,874 | 0,604 | 0,784 | 0,800 |
| 15 | 0,651 | 0,633 | 0,630 | 0,633 |

En las Tablas 9 y 10 se puede observar que, al realizar un promedio de los factores de diversidad armónica de los ordenes armónicos no proporciona un valor determinante para realizar un análisis en la incidencia de la impedancia de red en la cancelación armónica, debido a que dicho valor permanece constante al realizar las variaciones de impedancia, sin embargo, cada número

armónico presenta variaciones en el factor de diversidad, por ejemplo, el 5^{to} orden armónico presenta mayor cancelación en los escenarios de carga con y sin impedancia de red, tal como se evidencia en la Tabla 10.

La Tabla 11 muestra el contenido armónico y el índice de distorsión armónica total al realizar la conexión del conjunto de cargas basadas en fuentes conmutadas sobre un mismo punto de acople común, en esta se puede observar que, el escenario de carga con impedancia de red nominal, $Z_{sys\ nom}$, presenta mejores resultados en la calidad de energía con respecto a las impedancias de red mínima y máxima, reduciendo los valores del 3^{er} armónico en un 7,63% con respecto la impedancia de red mínima, $Z_{sys\ min}$, y un 9,46% con respecto la impedancia de red máxima, $Z_{sys\ max}$, sin embargo, el 7^{mo} armónico en la impedancia de red nominal aumenta en 201,28% con respecto la impedancia mínima y 275,2%.

De igual forma, a través de la Tabla 11, se puede observar que, la impedancia de red óptima para obtener el menor índice de distorsión total de corriente (THDi) es la nominal, $Z_{sys\ nom}$, obteniendo un resultado de 68,1%, en base a esto, el mejor escenario posible para obtener mejores resultados en la calidad de la energía eléctrica se presenta en el escenario de carga con impedancia de red nominal y fuente de alimentación *flat-top*.

Tabla 11

Contenido armónico respecto al fundamental, distorsión armónica total para la agregación de cargas

| Escenario de carga | Contenido armónico | | | | THDi (%) |
|--------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------------|
| | (% respecto al fundamental) | | | | |
| | 3 | 5 | 7 | 9 | |
| Zsys mínima | 63,2 | 23,99 | 4,67 | 16,86 | 71.97 |
| Zsys nominal | 58,38 | 14,39 | 14,07 | 17,05 | 68.1 |
| Zsys máxima | 64,48 | 22,04 | 3,75 | 12,37 | 76.03 |

4.4 Agregación de cargas con frecuencia fundamental 60 Hz

En la actualidad se emplean dos valores de frecuencia en los sistemas de energía eléctrica, por ejemplo, el continente Europeo emplea 50 Hz como la frecuencia fundamental para sus equipos eléctricos y estudios, en cambio, Norteamérica y varios países latinoamericanos emplean la frecuencia fundamental de 60 Hz. Hasta el momento, este trabajo de grado se ha centrado en el análisis de la distorsión armónica de cargas basadas en fuentes conmutadas a 50 Hz debido a la disponibilidad de información para el modelo probabilista de diferentes cargas del tipo SMPS, sin embargo, la presente sección plantea una base para posteriores estudios del impacto que tiene la agregación sobre un punto de acople común con la frecuencia fundamental a 60 Hz.

Para el desarrollo de esta sección, fue necesario la modificación de los parámetros del modelo circuital equivalente descritos en la sección 2.1.1 y las impedancia de red mostradas en la sección 2.2. Se usan las ecuaciones presentadas en (Malagón-Carvajal et al., 2021) para determinar los valores de los parámetros resistencia R de entrada, una inductancia L, una capacitancia C del *dc-link* y una resistencia equivalente Re, dichos valores se muestran en el Anexo 5. Para el

modelado de los parámetros, R_{sys} , L_{sys} de la red a 60 Hz, estos se seleccionan a partir de la norma IEC 60725 con el valor parametrizado para la red Mexicana, esto considerando la similitud de las costumbres del diario vivir entre México y Colombia.

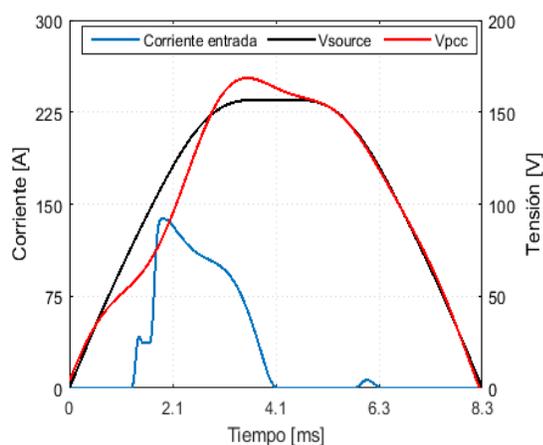
4.4.1. Agregación de cargas fuente de alimentación flat-top

En la Figura 29 se observa gráficamente el impacto de la agregación de 200 cargas y la respuesta en corriente y el contenido armónico de la corriente a frecuencia fundamental de 60 Hz, asimismo, se observa en la Figura 30 la distorsión armónica de las cargas agregadas en un punto de acople común.

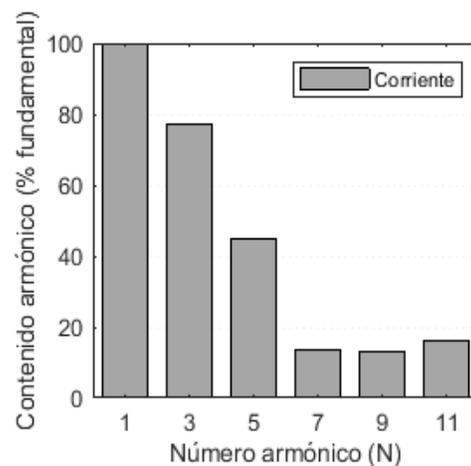
Figura 29

Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz

(a) *Forma de onda de la corriente y tensiones*



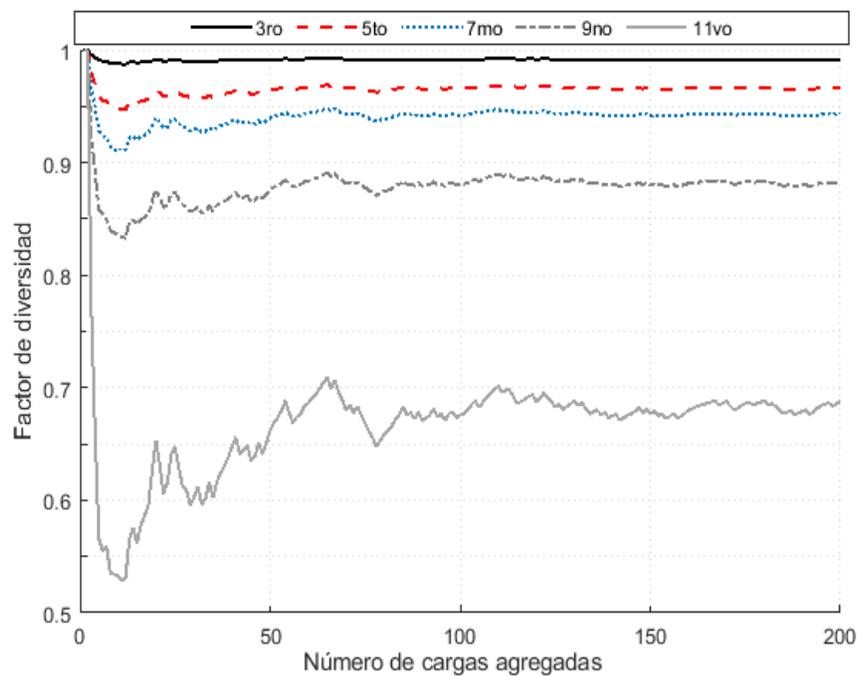
(b) *Contenido armónico*



Asimismo, en la Figura 30 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas mixtas con frecuencia fundamental de 60 Hz agregadas en un punto de acople común con impedancia de red Mexicana y señal de alimentación flat-top a 60 Hz, cada valor determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

Figura 30

Factor de diversidad de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz



4.4.2 Agregación de cargas fuente de alimentación señal E3T

Con el propósito de dar cumplimiento al 3er objetivo planteado en la sección 1.2, se realiza la agregación de 200 cargas mixtas con señal de alimentación normalmente encontrada en el

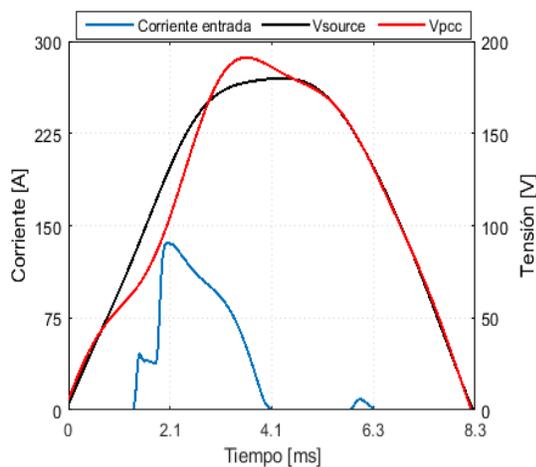
edificio de la escuela E3T hallada a partir de mediciones realizadas en anteriores proyectos de grado. Para realizar una comparación directa, se utilizan los mismos parámetros del modelo circuital equivalente para las cargas mostradas en la sección 4.4.1.

La Figura 31 muestra gráficamente el impacto de agregar el número total de cargas sobre la red de Baja Tensión, en ella se puede observar respuesta en corriente y el contenido armónico de la corriente a frecuencia fundamental de 60 Hz con fuente de alimentación típica del edificio E3T.

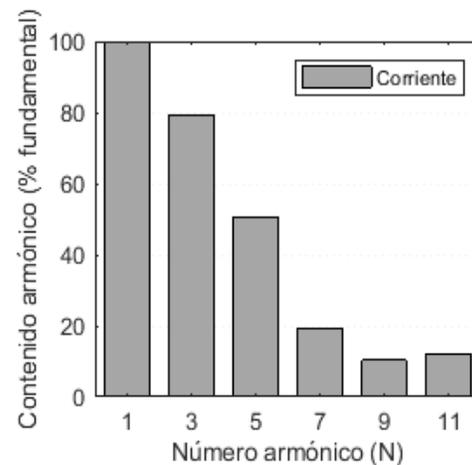
Figura 31

Impacto de la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz (Onda típica E3T).

(a) *Forma de onda de la corriente y tensiones*



(b) *Contenido armónico*

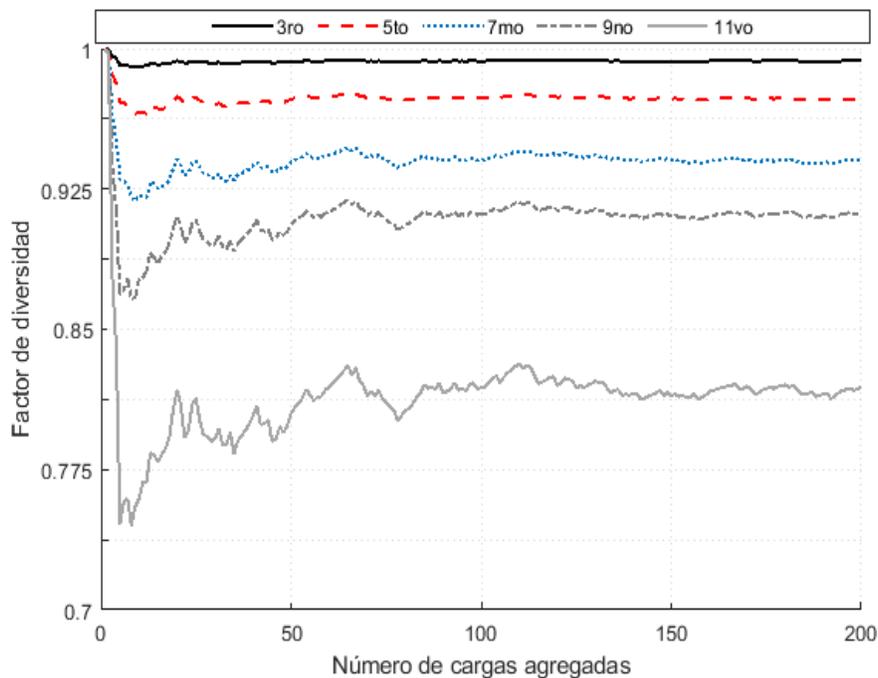


Asimismo, en la Figura 32 se puede observar gráficamente el factor de diversidad armónica para diferentes números de cargas mixtas agregadas en un punto de acople común con frecuencia fundamental de 60 Hz agregadas en un punto de acople común con impedancia de red Mexicana y señal de alimentación normalmente encontrada en el edificio E3T a 60 Hz, cada valor

determinado en el factor de diversidad fue hallado mediante la ecuación 12 presentada en la sección 2.5.

Figura 32

Factor de diversidad de cargas agregadas basadas en fuentes conmutadas a 60 Hz (Onda típica E3T)



4.4.3 Análisis de resultados

En la Figura 29, se muestran las gráficas para la tensión de alimentación, V_{source} , la tensión en el punto de acople común, V_{pcc} y la respuesta en corriente de entrada al PCC. Gráficamente se observa un incremento de 7,46% del valor pico de la tensión V_{pcc} , con respecto a la tensión de alimentación, asimismo, se puede observar que, al modificar los parámetros de las

cargas no lineales agregadas y los valores de la impedancia de red mediante la propuesta artículo (Malagón, 2021) y la norma IEC 60725, la forma de onda de la corriente presenta mayor distorsión armónica respecto a las mostradas en la sección 4.3.

De la Figura 31, se muestra las gráficas para la tensión de alimentación, V_{source} , con la forma de onda típica del edificio E3T, la tensión en el punto de acople común y la respuesta en corriente al agregar 200 cargas mixtas, ella se puede observar gráficamente un aumento en el valor pico del PCC de aproximadamente 6,26% con respecto el valor pico de la forma onda típica del edificio E3T, asimismo, en la Figura 31 (b), se estudia el contenido armónico producido por la respuesta en corriente, en ella se observa que, el 9^{no} produce el menor valor de distorsión armónica con un porcentaje del 10,27% con respecto al fundamental y el 3^{ro} produce el mayor de la distorsión armónica con un porcentaje del 79,15% con respecto al fundamental, obteniendo una diferencia del 68,88% entre el orden armónica mayor generador de distorsión y el menor generador.

De la Figura 30 y Figura 32 se puede observar que, durante la agregación de las primeras 25 cargas el factor de distorsión armónica varía significativamente con respecto a la conexión de un mayor número de cargas, aproximadamente el factor de diversidad armónica se estabiliza al agregar 100 cargas en un punto de acople común.

De la Tabla 12 se puede observar que, el valor de la distorsión armónica para el escenario de carga donde se realiza la conexión de distintas cargas a 60 Hz, disminuye con respecto el número del armónico estudiado, el 3^{er} armónico posee con un promedio de 0,992 en su distorsión armónico y el último armónico presentado en la Tabla 10 (15^{avo}) posee un promedio de 0,606.

También se puede observar que la variación entre la agregación de 50, 100, 150 y 200 cargas no es significativa y trata de mantener un valor asintótico de 0,992 en el 3^{er} armónico, 0,967 en el 5^o, 0,944 en el 7^o, 0,883 en el 9^o, 0,688 en el 11^o, 0,723 en el 13^o y 0,626 en el 15^o.

Tabla 12

Factores de diversidad armónica para cargas agregadas a 60 Hz

| Orden armónico | Factor de diversidad armónica (DF) | | | |
|----------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Cargas agregadas | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 3 | 0,992 | 0,992 | 0,992 | 0,992 |
| 5 | 0,964 | 0,966 | 0,966 | 0,967 |
| 7 | 0,940 | 0,942 | 0,942 | 0,944 |
| 9 | 0,876 | 0,881 | 0,880 | 0,883 |
| 11 | 0,662 | 0,676 | 0,677 | 0,688 |
| 13 | 0,694 | 0,708 | 0,711 | 0,723 |
| 15 | 0,587 | 0,603 | 0,608 | 0,626 |

De la Tabla 13 se puede observar que, el valor del factor de diversidad para distintos números de cargas mixtas agregadas con fuente de alimentación del edificio E3T, no varía significativamente al ir agregando diferentes cantidades de cargas en el punto de acople común, observándose así que el factor de diversidad mantiene un valor asintótico del factor de diversidad para cada orden armónico estudiado a partir de la agregación de 50 cargas basadas en fuentes conmutadas, sin embargo, para realizar un análisis más detallado se realiza un comparación del

momento en el cual se agrega la totalidad de las cargas en estudio, es decir las 200 cargas, evidenciándose que la menor cancelación se produce en el 3^{er} armónico y la mayor se produce en el 15^{avo} con una diferencia porcentual de 36,91%.

Tabla 13

Factores de diversidad armónica para cargas agregadas a 60 Hz (Onda E3T)

| Orden armónico | Factor de diversidad armónica (DF) | | | |
|-------------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Cargas agregadas | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 3 | 0,993 | 0,993 | 0,993 | 0,994 |
| 5 | 0,973 | 0,973 | 0,973 | 0,974 |
| 7 | 0,939 | 0,941 | 0,940 | 0,941 |
| 9 | 0,906 | 0,912 | 0,910 | 0,913 |
| 11 | 0,805 | 0,819 | 0,814 | 0,819 |
| 13 | 0,648 | 0,665 | 0,664 | 0,675 |
| 15 | 0,712 | 0,712 | 0,717 | 0,726 |

La Tabla 14 muestra el contenido armónico y el índice de distorsión armónica total al realizar la conexión del conjunto de cargas basadas en fuentes conmutadas con frecuencia fundamental de 60 Hz sobre un mismo punto de acople común, en esta se puede observar que, el escenario de carga con fuente de alimentación *flat-top* presenta mejores resultados en la calidad de energía con respecto a la fuente de alimentación normalmente encontrada en el edificio E3T,

reduciendo los valores para el 3^{ro}, 5^{to}, 7^{mo} con porcentajes de 2,32%, 10,95%, 27,96%, respectivamente.

De igual forma, a través de la Tabla 14, se puede observar que, la fuente de alimentación para obtener el menor índice de distorsión total de corriente (THDi) es la *flat-top*, obteniendo un resultado de 95,04%, y realizando una comparación directa con el escenario de carga con alimentación normalmente encontrada en el edificio E3T disminuye un 4,66%. Con base en esto, el escenario para obtener mejores resultados en la calidad de la energía eléctrica se presenta en el escenario de carga con fuente de alimentación *flat-top*.

Tabla 14

Contenido armónico respecto al fundamental, distorsión armónica total para la agregación de cargas a 60 Hz

| Escenario | Contenido armónico | | | | THDi (%) |
|-----------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | (% respecto al fundamental) | | | | |
| | 3 | 5 | 7 | 9 | |
| <i>Flat-top</i> | 77,31 | 44,96 | 13,81 | 13,29 | 95,04 |
| E3T | 79,15 | 50,49 | 19,17 | 10,27 | 99,69 |

5. Conclusiones

El presente trabajo de grado contribuye a las investigaciones realizadas por distintos autores para evaluar el impacto de las fuentes conmutadas del sector residencial sobre las redes de

distribución en Baja Tensión, partiendo de la elección aleatoria de los parámetros para el modelado de las cargas individuales a través de distribuciones de probabilidad, para así configurar distintos escenarios de carga variando la señal de alimentación y la impedancia equivalente de la red, para por medio de simulaciones obtener las formas de onda, distorsión armónica de la corriente y factor de diversidad para cargas agregadas con alimentación tipo fuente conmutada (SMPS).

A lo largo de este trabajo de grado se realizó el análisis del comportamiento para tres tipos de cargas basadas en fuentes conmutadas y conectadas al mismo punto de acople común, realizando diferentes escenarios de cargas en donde se varían los parámetros del modelo circuital equivalente, la distorsión armónica de las señales de alimentación y la impedancia equivalente del sistema. Con base en lo anterior se lograron los siguientes aportes:

Con base en los escenarios mostrados en el presente trabajo de grado, las fuentes conmutadas producen distorsiones en el rango de 81,25 a 312,78% a la red de Baja Tensión, esto puede ser observado en las figuras de la sección 4.1 donde se ve el comportamiento de las señales de las corrientes individuales en las cargas SMPS y CFL ante distintas distorsiones en la tensión de alimentación. Se puede observar mediante las gráficas de barras que las cargas que inducen la mayor distorsión armónica en las redes de Baja Tensión son las SMPS no-PFC, asimismo, se puede observar que las cargas que inducen menor distorsión armónica son las cargas SMPS p-PFC con señal de alimentación *flat-top*.

Al realizar la agregación de cargas basadas en fuentes conmutadas de iguales características, se aumenta los niveles de distorsión armónica en el escenario de carga con fuente de alimentación *pointed-top* en un rango de 11,23% a 45,56% en comparación al escenario de carga con fuente de alimentación *flat-top*. Con base en la Figura 22 se puede concluir que, al realizar la conexión de cargas mixtas el factor de diversidad disminuye en un intervalo de 39,4% y 91,2% en el 5^{to}, 7^{mo} armónico con respecto a las agregaciones de cargas con iguales características, siendo el 3^{er} armónico que presenta el valor mayor del factor de diversidad en los escenarios de agregación de cargas del mismo tipo.

Dados los resultados obtenidos para las gráficas del factor de diversidad armónica para distintos escenarios de carga: agregación de cargas individuales, de cargas mixtas y de cargas con impedancia de red se puede observar que, al realizar la conexión de un bajo número de cargas (aproximadamente 50 cargas) el valor del factor de diversidad armónica varía constante mientras se realiza la agregación, hasta aproximadamente en la carga 150 agregada en adelante el factor de diversidad armónica crea un valor asintótico para cada armónico en estudio.

Los resultados obtenidos para el escenario 120V 60 Hz no demuestran el comportamiento real de la forma de onda de la corriente, distorsión armónica y el factor de diversidad dado que no es el principal interés del presente trabajo de grado, debido a que actualmente no se encuentra información exacta en la totalidad de los parámetros de los modelos para las cargas SMPS y lo que pretender es presentar un inicio para las investigaciones del impacto en la distorsión armónica de las fuentes conmutadas en los países latinoamericanos.

Los resultados obtenidos para los escenarios de cargas con impedancia de red equivalente realiza un análisis de la incidencia que tiene los valores de la resistencia, R_{sys} , e inductancia, L_{sys} , sobre el factor de diversidad armónica de cada carga individual mostradas en los Anexos A.4 y A.5, es decir, no muestra el impacto que tiene la impedancia de red sobre el conjunto total de los 200 cargas conectadas al mismo punto de acople común, sin embargo, a partir de las análisis realizados en este proyecto de grado se pretende seguir con la investigación del impacto de la red de distribución en el factor de diversidad armónica ante diferentes cantidades de cargas agregadas y diferentes tiempos de conexión.

6. Anexos

ANEXO A

El modelo circuital equivalente para las cargas basadas en fuentes conmutadas, en especial las cargas tipo SMPS no-PFC, SMPS p-PFC y CFL poseen cuatro parámetros, una resistencia R de entrada, una inductancia L o filtro de entrada (que representan la suma total de las impedancias en serie del circuito rectificador), una capacitancia C del *dc-link* y una resistencia equivalente Re, que al ser implementados en la modelo permiten obtener la respuesta en corriente para las cargas estudiadas en el presente trabajo de grado.

A.1. Parámetros para las cargas tipo SMPS no-PFC

Los siguientes valores representan los parámetros utilizados para el modelo circuital equivalente para las cargas tipo SMPS no-PFC, estos valores han sido determinados mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en la sección 2.1.1

| Carga No. | Tipo | Parámetros | | | |
|-----------|-------------|----------------|--------------|----------------|---------|
| | | Cdc [μ F] | L [μ H] | R [Ω] | Pdc [W] |
| 1 | SMPS no-PFC | 81,3 | 27,9 | 1,7 | 29,9 |
| 2 | SMPS no-PFC | 83,9 | 14,2 | 1,7 | 9,3 |
| 3 | SMPS no-PFC | 98,1 | 21,2 | 1,9 | 17,2 |
| 4 | SMPS no-PFC | 77,2 | 29,8 | 1,9 | 11,5 |
| 5 | SMPS no-PFC | 81,1 | 11,5 | 1,8 | 31,7 |
| 6 | SMPS no-PFC | 81,3 | 18,0 | 2,0 | 28,3 |
| 7 | SMPS no-PFC | 77,2 | 13,2 | 1,7 | 28,1 |
| 8 | SMPS no-PFC | 90,8 | 23,7 | 1,7 | 21,0 |
| 9 | SMPS no-PFC | 84,1 | 22,0 | 1,9 | 16,7 |
| 10 | SMPS no-PFC | 78,8 | 18,5 | 1,8 | 18,1 |
| 11 | SMPS no-PFC | 84,6 | 18,5 | 1,9 | 23,4 |
| 12 | SMPS no-PFC | 71,3 | 15,8 | 1,6 | 21,9 |
| 13 | SMPS no-PFC | 86,5 | 28,7 | 2,0 | 24,1 |
| 14 | SMPS no-PFC | 81,8 | 25,2 | 1,9 | 31,1 |
| 15 | SMPS no-PFC | 87,9 | 23,6 | 1,6 | 24,3 |
| 16 | SMPS no-PFC | 79,3 | 26,5 | 1,6 | 18,5 |
| 17 | SMPS no-PFC | 76,7 | 27,9 | 1,9 | 25,2 |
| 18 | SMPS no-PFC | 85,3 | 29,1 | 1,7 | 26,0 |
| 19 | SMPS no-PFC | 86,5 | 26,2 | 1,6 | 28,1 |

| | | | | | |
|----|-------------|-------|------|-----|------|
| 20 | SMPS no-PFC | 77,1 | 16,5 | 1,8 | 25,9 |
| 21 | SMPS no-PFC | 82,2 | 13,6 | 1,8 | 22,4 |
| 22 | SMPS no-PFC | 87,8 | 13,3 | 2,0 | 44,0 |
| 23 | SMPS no-PFC | 92,1 | 18,8 | 1,8 | 19,4 |
| 24 | SMPS no-PFC | 88,2 | 11,3 | 1,7 | 32,1 |
| 25 | SMPS no-PFC | 86,0 | 22,8 | 1,9 | 21,8 |
| 26 | SMPS no-PFC | 80,7 | 16,4 | 1,9 | 34,5 |
| 27 | SMPS no-PFC | 88,0 | 20,1 | 1,9 | 27,9 |
| 28 | SMPS no-PFC | 103,2 | 11,2 | 1,8 | 40,3 |
| 29 | SMPS no-PFC | 87,0 | 29,9 | 1,7 | 19,9 |
| 30 | SMPS no-PFC | 86,6 | 17,7 | 1,8 | 16,5 |
| 31 | SMPS no-PFC | 73,7 | 13,7 | 1,8 | 30,2 |
| 32 | SMPS no-PFC | 81,8 | 24,7 | 1,9 | 26,3 |
| 33 | SMPS no-PFC | 82,0 | 15,3 | 2,0 | 30,4 |
| 34 | SMPS no-PFC | 79,8 | 11,8 | 1,7 | 29,6 |
| 35 | SMPS no-PFC | 79,2 | 24,5 | 1,6 | 21,6 |
| 36 | SMPS no-PFC | 85,6 | 22,6 | 1,7 | 4,5 |
| 37 | SMPS no-PFC | 86,2 | 24,9 | 1,9 | 32,3 |
| 38 | SMPS no-PFC | 82,2 | 21,5 | 1,8 | 25,8 |
| 39 | SMPS no-PFC | 78,9 | 19,0 | 1,7 | 21,2 |
| 40 | SMPS no-PFC | 88,2 | 10,6 | 2,0 | 26,0 |
| 41 | SMPS no-PFC | 75,5 | 29,8 | 1,9 | 11,7 |
| 42 | SMPS no-PFC | 94,4 | 23,7 | 1,6 | 33,8 |
| 43 | SMPS no-PFC | 84,4 | 28,0 | 2,0 | 26,1 |
| 44 | SMPS no-PFC | 72,9 | 13,6 | 1,7 | 18,9 |
| 45 | SMPS no-PFC | 77,3 | 28,8 | 1,8 | 19,3 |
| 46 | SMPS no-PFC | 82,0 | 28,9 | 2,0 | 28,9 |
| 47 | SMPS no-PFC | 89,3 | 16,7 | 1,9 | 28,4 |
| 48 | SMPS no-PFC | 81,9 | 23,6 | 1,7 | 25,5 |
| 49 | SMPS no-PFC | 82,5 | 25,0 | 1,8 | 28,1 |
| 50 | SMPS no-PFC | 84,7 | 20,2 | 1,8 | 18,8 |
| 51 | SMPS no-PFC | 88,0 | 17,1 | 2,0 | 36,3 |
| 52 | SMPS no-PFC | 80,6 | 19,1 | 2,0 | 23,0 |
| 53 | SMPS no-PFC | 78,6 | 16,2 | 1,6 | 27,8 |
| 54 | SMPS no-PFC | 92,5 | 10,2 | 1,9 | 33,0 |
| 55 | SMPS no-PFC | 88,3 | 10,9 | 1,9 | 23,7 |
| 56 | SMPS no-PFC | 85,5 | 14,5 | 1,9 | 17,0 |
| 57 | SMPS no-PFC | 88,0 | 22,5 | 1,8 | 17,3 |
| 58 | SMPS no-PFC | 74,5 | 25,3 | 1,9 | 38,1 |
| 59 | SMPS no-PFC | 75,0 | 12,0 | 1,7 | 24,7 |
| 60 | SMPS no-PFC | 80,1 | 12,0 | 2,0 | 11,1 |
| 61 | SMPS no-PFC | 84,7 | 16,2 | 1,9 | 14,9 |
| 62 | SMPS no-PFC | 82,7 | 20,2 | 1,7 | 31,6 |
| 63 | SMPS no-PFC | 84,8 | 17,8 | 1,6 | 22,6 |
| 64 | SMPS no-PFC | 93,7 | 19,7 | 1,9 | 35,5 |
| 65 | SMPS no-PFC | 77,8 | 28,6 | 1,8 | 37,0 |
| 66 | SMPS no-PFC | 87,6 | 16,9 | 1,8 | 31,0 |
| 67 | SMPS no-PFC | 79,0 | 22,9 | 1,9 | 34,1 |
| 68 | SMPS no-PFC | 81,2 | 26,7 | 1,9 | 17,8 |
| 69 | SMPS no-PFC | 84,4 | 21,0 | 2,0 | 22,5 |
| 70 | SMPS no-PFC | 86,1 | 25,1 | 1,7 | 23,9 |
| 71 | SMPS no-PFC | 83,5 | 29,5 | 1,9 | 22,6 |
| 72 | SMPS no-PFC | 91,2 | 29,1 | 1,9 | 8,8 |
| 73 | SMPS no-PFC | 81,1 | 15,6 | 1,9 | 14,8 |
| 74 | SMPS no-PFC | 87,0 | 21,8 | 1,9 | 28,2 |
| 75 | SMPS no-PFC | 78,7 | 19,0 | 1,7 | 19,5 |

| | | | | | |
|-----|-------------|-------|------|-----|------|
| 76 | SMPS no-PFC | 85,4 | 15,6 | 1,9 | 30,2 |
| 77 | SMPS no-PFC | 77,8 | 12,8 | 1,9 | 26,7 |
| 78 | SMPS no-PFC | 80,1 | 20,1 | 1,9 | 24,6 |
| 79 | SMPS no-PFC | 100,0 | 19,0 | 1,7 | 46,5 |
| 80 | SMPS no-PFC | 77,2 | 13,8 | 2,0 | 33,2 |
| 81 | SMPS no-PFC | 85,4 | 17,2 | 1,9 | 27,0 |
| 82 | SMPS no-PFC | 91,8 | 11,7 | 1,6 | 28,3 |
| 83 | SMPS no-PFC | 79,9 | 12,4 | 1,8 | 17,8 |
| 84 | SMPS no-PFC | 81,3 | 13,0 | 1,7 | 21,6 |
| 85 | SMPS no-PFC | 78,3 | 11,9 | 2,0 | 39,5 |
| 86 | SMPS no-PFC | 81,5 | 16,9 | 1,6 | 32,5 |
| 87 | SMPS no-PFC | 89,5 | 23,7 | 1,8 | 30,1 |
| 88 | SMPS no-PFC | 75,4 | 10,9 | 1,7 | 21,4 |
| 89 | SMPS no-PFC | 88,9 | 27,6 | 1,9 | 26,3 |
| 90 | SMPS no-PFC | 71,6 | 26,0 | 2,0 | 20,3 |
| 91 | SMPS no-PFC | 84,8 | 24,3 | 2,0 | 30,6 |
| 92 | SMPS no-PFC | 82,9 | 21,2 | 1,8 | 18,7 |
| 93 | SMPS no-PFC | 91,5 | 22,9 | 1,8 | 18,2 |
| 94 | SMPS no-PFC | 77,6 | 17,3 | 1,8 | 34,6 |
| 95 | SMPS no-PFC | 86,9 | 12,7 | 1,9 | 17,3 |
| 96 | SMPS no-PFC | 84,7 | 28,8 | 1,7 | 35,7 |
| 97 | SMPS no-PFC | 80,3 | 27,9 | 1,9 | 27,6 |
| 98 | SMPS no-PFC | 92,6 | 21,0 | 2,0 | 32,0 |
| 99 | SMPS no-PFC | 84,7 | 18,9 | 1,6 | 27,9 |
| 100 | SMPS no-PFC | 83,8 | 28,7 | 1,7 | 26,8 |
| 101 | SMPS no-PFC | 98,8 | 21,9 | 1,7 | 37,7 |
| 102 | SMPS no-PFC | 98,8 | 14,1 | 1,9 | 31,4 |
| 103 | SMPS no-PFC | 76,2 | 23,3 | 1,8 | 36,9 |
| 104 | SMPS no-PFC | 91,6 | 25,1 | 1,8 | 22,4 |
| 105 | SMPS no-PFC | 87,3 | 27,3 | 2,0 | 20,8 |
| 106 | SMPS no-PFC | 81,9 | 25,7 | 1,7 | 35,7 |
| 107 | SMPS no-PFC | 95,4 | 22,0 | 1,8 | 19,9 |
| 108 | SMPS no-PFC | 92,6 | 14,1 | 1,8 | 42,5 |
| 109 | SMPS no-PFC | 88,1 | 15,7 | 2,0 | 28,5 |
| 110 | SMPS no-PFC | 86,5 | 18,2 | 1,6 | 21,8 |
| 111 | SMPS no-PFC | 86,5 | 27,9 | 1,7 | 39,3 |
| 112 | SMPS no-PFC | 81,9 | 23,9 | 1,8 | 34,6 |
| 113 | SMPS no-PFC | 86,5 | 16,5 | 1,8 | 23,1 |
| 114 | SMPS no-PFC | 87,0 | 24,4 | 2,0 | 15,4 |
| 115 | SMPS no-PFC | 86,0 | 18,8 | 1,8 | 23,2 |
| 116 | SMPS no-PFC | 78,7 | 16,9 | 1,7 | 22,1 |
| 117 | SMPS no-PFC | 84,2 | 17,9 | 1,8 | 23,8 |
| 118 | SMPS no-PFC | 83,8 | 29,0 | 1,9 | 30,0 |
| 119 | SMPS no-PFC | 82,0 | 12,7 | 1,9 | 10,8 |
| 120 | SMPS no-PFC | 70,5 | 16,5 | 1,7 | 20,0 |
| 121 | SMPS no-PFC | 79,6 | 11,9 | 1,8 | 20,0 |
| 122 | SMPS no-PFC | 87,0 | 29,5 | 2,0 | 27,4 |
| 123 | SMPS no-PFC | 83,9 | 18,6 | 1,7 | 24,6 |
| 124 | SMPS no-PFC | 73,8 | 26,5 | 1,8 | 20,4 |
| 125 | SMPS no-PFC | 86,3 | 27,7 | 1,9 | 31,2 |
| 126 | SMPS no-PFC | 71,0 | 28,0 | 1,7 | 28,2 |
| 127 | SMPS no-PFC | 83,6 | 26,4 | 1,8 | 26,2 |
| 128 | SMPS no-PFC | 79,3 | 18,6 | 1,8 | 32,2 |
| 129 | SMPS no-PFC | 85,9 | 24,4 | 1,9 | 22,1 |
| 130 | SMPS no-PFC | 83,9 | 13,1 | 1,8 | 26,4 |
| 131 | SMPS no-PFC | 88,7 | 26,7 | 1,8 | 29,5 |

| | | | | | |
|-----|-------------|------|------|-----|------|
| 132 | SMPS no-PFC | 81,2 | 17,7 | 1,8 | 26,9 |
| 133 | SMPS no-PFC | 87,8 | 23,9 | 1,8 | 39,0 |
| 134 | SMPS no-PFC | 88,8 | 12,2 | 1,9 | 20,7 |
| 135 | SMPS no-PFC | 84,9 | 11,0 | 1,8 | 12,9 |
| 136 | SMPS no-PFC | 89,3 | 27,3 | 1,6 | 7,2 |
| 137 | SMPS no-PFC | 86,1 | 14,4 | 1,8 | 28,2 |
| 138 | SMPS no-PFC | 79,1 | 22,0 | 1,9 | 11,9 |
| 139 | SMPS no-PFC | 70,1 | 10,4 | 1,7 | 24,5 |
| 140 | SMPS no-PFC | 90,0 | 20,4 | 1,8 | 30,5 |
| 141 | SMPS no-PFC | 75,8 | 12,2 | 2,0 | 25,3 |
| 142 | SMPS no-PFC | 81,5 | 10,1 | 1,8 | 37,2 |
| 143 | SMPS no-PFC | 86,6 | 29,7 | 2,0 | 25,1 |
| 144 | SMPS no-PFC | 78,3 | 20,2 | 1,6 | 26,8 |
| 145 | SMPS no-PFC | 89,4 | 23,2 | 1,6 | 25,6 |
| 146 | SMPS no-PFC | 79,3 | 21,8 | 2,0 | 23,1 |
| 147 | SMPS no-PFC | 94,0 | 19,0 | 1,9 | 27,2 |
| 148 | SMPS no-PFC | 84,1 | 23,6 | 1,8 | 20,2 |
| 149 | SMPS no-PFC | 79,1 | 27,3 | 1,8 | 22,5 |
| 150 | SMPS no-PFC | 77,9 | 16,0 | 1,8 | 22,4 |
| 151 | SMPS no-PFC | 86,2 | 17,8 | 1,8 | 21,4 |
| 152 | SMPS no-PFC | 76,2 | 11,7 | 1,7 | 20,9 |
| 153 | SMPS no-PFC | 77,5 | 18,5 | 1,7 | 15,4 |
| 154 | SMPS no-PFC | 83,5 | 14,9 | 1,9 | 33,9 |
| 155 | SMPS no-PFC | 74,7 | 10,1 | 1,8 | 22,2 |
| 156 | SMPS no-PFC | 76,2 | 15,4 | 1,6 | 15,5 |
| 157 | SMPS no-PFC | 72,1 | 28,0 | 1,8 | 42,8 |
| 158 | SMPS no-PFC | 80,8 | 17,5 | 1,8 | 25,6 |
| 159 | SMPS no-PFC | 78,5 | 18,7 | 1,6 | 15,2 |
| 160 | SMPS no-PFC | 73,0 | 18,6 | 2,0 | 28,2 |
| 161 | SMPS no-PFC | 90,2 | 23,6 | 1,6 | 29,0 |
| 162 | SMPS no-PFC | 84,0 | 14,4 | 1,8 | 30,8 |
| 163 | SMPS no-PFC | 78,8 | 27,8 | 1,7 | 38,5 |
| 164 | SMPS no-PFC | 81,4 | 22,2 | 1,7 | 33,6 |
| 165 | SMPS no-PFC | 89,0 | 16,7 | 1,8 | 30,0 |
| 166 | SMPS no-PFC | 83,1 | 10,7 | 2,0 | 26,1 |
| 167 | SMPS no-PFC | 90,8 | 16,7 | 1,7 | 17,5 |
| 168 | SMPS no-PFC | 82,0 | 21,0 | 1,8 | 17,9 |
| 169 | SMPS no-PFC | 84,0 | 14,8 | 1,7 | 18,3 |
| 170 | SMPS no-PFC | 82,0 | 28,7 | 2,0 | 34,2 |
| 171 | SMPS no-PFC | 88,0 | 17,2 | 1,7 | 20,0 |
| 172 | SMPS no-PFC | 86,6 | 20,9 | 1,9 | 22,3 |
| 173 | SMPS no-PFC | 78,4 | 25,2 | 1,8 | 28,4 |
| 174 | SMPS no-PFC | 84,6 | 22,9 | 1,9 | 12,1 |
| 175 | SMPS no-PFC | 83,7 | 11,8 | 1,7 | 14,4 |
| 176 | SMPS no-PFC | 81,8 | 18,6 | 1,9 | 27,1 |
| 177 | SMPS no-PFC | 78,6 | 20,7 | 1,6 | 17,4 |
| 178 | SMPS no-PFC | 90,1 | 17,9 | 2,0 | 34,5 |
| 179 | SMPS no-PFC | 88,9 | 19,0 | 1,6 | 27,1 |
| 180 | SMPS no-PFC | 86,5 | 23,0 | 1,9 | 30,4 |
| 181 | SMPS no-PFC | 81,8 | 12,3 | 1,8 | 15,7 |
| 182 | SMPS no-PFC | 90,3 | 21,9 | 1,7 | 37,1 |
| 183 | SMPS no-PFC | 78,6 | 16,8 | 1,7 | 28,5 |
| 184 | SMPS no-PFC | 82,4 | 13,0 | 1,7 | 22,0 |
| 185 | SMPS no-PFC | 82,3 | 18,7 | 1,6 | 16,2 |
| 186 | SMPS no-PFC | 86,6 | 21,5 | 1,6 | 30,4 |
| 187 | SMPS no-PFC | 78,8 | 21,4 | 1,8 | 20,1 |

| | | | | | |
|-----|-------------|------|------|-----|------|
| 188 | SMPS no-PFC | 83,5 | 14,4 | 1,9 | 31,7 |
| 189 | SMPS no-PFC | 89,7 | 20,1 | 1,9 | 15,7 |
| 190 | SMPS no-PFC | 86,3 | 29,2 | 1,7 | 29,2 |
| 191 | SMPS no-PFC | 85,0 | 11,8 | 1,7 | 15,4 |
| 192 | SMPS no-PFC | 85,6 | 24,0 | 2,0 | 27,5 |
| 193 | SMPS no-PFC | 80,6 | 26,2 | 1,8 | 23,0 |
| 194 | SMPS no-PFC | 94,1 | 16,4 | 1,6 | 25,4 |
| 195 | SMPS no-PFC | 72,7 | 21,1 | 1,9 | 25,6 |
| 196 | SMPS no-PFC | 88,0 | 25,8 | 2,0 | 21,2 |
| 197 | SMPS no-PFC | 83,3 | 12,2 | 1,9 | 16,7 |
| 198 | SMPS no-PFC | 81,2 | 29,5 | 1,8 | 31,4 |
| 199 | SMPS no-PFC | 81,1 | 27,0 | 1,7 | 46,9 |
| 200 | SMPS no-PFC | 84,5 | 11,8 | 1,7 | 32,8 |

A.2. Parámetros para las cargas tipo SMPS p-PFC

Los siguientes valores representan los parámetros utilizados para el modelo circuital equivalente para las cargas tipo SMPS p-PFC, estos valores han sido determinados mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en el capítulo 2.1.1.

| Carga No. | Tipo | Parámetros | | | |
|-----------|------------|----------------|--------|----------------|---------|
| | | Cdc [μ F] | L [mH] | R [Ω] | Pdc [W] |
| 1 | SMPS p-PFC | 428,2 | 23,0 | 1,9 | 151,5 |
| 2 | SMPS p-PFC | 476,5 | 23,1 | 1,9 | 116,9 |
| 3 | SMPS p-PFC | 403,1 | 25,5 | 1,9 | 141,2 |
| 4 | SMPS p-PFC | 406,9 | 24,3 | 1,7 | 159,1 |
| 5 | SMPS p-PFC | 365,4 | 25,3 | 1,8 | 98,9 |
| 6 | SMPS p-PFC | 430,3 | 23,8 | 1,8 | 131,5 |
| 7 | SMPS p-PFC | 409,5 | 24,1 | 1,7 | 127,5 |
| 8 | SMPS p-PFC | 365,6 | 24,3 | 1,8 | 88,5 |
| 9 | SMPS p-PFC | 435,2 | 25,7 | 1,7 | 164,0 |
| 10 | SMPS p-PFC | 412,6 | 25,8 | 1,9 | 121,8 |
| 11 | SMPS p-PFC | 432,1 | 26,4 | 1,7 | 85,4 |
| 12 | SMPS p-PFC | 366,1 | 24,9 | 1,9 | 143,0 |
| 13 | SMPS p-PFC | 406,9 | 21,2 | 1,7 | 150,1 |
| 14 | SMPS p-PFC | 409,0 | 25,5 | 1,8 | 68,2 |
| 15 | SMPS p-PFC | 396,7 | 25,7 | 1,9 | 73,7 |
| 16 | SMPS p-PFC | 355,7 | 25,3 | 1,7 | 162,7 |
| 17 | SMPS p-PFC | 419,6 | 25,4 | 1,7 | 78,1 |
| 18 | SMPS p-PFC | 390,3 | 23,5 | 1,7 | 114,2 |
| 19 | SMPS p-PFC | 392,0 | 24,4 | 1,7 | 108,6 |
| 20 | SMPS p-PFC | 403,0 | 25,8 | 2,0 | 127,4 |
| 21 | SMPS p-PFC | 376,2 | 22,5 | 1,7 | 229,2 |
| 22 | SMPS p-PFC | 444,1 | 23,8 | 1,8 | 79,1 |
| 23 | SMPS p-PFC | 432,2 | 22,9 | 2,0 | 107,0 |

| | | | | | |
|----|------------|-------|------|-----|-------|
| 24 | SMPS p-PFC | 414,7 | 26,1 | 1,7 | 108,4 |
| 25 | SMPS p-PFC | 470,2 | 25,5 | 1,8 | 79,3 |
| 26 | SMPS p-PFC | 399,6 | 25,5 | 1,7 | 177,1 |
| 27 | SMPS p-PFC | 400,5 | 24,4 | 1,9 | 129,1 |
| 28 | SMPS p-PFC | 450,3 | 23,7 | 1,8 | 90,7 |
| 29 | SMPS p-PFC | 412,3 | 23,9 | 1,8 | 132,2 |
| 30 | SMPS p-PFC | 452,2 | 24,7 | 1,8 | 36,9 |
| 31 | SMPS p-PFC | 395,4 | 24,5 | 1,7 | 146,0 |
| 32 | SMPS p-PFC | 459,4 | 24,9 | 2,0 | 112,2 |
| 33 | SMPS p-PFC | 439,8 | 26,0 | 1,9 | 156,1 |
| 34 | SMPS p-PFC | 375,8 | 24,9 | 1,9 | 94,6 |
| 35 | SMPS p-PFC | 397,7 | 24,0 | 1,9 | 75,5 |
| 36 | SMPS p-PFC | 423,0 | 25,0 | 2,0 | 137,3 |
| 37 | SMPS p-PFC | 390,9 | 25,2 | 2,0 | 146,2 |
| 38 | SMPS p-PFC | 390,5 | 25,5 | 1,9 | 78,8 |
| 39 | SMPS p-PFC | 418,1 | 25,1 | 1,7 | 115,0 |
| 40 | SMPS p-PFC | 411,7 | 24,6 | 1,7 | 155,7 |
| 41 | SMPS p-PFC | 465,6 | 28,0 | 1,7 | 186,0 |
| 42 | SMPS p-PFC | 421,7 | 24,1 | 1,8 | 158,3 |
| 43 | SMPS p-PFC | 397,7 | 26,1 | 1,7 | 142,4 |
| 44 | SMPS p-PFC | 442,0 | 24,5 | 1,9 | 104,4 |
| 45 | SMPS p-PFC | 439,2 | 26,5 | 1,7 | 156,6 |
| 46 | SMPS p-PFC | 425,0 | 25,5 | 1,8 | 266,1 |
| 47 | SMPS p-PFC | 413,9 | 27,4 | 1,7 | 149,4 |
| 48 | SMPS p-PFC | 399,0 | 24,2 | 2,0 | 147,0 |
| 49 | SMPS p-PFC | 425,2 | 23,7 | 1,8 | 54,3 |
| 50 | SMPS p-PFC | 405,2 | 25,8 | 1,7 | 112,3 |
| 51 | SMPS p-PFC | 466,2 | 25,2 | 1,9 | 113,7 |
| 52 | SMPS p-PFC | 449,1 | 25,8 | 1,7 | 98,2 |
| 53 | SMPS p-PFC | 405,9 | 25,7 | 1,7 | 93,9 |
| 54 | SMPS p-PFC | 387,4 | 24,5 | 1,9 | 139,5 |
| 55 | SMPS p-PFC | 407,2 | 21,8 | 1,9 | 143,6 |
| 56 | SMPS p-PFC | 468,6 | 26,1 | 1,9 | 115,4 |
| 57 | SMPS p-PFC | 422,0 | 25,1 | 1,8 | 91,8 |
| 58 | SMPS p-PFC | 407,2 | 24,4 | 1,8 | 158,5 |
| 59 | SMPS p-PFC | 487,6 | 25,2 | 1,6 | 67,3 |
| 60 | SMPS p-PFC | 453,2 | 22,9 | 2,0 | 202,7 |
| 61 | SMPS p-PFC | 386,8 | 26,4 | 1,9 | 130,9 |
| 62 | SMPS p-PFC | 480,9 | 25,2 | 2,0 | 48,7 |
| 63 | SMPS p-PFC | 406,8 | 24,0 | 1,7 | 79,9 |
| 64 | SMPS p-PFC | 419,2 | 24,1 | 2,0 | 113,8 |
| 65 | SMPS p-PFC | 449,5 | 25,6 | 2,0 | 166,0 |
| 66 | SMPS p-PFC | 441,2 | 25,5 | 1,8 | 113,0 |
| 67 | SMPS p-PFC | 392,0 | 25,1 | 1,9 | 117,5 |
| 68 | SMPS p-PFC | 425,1 | 25,5 | 1,9 | 132,8 |
| 69 | SMPS p-PFC | 424,8 | 24,0 | 1,8 | 156,5 |
| 70 | SMPS p-PFC | 456,2 | 27,4 | 1,8 | 118,0 |
| 71 | SMPS p-PFC | 410,2 | 24,0 | 1,7 | 86,9 |
| 72 | SMPS p-PFC | 426,8 | 25,7 | 1,9 | 159,2 |
| 73 | SMPS p-PFC | 454,3 | 24,8 | 1,6 | 139,1 |
| 74 | SMPS p-PFC | 437,0 | 23,7 | 1,7 | 156,6 |
| 75 | SMPS p-PFC | 413,8 | 23,8 | 1,9 | 59,6 |
| 76 | SMPS p-PFC | 438,2 | 27,0 | 1,9 | 63,7 |
| 77 | SMPS p-PFC | 379,8 | 24,9 | 1,7 | 100,4 |

| | | | | | |
|-----|------------|-------|------|-----|-------|
| 78 | SMPS p-PFC | 453,6 | 22,8 | 1,7 | 133,2 |
| 79 | SMPS p-PFC | 450,2 | 23,4 | 1,7 | 119,0 |
| 80 | SMPS p-PFC | 371,5 | 26,0 | 1,8 | 133,7 |
| 81 | SMPS p-PFC | 363,9 | 24,6 | 1,8 | 197,5 |
| 82 | SMPS p-PFC | 442,5 | 26,6 | 1,8 | 83,2 |
| 83 | SMPS p-PFC | 407,3 | 26,9 | 2,0 | 154,2 |
| 84 | SMPS p-PFC | 430,7 | 25,9 | 1,8 | 91,9 |
| 85 | SMPS p-PFC | 433,0 | 26,4 | 1,9 | 108,0 |
| 86 | SMPS p-PFC | 434,7 | 23,9 | 1,9 | 131,2 |
| 87 | SMPS p-PFC | 461,5 | 24,6 | 1,8 | 143,3 |
| 88 | SMPS p-PFC | 409,3 | 24,8 | 1,9 | 124,3 |
| 89 | SMPS p-PFC | 429,8 | 24,6 | 2,0 | 179,5 |
| 90 | SMPS p-PFC | 429,6 | 22,5 | 2,0 | 107,0 |
| 91 | SMPS p-PFC | 423,6 | 23,4 | 1,7 | 149,7 |
| 92 | SMPS p-PFC | 434,1 | 25,5 | 1,8 | 90,2 |
| 93 | SMPS p-PFC | 403,1 | 24,1 | 1,8 | 138,3 |
| 94 | SMPS p-PFC | 482,8 | 25,8 | 1,7 | 83,6 |
| 95 | SMPS p-PFC | 454,3 | 25,3 | 1,7 | 100,3 |
| 96 | SMPS p-PFC | 431,2 | 24,9 | 1,8 | 243,0 |
| 97 | SMPS p-PFC | 399,5 | 28,4 | 1,8 | 79,1 |
| 98 | SMPS p-PFC | 432,4 | 26,3 | 1,7 | 138,1 |
| 99 | SMPS p-PFC | 435,1 | 25,3 | 1,8 | 183,9 |
| 100 | SMPS p-PFC | 353,7 | 25,5 | 1,7 | 98,8 |
| 101 | SMPS p-PFC | 408,8 | 23,9 | 1,7 | 108,8 |
| 102 | SMPS p-PFC | 396,8 | 24,5 | 1,7 | 87,3 |
| 103 | SMPS p-PFC | 454,3 | 27,3 | 1,7 | 110,0 |
| 104 | SMPS p-PFC | 376,6 | 26,2 | 1,8 | 167,2 |
| 105 | SMPS p-PFC | 421,5 | 25,8 | 1,9 | 66,6 |
| 106 | SMPS p-PFC | 400,8 | 24,4 | 1,6 | 163,0 |
| 107 | SMPS p-PFC | 437,0 | 25,2 | 1,9 | 38,7 |
| 108 | SMPS p-PFC | 464,0 | 24,3 | 1,9 | 133,9 |
| 109 | SMPS p-PFC | 438,7 | 25,9 | 1,9 | 120,5 |
| 110 | SMPS p-PFC | 415,9 | 24,0 | 1,8 | 181,9 |
| 111 | SMPS p-PFC | 417,2 | 23,9 | 1,9 | 82,0 |
| 112 | SMPS p-PFC | 414,5 | 26,5 | 1,8 | 149,2 |
| 113 | SMPS p-PFC | 432,0 | 23,8 | 1,7 | 133,1 |
| 114 | SMPS p-PFC | 407,3 | 26,7 | 2,0 | 101,8 |
| 115 | SMPS p-PFC | 441,4 | 25,4 | 2,0 | 189,9 |
| 116 | SMPS p-PFC | 446,6 | 26,1 | 1,8 | 132,8 |
| 117 | SMPS p-PFC | 405,5 | 25,0 | 1,9 | 110,4 |
| 118 | SMPS p-PFC | 466,3 | 28,4 | 1,9 | 113,2 |
| 119 | SMPS p-PFC | 432,7 | 28,4 | 1,9 | 137,1 |
| 120 | SMPS p-PFC | 395,0 | 23,4 | 1,9 | 114,0 |
| 121 | SMPS p-PFC | 424,6 | 26,8 | 2,0 | 123,9 |
| 122 | SMPS p-PFC | 442,7 | 25,8 | 1,8 | 201,6 |
| 123 | SMPS p-PFC | 421,4 | 24,4 | 1,8 | 153,7 |
| 124 | SMPS p-PFC | 454,2 | 25,1 | 2,0 | 131,5 |
| 125 | SMPS p-PFC | 399,4 | 24,9 | 2,0 | 106,1 |
| 126 | SMPS p-PFC | 477,8 | 25,9 | 1,9 | 84,8 |
| 127 | SMPS p-PFC | 429,1 | 23,6 | 1,9 | 116,0 |
| 128 | SMPS p-PFC | 405,7 | 23,7 | 1,9 | 168,6 |
| 129 | SMPS p-PFC | 466,7 | 25,0 | 1,8 | 145,3 |
| 130 | SMPS p-PFC | 450,5 | 25,5 | 1,8 | 105,7 |
| 131 | SMPS p-PFC | 410,6 | 27,1 | 1,9 | 147,7 |

| | | | | | |
|-----|------------|-------|------|-----|-------|
| 132 | SMPS p-PFC | 383,4 | 24,9 | 1,9 | 115,2 |
| 133 | SMPS p-PFC | 410,9 | 24,6 | 1,7 | 93,6 |
| 134 | SMPS p-PFC | 406,8 | 25,2 | 1,8 | 116,4 |
| 135 | SMPS p-PFC | 412,8 | 25,6 | 1,8 | 176,3 |
| 136 | SMPS p-PFC | 434,3 | 25,7 | 1,8 | 115,2 |
| 137 | SMPS p-PFC | 367,4 | 22,9 | 1,7 | 115,5 |
| 138 | SMPS p-PFC | 399,8 | 25,1 | 1,6 | 98,6 |
| 139 | SMPS p-PFC | 399,5 | 26,0 | 1,9 | 222,5 |
| 140 | SMPS p-PFC | 425,4 | 25,2 | 2,0 | 127,3 |
| 141 | SMPS p-PFC | 401,0 | 24,9 | 1,8 | 54,8 |
| 142 | SMPS p-PFC | 409,8 | 24,3 | 1,9 | 144,8 |
| 143 | SMPS p-PFC | 444,6 | 26,0 | 1,9 | 34,6 |
| 144 | SMPS p-PFC | 401,3 | 25,5 | 2,0 | 125,2 |
| 145 | SMPS p-PFC | 429,2 | 25,2 | 1,9 | 94,7 |
| 146 | SMPS p-PFC | 412,0 | 26,1 | 1,8 | 141,5 |
| 147 | SMPS p-PFC | 432,2 | 24,5 | 1,9 | 127,4 |
| 148 | SMPS p-PFC | 423,0 | 25,2 | 1,7 | 162,1 |
| 149 | SMPS p-PFC | 413,9 | 25,7 | 1,9 | 108,2 |
| 150 | SMPS p-PFC | 412,7 | 25,3 | 1,8 | 155,2 |
| 151 | SMPS p-PFC | 408,9 | 27,2 | 1,9 | 162,3 |
| 152 | SMPS p-PFC | 440,0 | 24,3 | 1,7 | 134,7 |
| 153 | SMPS p-PFC | 414,2 | 23,1 | 1,6 | 166,0 |
| 154 | SMPS p-PFC | 395,9 | 22,2 | 1,9 | 143,0 |
| 155 | SMPS p-PFC | 417,0 | 25,5 | 1,7 | 93,2 |
| 156 | SMPS p-PFC | 440,9 | 23,0 | 1,8 | 28,0 |
| 157 | SMPS p-PFC | 409,1 | 24,9 | 1,6 | 170,8 |
| 158 | SMPS p-PFC | 422,0 | 25,9 | 1,8 | 69,3 |
| 159 | SMPS p-PFC | 456,7 | 25,0 | 1,7 | 110,5 |
| 160 | SMPS p-PFC | 421,2 | 26,9 | 1,6 | 146,8 |
| 161 | SMPS p-PFC | 472,9 | 25,0 | 2,0 | 87,4 |
| 162 | SMPS p-PFC | 368,6 | 25,3 | 1,8 | 166,8 |
| 163 | SMPS p-PFC | 390,5 | 25,1 | 1,9 | 94,1 |
| 164 | SMPS p-PFC | 438,5 | 24,7 | 1,8 | 200,1 |
| 165 | SMPS p-PFC | 434,0 | 25,3 | 1,8 | 128,5 |
| 166 | SMPS p-PFC | 421,8 | 24,2 | 1,9 | 93,1 |
| 167 | SMPS p-PFC | 427,0 | 24,6 | 1,9 | 84,5 |
| 168 | SMPS p-PFC | 410,4 | 24,6 | 1,7 | 144,0 |
| 169 | SMPS p-PFC | 413,4 | 24,4 | 1,8 | 72,1 |
| 170 | SMPS p-PFC | 393,1 | 24,4 | 1,7 | 81,6 |
| 171 | SMPS p-PFC | 397,3 | 23,5 | 1,8 | 124,2 |
| 172 | SMPS p-PFC | 426,5 | 26,4 | 1,7 | 61,6 |
| 173 | SMPS p-PFC | 406,1 | 24,6 | 1,6 | 72,0 |
| 174 | SMPS p-PFC | 401,0 | 23,5 | 1,7 | 42,4 |
| 175 | SMPS p-PFC | 432,7 | 27,8 | 2,0 | 105,3 |
| 176 | SMPS p-PFC | 415,7 | 25,1 | 1,8 | 88,2 |
| 177 | SMPS p-PFC | 363,6 | 23,5 | 1,8 | 48,9 |
| 178 | SMPS p-PFC | 483,1 | 25,5 | 1,8 | 172,7 |
| 179 | SMPS p-PFC | 370,1 | 25,6 | 1,9 | 128,3 |
| 180 | SMPS p-PFC | 421,4 | 25,9 | 1,7 | 91,0 |
| 181 | SMPS p-PFC | 394,8 | 27,1 | 1,9 | 109,5 |
| 182 | SMPS p-PFC | 402,9 | 26,3 | 1,8 | 163,7 |
| 183 | SMPS p-PFC | 424,5 | 25,8 | 1,7 | 121,8 |
| 184 | SMPS p-PFC | 455,3 | 25,2 | 1,6 | 176,6 |
| 185 | SMPS p-PFC | 403,2 | 23,8 | 1,8 | 113,9 |

| | | | | | |
|-----|------------|-------|------|-----|-------|
| 186 | SMPS p-PFC | 411,4 | 23,9 | 1,8 | 128,3 |
| 187 | SMPS p-PFC | 400,2 | 24,0 | 1,7 | 113,7 |
| 188 | SMPS p-PFC | 516,3 | 26,4 | 2,0 | 156,5 |
| 189 | SMPS p-PFC | 381,4 | 24,2 | 1,8 | 146,4 |
| 190 | SMPS p-PFC | 430,4 | 24,6 | 1,8 | 88,0 |
| 191 | SMPS p-PFC | 417,1 | 25,5 | 1,9 | 132,2 |
| 192 | SMPS p-PFC | 435,3 | 23,0 | 1,9 | 125,8 |
| 193 | SMPS p-PFC | 405,1 | 23,3 | 1,7 | 112,2 |
| 194 | SMPS p-PFC | 440,0 | 25,3 | 1,8 | 89,1 |
| 195 | SMPS p-PFC | 357,0 | 23,8 | 1,8 | 171,9 |
| 196 | SMPS p-PFC | 465,3 | 26,5 | 1,8 | 163,1 |
| 197 | SMPS p-PFC | 377,6 | 25,3 | 1,8 | 145,9 |
| 198 | SMPS p-PFC | 435,8 | 25,8 | 1,9 | 112,5 |
| 199 | SMPS p-PFC | 427,6 | 23,5 | 1,7 | 173,1 |
| 200 | SMPS p-PFC | 398,6 | 26,9 | 1,8 | 89,4 |

A.3. Parámetros para las cargas tipo CFL

Los siguientes valores representan los parámetros utilizados para el modelo circuital equivalente para las cargas tipo CFL, estos valores han sido determinados mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en la sección 2.1.1.

| Carga No, | Tipo | Parámetros | | | |
|-----------|------|----------------|--------------|----------------|---------|
| | | Cdc [μ F] | L [μ H] | R [Ω] | Pdc [W] |
| 1 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 2 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 3 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 4 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 5 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 6 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,1 |
| 7 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,8 | 10,2 |
| 8 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 9 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 10 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 11 | CFL | 2,9 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 12 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 13 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,8 | 10,2 |
| 14 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,7 | 9,9 |
| 15 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 16 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 17 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 18 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 19 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,1 | 10,6 |
| 20 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 21 | CFL | 2,2 | 600,1 | 10,3 | 10,8 |

| | | | | | |
|----|-----|-----|-------|------|------|
| 22 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 23 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,6 | 9,9 |
| 24 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,0 | 10,5 |
| 25 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 26 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 27 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,6 | 9,9 |
| 28 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 29 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 30 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,1 | 10,6 |
| 31 | CFL | 3,0 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 32 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 33 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 34 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 35 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,4 | 11,1 |
| 36 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,3 | 10,9 |
| 37 | CFL | 2,3 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 38 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 39 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 40 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 41 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 42 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 43 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 44 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 45 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,1 | 10,6 |
| 46 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 47 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 48 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 49 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 50 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 51 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 52 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 53 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 54 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 55 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 56 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 57 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 58 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 59 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 60 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 61 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,4 | 9,6 |
| 62 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 63 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,2 | 10,8 |
| 64 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,1 | 10,5 |
| 65 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 66 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,4 | 9,6 |
| 67 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 68 | CFL | 2,4 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 69 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 70 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,3 | 10,9 |
| 71 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 72 | CFL | 2,4 | 600,1 | 9,8 | 10,2 |
| 73 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,1 | 10,5 |
| 74 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,2 | 10,6 |
| 75 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|------|------|
| 76 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 77 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 78 | CFL | 2,3 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 79 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 10,9 |
| 80 | CFL | 2,9 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 81 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 82 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,3 | 10,9 |
| 83 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,3 | 10,9 |
| 84 | CFL | 2,9 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 85 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,2 | 10,6 |
| 86 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 87 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,1 | 10,5 |
| 88 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 89 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 90 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 91 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 92 | CFL | 3,0 | 600,1 | 10,4 | 11,1 |
| 93 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 94 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 95 | CFL | 2,9 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 96 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 97 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,1 | 10,6 |
| 98 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,7 | 9,9 |
| 99 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,2 | 10,8 |
| 100 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,1 | 10,5 |
| 101 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 102 | CFL | 2,2 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 103 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 104 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,6 | 9,9 |
| 105 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 106 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 107 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 108 | CFL | 2,4 | 600,1 | 9,6 | 9,9 |
| 109 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 110 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 111 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 112 | CFL | 3,1 | 600,1 | 10,3 | 10,8 |
| 113 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 114 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 115 | CFL | 3,0 | 600,1 | 10,3 | 10,8 |
| 116 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 117 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 118 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 119 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 120 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 121 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 122 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 123 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 124 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 125 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,1 | 10,5 |
| 126 | CFL | 3,1 | 600,1 | 10,4 | 10,9 |
| 127 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,2 | 10,6 |
| 128 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 129 | CFL | 3,0 | 600,1 | 9,4 | 9,6 |

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|------|------|
| 130 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 131 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 132 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 133 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 134 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 135 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 136 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,0 | 10,5 |
| 137 | CFL | 3,0 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 138 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,7 | 9,9 |
| 139 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 140 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 141 | CFL | 3,1 | 600,1 | 9,7 | 9,9 |
| 142 | CFL | 2,3 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 143 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 144 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 145 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 146 | CFL | 3,0 | 600,1 | 10,1 | 10,6 |
| 147 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 148 | CFL | 2,4 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 149 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 150 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 151 | CFL | 3,0 | 600,1 | 10,3 | 10,9 |
| 152 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 153 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 154 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,7 | 10,0 |
| 155 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 156 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 157 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 158 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,4 | 11,1 |
| 159 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 160 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,4 | 10,9 |
| 161 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,8 | 10,2 |
| 162 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,0 | 10,5 |
| 163 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 164 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 165 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 166 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 11,1 |
| 167 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 168 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 169 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 170 | CFL | 2,4 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 171 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,9 | 10,3 |
| 172 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 173 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,1 | 10,6 |
| 174 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 175 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,0 | 10,3 |
| 176 | CFL | 2,4 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 177 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 178 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,2 | 10,6 |
| 179 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |
| 180 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 181 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,5 | 11,1 |
| 182 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,6 | 9,8 |
| 183 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,2 | 10,7 |

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|------|------|
| 184 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 185 | CFL | 2,5 | 600,1 | 10,3 | 10,8 |
| 186 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 187 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,0 | 10,4 |
| 188 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,3 | 10,8 |
| 189 | CFL | 2,5 | 600,1 | 9,5 | 9,7 |
| 190 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,9 | 10,2 |
| 191 | CFL | 2,9 | 600,1 | 9,6 | 9,9 |
| 192 | CFL | 2,6 | 600,1 | 10,4 | 11,1 |
| 193 | CFL | 2,9 | 600,1 | 10,6 | 11,2 |
| 194 | CFL | 2,8 | 600,1 | 9,5 | 9,6 |
| 195 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,6 | 11,2 |
| 196 | CFL | 2,7 | 600,1 | 10,4 | 11,0 |
| 197 | CFL | 2,4 | 600,1 | 10,5 | 11,2 |
| 198 | CFL | 2,8 | 600,1 | 10,1 | 10,5 |
| 199 | CFL | 2,6 | 600,1 | 9,8 | 10,1 |
| 200 | CFL | 2,7 | 600,1 | 9,8 | 10,2 |

A.4. Parámetros para la agregación de cargas mixtas

Los siguientes valores representan los parámetros utilizados para el modelo circuital equivalente para las agregación de distintas cargas conectadas al mismo punto de acople común, estos valores han sido determinados mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en la sección 2.1.1.

| Carga No. | Tipo | Parámetros | | | |
|-----------|-------------|----------------|--------|----------------|---------|
| | | Cdc [μ F] | L [mH] | R [Ω] | Pdc [W] |
| 1 | SMPS no-PFC | 90,7 | 0,015 | 1,6 | 50,3 |
| 2 | SMPS p-PFC | 398,6 | 25,086 | 1,8 | 42,2 |
| 3 | SMPS no-PFC | 86,5 | 0,013 | 1,8 | 21,1 |
| 4 | SMPS p-PFC | 419,3 | 25,319 | 1,6 | 186,2 |
| 5 | SMPS no-PFC | 86,0 | 0,022 | 2,0 | 29,7 |
| 6 | SMPS no-PFC | 82,5 | 0,018 | 1,6 | 20,6 |
| 7 | SMPS no-PFC | 91,6 | 0,026 | 1,8 | 28,0 |
| 8 | SMPS no-PFC | 73,0 | 0,023 | 1,6 | 22,6 |
| 9 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,6 | 9,8 |
| 10 | SMPS p-PFC | 447,6 | 24,768 | 1,9 | 108,2 |
| 11 | CFL | 2,8 | 0,600 | 9,9 | 10,2 |
| 12 | SMPS no-PFC | 78,5 | 0,014 | 1,8 | 21,9 |
| 13 | SMPS p-PFC | 398,6 | 24,717 | 1,7 | 103,0 |
| 14 | SMPS no-PFC | 87,7 | 0,026 | 1,7 | 22,3 |
| 15 | SMPS no-PFC | 90,8 | 0,013 | 1,9 | 18,4 |
| 16 | SMPS no-PFC | 85,8 | 0,020 | 1,9 | 21,1 |

| | | | | | |
|----|-------------|-------|--------|------|-------|
| 17 | CFL | 2,8 | 0,600 | 9,7 | 9,9 |
| 18 | CFL | 2,6 | 0,600 | 10,4 | 11,0 |
| 19 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,0 | 10,4 |
| 20 | CFL | 2,3 | 0,600 | 10,0 | 10,4 |
| 21 | SMPS p-PFC | 427,2 | 23,237 | 1,7 | 19,5 |
| 22 | CFL | 2,9 | 0,600 | 9,9 | 10,2 |
| 23 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,6 | 9,8 |
| 24 | SMPS p-PFC | 419,9 | 25,151 | 1,9 | 94,5 |
| 25 | SMPS no-PFC | 80,3 | 0,024 | 1,6 | 24,2 |
| 26 | SMPS no-PFC | 85,6 | 0,026 | 1,7 | 25,4 |
| 27 | SMPS p-PFC | 395,1 | 25,081 | 1,9 | 133,6 |
| 28 | SMPS p-PFC | 434,9 | 25,207 | 1,7 | 166,9 |
| 29 | SMPS p-PFC | 433,1 | 25,216 | 1,7 | 101,6 |
| 30 | CFL | 2,8 | 0,600 | 10,5 | 11,1 |
| 31 | SMPS p-PFC | 415,3 | 26,810 | 1,8 | 29,4 |
| 32 | SMPS no-PFC | 90,6 | 0,019 | 2,0 | 35,8 |
| 33 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,8 | 10,2 |
| 34 | SMPS p-PFC | 409,9 | 24,787 | 1,9 | 206,5 |
| 35 | SMPS p-PFC | 397,1 | 25,294 | 2,0 | 143,5 |
| 36 | SMPS no-PFC | 82,7 | 0,023 | 1,6 | 31,1 |
| 37 | CFL | 2,8 | 0,600 | 10,2 | 10,7 |
| 38 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,9 | 10,3 |
| 39 | CFL | 2,9 | 0,600 | 9,6 | 9,9 |
| 40 | SMPS no-PFC | 70,8 | 0,013 | 1,6 | 28,6 |
| 41 | SMPS no-PFC | 83,1 | 0,012 | 1,9 | 18,2 |
| 42 | SMPS no-PFC | 79,1 | 0,026 | 1,7 | 20,9 |
| 43 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,1 | 10,5 |
| 44 | CFL | 3,1 | 0,600 | 10,4 | 11,1 |
| 45 | SMPS no-PFC | 86,5 | 0,011 | 1,7 | 15,3 |
| 46 | SMPS no-PFC | 77,3 | 0,015 | 2,0 | 46,4 |
| 47 | SMPS p-PFC | 444,9 | 24,651 | 1,8 | 93,7 |
| 48 | SMPS p-PFC | 375,7 | 23,663 | 1,7 | 131,7 |
| 49 | CFL | 3,1 | 0,600 | 9,4 | 9,6 |
| 50 | SMPS p-PFC | 398,8 | 25,129 | 1,7 | 106,1 |
| 51 | SMPS p-PFC | 438,4 | 24,809 | 1,7 | 57,0 |
| 52 | SMPS p-PFC | 444,5 | 25,489 | 1,7 | 70,9 |
| 53 | SMPS p-PFC | 404,5 | 22,995 | 1,8 | 88,6 |
| 54 | SMPS no-PFC | 84,0 | 0,017 | 1,7 | 35,6 |
| 55 | SMPS p-PFC | 395,4 | 24,906 | 1,8 | 162,2 |
| 56 | SMPS no-PFC | 88,4 | 0,011 | 1,8 | 18,5 |
| 57 | SMPS p-PFC | 414,1 | 24,007 | 1,7 | 146,6 |
| 58 | SMPS p-PFC | 408,3 | 24,563 | 1,9 | 120,4 |
| 59 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,4 | 9,6 |
| 60 | SMPS no-PFC | 85,2 | 0,029 | 1,8 | 13,7 |
| 61 | SMPS p-PFC | 418,1 | 26,349 | 1,7 | 154,8 |
| 62 | CFL | 2,8 | 0,600 | 9,4 | 9,6 |
| 63 | SMPS no-PFC | 78,2 | 0,011 | 1,9 | 27,3 |
| 64 | SMPS p-PFC | 401,8 | 25,641 | 1,8 | 170,7 |
| 65 | SMPS no-PFC | 80,4 | 0,023 | 1,7 | 37,6 |
| 66 | CFL | 2,9 | 0,600 | 10,4 | 11,0 |
| 67 | SMPS no-PFC | 87,4 | 0,025 | 2,0 | 32,4 |
| 68 | SMPS no-PFC | 86,8 | 0,023 | 1,7 | 35,2 |
| 69 | SMPS p-PFC | 458,9 | 25,051 | 1,7 | 137,3 |
| 70 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,7 | 10,0 |

| | | | | | |
|-----|-------------|-------|--------|------|-------|
| 71 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,5 | 9,7 |
| 72 | SMPS p-PFC | 369,7 | 26,734 | 1,9 | 117,7 |
| 73 | SMPS no-PFC | 90,4 | 0,015 | 1,7 | 14,9 |
| 74 | SMPS no-PFC | 85,1 | 0,025 | 1,8 | 24,5 |
| 75 | SMPS p-PFC | 369,1 | 25,131 | 1,7 | 107,9 |
| 76 | CFL | 2,3 | 0,600 | 9,9 | 10,3 |
| 77 | SMPS p-PFC | 396,9 | 27,077 | 1,8 | 83,0 |
| 78 | SMPS no-PFC | 75,7 | 0,010 | 1,9 | 18,1 |
| 79 | CFL | 2,8 | 0,600 | 9,7 | 10,0 |
| 80 | CFL | 2,6 | 0,600 | 10,1 | 10,6 |
| 81 | CFL | 3,1 | 0,600 | 9,8 | 10,1 |
| 82 | SMPS p-PFC | 445,9 | 24,709 | 1,9 | 116,6 |
| 83 | SMPS no-PFC | 70,9 | 0,013 | 1,8 | 23,2 |
| 84 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,5 | 11,1 |
| 85 | SMPS no-PFC | 90,7 | 0,016 | 1,6 | 27,3 |
| 86 | SMPS p-PFC | 413,5 | 23,478 | 1,7 | 96,1 |
| 87 | SMPS no-PFC | 80,3 | 0,027 | 1,6 | 27,2 |
| 88 | CFL | 2,5 | 0,600 | 10,1 | 10,6 |
| 89 | CFL | 2,5 | 0,600 | 9,4 | 9,6 |
| 90 | SMPS no-PFC | 88,4 | 0,021 | 1,7 | 25,7 |
| 91 | SMPS p-PFC | 399,2 | 24,616 | 1,8 | 179,0 |
| 92 | SMPS no-PFC | 82,4 | 0,022 | 1,9 | 16,3 |
| 93 | CFL | 2,2 | 0,600 | 9,8 | 10,1 |
| 94 | CFL | 2,8 | 0,600 | 10,2 | 10,7 |
| 95 | SMPS p-PFC | 406,4 | 27,896 | 2,0 | 114,3 |
| 96 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,8 | 10,2 |
| 97 | CFL | 2,5 | 0,600 | 10,5 | 11,1 |
| 98 | SMPS no-PFC | 79,0 | 0,019 | 1,6 | 27,6 |
| 99 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,3 | 10,9 |
| 100 | SMPS p-PFC | 435,9 | 24,904 | 1,6 | 101,1 |
| 101 | SMPS no-PFC | 96,4 | 0,020 | 1,7 | 22,4 |
| 102 | SMPS p-PFC | 466,9 | 24,179 | 2,0 | 67,6 |
| 103 | SMPS p-PFC | 389,4 | 25,582 | 1,7 | 64,1 |
| 104 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,8 | 10,2 |
| 105 | CFL | 2,8 | 0,600 | 9,9 | 10,2 |
| 106 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,3 | 10,8 |
| 107 | SMPS p-PFC | 411,7 | 24,021 | 1,9 | 150,3 |
| 108 | CFL | 2,6 | 0,600 | 10,2 | 10,7 |
| 109 | SMPS p-PFC | 407,3 | 25,772 | 1,8 | 218,1 |
| 110 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,5 | 9,6 |
| 111 | SMPS p-PFC | 424,3 | 26,262 | 1,8 | 140,6 |
| 112 | SMPS p-PFC | 403,5 | 24,416 | 1,7 | 80,6 |
| 113 | SMPS p-PFC | 437,2 | 22,785 | 1,7 | 126,1 |
| 114 | SMPS p-PFC | 390,6 | 26,574 | 1,9 | 152,3 |
| 115 | SMPS no-PFC | 79,5 | 0,019 | 1,7 | 19,6 |
| 116 | SMPS no-PFC | 94,2 | 0,018 | 1,8 | 27,3 |
| 117 | SMPS no-PFC | 77,2 | 0,022 | 1,9 | 15,7 |
| 118 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,0 | 10,5 |
| 119 | SMPS p-PFC | 401,7 | 24,836 | 1,7 | 62,4 |
| 120 | SMPS p-PFC | 422,8 | 23,267 | 1,9 | 139,7 |
| 121 | SMPS no-PFC | 85,0 | 0,025 | 1,8 | 8,6 |
| 122 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,9 | 10,2 |
| 123 | SMPS no-PFC | 84,9 | 0,017 | 1,7 | 20,7 |
| 124 | SMPS p-PFC | 430,7 | 25,454 | 2,0 | 119,2 |

| | | | | | |
|-----|-------------|-------|--------|------|-------|
| 125 | SMPS no-PFC | 85,3 | 0,021 | 1,7 | 32,0 |
| 126 | SMPS no-PFC | 80,9 | 0,022 | 1,8 | 41,3 |
| 127 | SMPS no-PFC | 91,0 | 0,026 | 1,8 | 25,5 |
| 128 | SMPS no-PFC | 82,1 | 0,028 | 1,9 | 32,7 |
| 129 | SMPS no-PFC | 76,4 | 0,023 | 2,0 | 4,9 |
| 130 | SMPS p-PFC | 475,3 | 24,195 | 1,8 | 84,7 |
| 131 | SMPS no-PFC | 80,8 | 0,015 | 1,8 | 27,0 |
| 132 | CFL | 2,6 | 0,600 | 10,2 | 10,8 |
| 133 | SMPS p-PFC | 415,8 | 23,410 | 2,0 | 136,0 |
| 134 | SMPS no-PFC | 79,6 | 0,027 | 1,8 | 26,4 |
| 135 | CFL | 2,5 | 0,600 | 10,1 | 10,6 |
| 136 | SMPS no-PFC | 79,4 | 0,024 | 1,6 | 40,0 |
| 137 | CFL | 2,9 | 0,600 | 10,0 | 10,5 |
| 138 | SMPS no-PFC | 78,7 | 0,029 | 1,7 | 21,2 |
| 139 | SMPS p-PFC | 379,9 | 22,968 | 1,8 | 96,9 |
| 140 | CFL | 3,0 | 0,600 | 10,4 | 11,1 |
| 141 | SMPS p-PFC | 446,9 | 21,939 | 1,9 | 53,3 |
| 142 | SMPS no-PFC | 78,7 | 0,015 | 1,7 | 17,6 |
| 143 | CFL | 2,6 | 0,600 | 9,8 | 10,1 |
| 144 | SMPS p-PFC | 397,9 | 24,711 | 1,9 | 65,6 |
| 145 | SMPS p-PFC | 406,9 | 23,935 | 1,8 | 156,8 |
| 146 | SMPS p-PFC | 373,8 | 24,573 | 2,0 | 135,8 |
| 147 | SMPS p-PFC | 380,6 | 25,314 | 2,0 | 130,7 |
| 148 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,4 | 9,6 |
| 149 | SMPS p-PFC | 449,5 | 25,331 | 1,9 | 57,3 |
| 150 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,2 | 10,7 |
| 151 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,5 | 9,6 |
| 152 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,5 | 9,7 |
| 153 | SMPS no-PFC | 76,4 | 0,021 | 1,8 | 19,5 |
| 154 | CFL | 2,5 | 0,600 | 9,8 | 10,1 |
| 155 | SMPS no-PFC | 78,6 | 0,015 | 1,8 | 22,5 |
| 156 | CFL | 2,8 | 0,600 | 9,6 | 9,8 |
| 157 | SMPS p-PFC | 404,3 | 25,215 | 1,9 | 112,4 |
| 158 | SMPS p-PFC | 433,9 | 24,063 | 1,9 | 71,9 |
| 159 | SMPS p-PFC | 445,4 | 25,492 | 1,9 | 107,3 |
| 160 | SMPS no-PFC | 95,1 | 0,020 | 1,8 | 22,8 |
| 161 | SMPS p-PFC | 408,1 | 25,616 | 1,7 | 182,6 |
| 162 | SMPS p-PFC | 396,3 | 26,275 | 1,8 | 196,3 |
| 163 | SMPS no-PFC | 84,2 | 0,022 | 1,8 | 26,4 |
| 164 | SMPS no-PFC | 73,5 | 0,011 | 1,6 | 22,8 |
| 165 | CFL | 2,6 | 0,600 | 10,1 | 10,6 |
| 166 | CFL | 2,7 | 0,600 | 10,0 | 10,5 |
| 167 | SMPS no-PFC | 88,3 | 0,027 | 2,0 | 27,5 |
| 168 | SMPS p-PFC | 445,8 | 24,360 | 1,8 | 146,3 |
| 169 | SMPS no-PFC | 88,5 | 0,030 | 1,6 | 19,2 |
| 170 | SMPS p-PFC | 404,0 | 23,228 | 1,9 | 82,3 |
| 171 | CFL | 2,5 | 0,600 | 9,8 | 10,1 |
| 172 | SMPS p-PFC | 394,8 | 26,470 | 1,8 | 127,7 |
| 173 | CFL | 2,4 | 0,600 | 9,9 | 10,3 |
| 174 | SMPS no-PFC | 85,6 | 0,011 | 1,6 | 21,9 |
| 175 | SMPS no-PFC | 78,6 | 0,011 | 1,7 | 29,5 |
| 176 | SMPS p-PFC | 399,5 | 24,656 | 1,7 | 118,3 |
| 177 | SMPS no-PFC | 90,9 | 0,010 | 1,8 | 40,8 |
| 178 | SMPS p-PFC | 376,0 | 25,328 | 1,7 | 67,4 |

| | | | | | |
|-----|-------------|-------|--------|------|-------|
| 179 | SMPS no-PFC | 83,0 | 0,021 | 1,6 | 19,3 |
| 180 | SMPS p-PFC | 422,3 | 22,602 | 1,7 | 82,3 |
| 181 | SMPS p-PFC | 422,6 | 26,641 | 1,7 | 170,3 |
| 182 | SMPS p-PFC | 509,5 | 26,229 | 1,7 | 122,5 |
| 183 | SMPS no-PFC | 94,0 | 0,020 | 1,6 | 40,4 |
| 184 | SMPS p-PFC | 427,3 | 25,307 | 1,8 | 200,6 |
| 185 | SMPS p-PFC | 410,8 | 24,485 | 1,8 | 118,1 |
| 186 | SMPS p-PFC | 419,5 | 27,065 | 1,8 | 90,2 |
| 187 | SMPS p-PFC | 419,2 | 23,739 | 1,7 | 73,3 |
| 188 | SMPS no-PFC | 95,5 | 0,027 | 1,6 | 25,1 |
| 189 | SMPS no-PFC | 83,3 | 0,012 | 1,8 | 34,6 |
| 190 | SMPS p-PFC | 414,3 | 23,477 | 1,9 | 147,9 |
| 191 | SMPS no-PFC | 92,5 | 0,029 | 1,7 | 25,2 |
| 192 | SMPS p-PFC | 457,3 | 23,905 | 1,9 | 88,4 |
| 193 | SMPS no-PFC | 89,6 | 0,018 | 1,8 | 25,7 |
| 194 | CFL | 2,6 | 0,600 | 10,1 | 10,6 |
| 195 | SMPS no-PFC | 79,9 | 0,015 | 1,6 | 18,9 |
| 196 | SMPS no-PFC | 80,8 | 0,026 | 1,9 | 12,7 |
| 197 | CFL | 2,9 | 0,600 | 10,0 | 10,5 |
| 198 | CFL | 2,7 | 0,600 | 9,7 | 9,9 |
| 199 | CFL | 3,1 | 0,600 | 9,8 | 10,1 |
| 200 | SMPS no-PFC | 89,9 | 0,011 | 1,8 | 34,9 |

A.4. Parámetros para la agregación de cargas mixtas (60 Hz)

Los siguientes valores representan los parámetros utilizados para el modelo circuital equivalente para las agregación de distintas cargas conectadas al mismo punto de acople común, estos valores han sido determinados mediante las distribuciones de probabilidad mostradas en la sección 2.1.1.

| Carga No. | Tipo | Parámetros | | | |
|-----------|-------------|----------------|--------------|----------------|---------|
| | | Cdc [μ F] | L [μ H] | R [Ω] | Pdc [W] |
| 1 | SMPS no-PFC | 21,3 | 30,929 | 7,5 | 30,7 |
| 2 | SMPS no-PFC | 19,1 | 34,537 | 6,8 | 27,5 |
| 3 | CFL | 7,7 | 90,268 | 3,4 | 10,5 |
| 4 | CFL | 7,3 | 95,479 | 3,2 | 10,0 |
| 5 | CFL | 8,1 | 85,103 | 3,5 | 11,2 |
| 6 | CFL | 7,1 | 97,889 | 3,2 | 9,7 |
| 7 | SMPS p-PFC | 8,2 | 83,837 | 3,5 | 11,3 |
| 8 | CFL | 7,7 | 90,060 | 3,4 | 10,6 |
| 9 | CFL | 7,4 | 93,423 | 3,3 | 10,2 |
| 10 | SMPS no-PFC | 14,2 | 46,872 | 5,3 | 20,3 |
| 11 | CFL | 7,2 | 95,942 | 3,2 | 9,9 |
| 12 | SMPS p-PFC | 10,4 | 64,816 | 4,2 | 14,7 |

| | | | | | |
|----|-------------|------|----------|-----|------|
| 13 | SMPS no-PFC | 20,0 | 32,991 | 7,1 | 28,8 |
| 14 | SMPS p-PFC | 6,9 | 100,643 | 3,1 | 9,4 |
| 15 | CFL | 7,1 | 97,651 | 3,2 | 9,7 |
| 16 | SMPS no-PFC | 13,6 | 49,236 | 5,1 | 19,3 |
| 17 | SMPS p-PFC | 4,3 | 172,086 | 2,3 | 5,5 |
| 18 | SMPS p-PFC | 8,1 | 85,253 | 3,5 | 11,2 |
| 19 | SMPS no-PFC | 20,9 | 31,459 | 7,3 | 30,2 |
| 20 | SMPS no-PFC | 20,3 | 32,420 | 7,2 | 29,3 |
| 21 | CFL | 7,5 | 92,451 | 3,3 | 10,3 |
| 22 | CFL | 7,9 | 87,861 | 3,4 | 10,8 |
| 23 | SMPS p-PFC | 11,2 | 60,034 | 4,4 | 15,8 |
| 24 | SMPS no-PFC | 23,4 | 28,059 | 8,1 | 33,9 |
| 25 | SMPS no-PFC | 7,5 | 91,687 | 3,3 | 10,4 |
| 26 | CFL | 7,6 | 91,640 | 3,3 | 10,4 |
| 27 | CFL | 7,4 | 92,995 | 3,3 | 10,2 |
| 28 | SMPS no-PFC | 0,8 | 2284,900 | 1,3 | 0,4 |
| 29 | CFL | 7,5 | 92,494 | 3,3 | 10,3 |
| 30 | SMPS p-PFC | 10,8 | 62,334 | 4,3 | 15,3 |
| 31 | SMPS no-PFC | 13,5 | 49,609 | 5,1 | 19,2 |
| 32 | CFL | 7,8 | 88,695 | 3,4 | 10,7 |
| 33 | SMPS no-PFC | 5,5 | 128,932 | 2,7 | 7,4 |
| 34 | SMPS no-PFC | 18,6 | 35,592 | 6,6 | 26,7 |
| 35 | CFL | 7,6 | 91,009 | 3,3 | 10,4 |
| 36 | SMPS no-PFC | 19,1 | 34,636 | 6,8 | 27,4 |
| 37 | SMPS no-PFC | 12,2 | 54,916 | 4,7 | 17,3 |
| 38 | SMPS no-PFC | 10,8 | 62,693 | 4,3 | 15,2 |
| 39 | SMPS no-PFC | 12,6 | 53,410 | 4,8 | 17,8 |
| 40 | SMPS no-PFC | 14,9 | 44,634 | 5,5 | 21,3 |
| 41 | SMPS no-PFC | 14,7 | 45,334 | 5,5 | 21,0 |
| 42 | CFL | 7,8 | 88,602 | 3,4 | 10,7 |
| 43 | SMPS p-PFC | 5,4 | 132,732 | 2,7 | 7,2 |
| 44 | SMPS no-PFC | 6,8 | 102,427 | 3,1 | 9,3 |
| 45 | CFL | 7,8 | 88,554 | 3,4 | 10,7 |
| 46 | SMPS p-PFC | 6,8 | 102,325 | 3,1 | 9,3 |
| 47 | SMPS no-PFC | 20,4 | 32,358 | 7,2 | 29,4 |
| 48 | CFL | 7,2 | 96,509 | 3,2 | 9,9 |
| 49 | SMPS no-PFC | 16,9 | 39,083 | 6,2 | 24,3 |
| 50 | SMPS no-PFC | 21,9 | 29,963 | 7,7 | 31,7 |
| 51 | SMPS p-PFC | 15,2 | 43,690 | 5,6 | 21,8 |
| 52 | SMPS p-PFC | 10,8 | 62,271 | 4,3 | 15,3 |
| 53 | SMPS no-PFC | 14,0 | 47,534 | 5,3 | 20,0 |
| 54 | SMPS no-PFC | 19,5 | 33,785 | 6,9 | 28,1 |
| 55 | CFL | 7,4 | 93,679 | 3,3 | 10,1 |
| 56 | CFL | 7,3 | 94,550 | 3,3 | 10,1 |
| 57 | SMPS p-PFC | 13,1 | 50,929 | 5,0 | 18,7 |
| 58 | SMPS p-PFC | 6,6 | 105,392 | 3,0 | 9,0 |
| 59 | SMPS no-PFC | 16,5 | 40,215 | 6,0 | 23,6 |
| 60 | SMPS p-PFC | 7,1 | 97,414 | 3,2 | 9,8 |
| 61 | SMPS p-PFC | 13,3 | 50,114 | 5,1 | 19,0 |
| 62 | SMPS p-PFC | 9,1 | 75,357 | 3,8 | 12,6 |
| 63 | SMPS no-PFC | 13,2 | 50,560 | 5,0 | 18,8 |
| 64 | SMPS no-PFC | 15,3 | 43,392 | 5,7 | 21,9 |
| 65 | SMPS p-PFC | 14,1 | 47,346 | 5,3 | 20,1 |
| 66 | CFL | 7,5 | 92,076 | 3,3 | 10,3 |

| | | | | | |
|-----|-------------|------|---------|------|------|
| 67 | SMPS no-PFC | 21,8 | 30,143 | 7,6 | 31,5 |
| 68 | CFL | 7,8 | 88,095 | 3,4 | 10,8 |
| 69 | CFL | 7,1 | 97,563 | 3,2 | 9,7 |
| 70 | CFL | 7,5 | 91,997 | 3,3 | 10,3 |
| 71 | SMPS no-PFC | 13,7 | 48,878 | 5,2 | 19,5 |
| 72 | CFL | 7,2 | 96,435 | 3,2 | 9,9 |
| 73 | SMPS no-PFC | 18,6 | 35,584 | 6,6 | 26,7 |
| 74 | CFL | 7,6 | 91,220 | 3,3 | 10,4 |
| 75 | CFL | 7,2 | 96,782 | 3,2 | 9,8 |
| 76 | CFL | 7,6 | 90,870 | 3,3 | 10,5 |
| 77 | CFL | 7,1 | 98,722 | 3,2 | 9,6 |
| 78 | CFL | 7,8 | 87,988 | 3,4 | 10,8 |
| 79 | SMPS no-PFC | 17,6 | 37,552 | 6,4 | 25,3 |
| 80 | SMPS no-PFC | 18,0 | 36,745 | 6,5 | 25,9 |
| 81 | SMPS p-PFC | 9,1 | 74,981 | 3,8 | 12,7 |
| 82 | SMPS no-PFC | 15,7 | 42,417 | 5,8 | 22,4 |
| 83 | SMPS no-PFC | 21,3 | 30,877 | 7,5 | 30,8 |
| 84 | SMPS p-PFC | 14,7 | 45,193 | 5,5 | 21,0 |
| 85 | SMPS no-PFC | 30,2 | 21,598 | 10,1 | 44,0 |
| 86 | CFL | 7,7 | 90,350 | 3,4 | 10,5 |
| 87 | SMPS p-PFC | 7,6 | 90,703 | 3,3 | 10,5 |
| 88 | CFL | 7,3 | 95,576 | 3,2 | 9,9 |
| 89 | SMPS no-PFC | 22,2 | 29,646 | 7,7 | 32,1 |
| 90 | CFL | 7,8 | 88,439 | 3,4 | 10,8 |
| 91 | SMPS p-PFC | 8,5 | 80,788 | 3,6 | 11,8 |
| 92 | SMPS p-PFC | 12,0 | 56,122 | 4,7 | 16,9 |
| 93 | SMPS no-PFC | 23,8 | 27,563 | 8,2 | 34,5 |
| 94 | CFL | 8,0 | 86,617 | 3,4 | 11,0 |
| 95 | SMPS p-PFC | 10,7 | 63,048 | 4,3 | 15,1 |
| 96 | CFL | 7,5 | 92,281 | 3,3 | 10,3 |
| 97 | SMPS no-PFC | 27,7 | 23,579 | 9,4 | 40,3 |
| 98 | SMPS p-PFC | 7,8 | 88,845 | 3,4 | 10,7 |
| 99 | CFL | 7,3 | 95,648 | 3,2 | 9,9 |
| 100 | SMPS p-PFC | 10,5 | 64,365 | 4,2 | 14,8 |
| 101 | SMPS p-PFC | 6,6 | 106,829 | 3,0 | 8,9 |
| 102 | SMPS no-PFC | 15,1 | 43,981 | 5,6 | 21,6 |
| 103 | SMPS no-PFC | 20,9 | 31,500 | 7,3 | 30,2 |
| 104 | SMPS p-PFC | 14,8 | 44,969 | 5,5 | 21,1 |
| 105 | CFL | 7,6 | 90,441 | 3,4 | 10,5 |
| 106 | SMPS no-PFC | 23,6 | 27,785 | 8,2 | 34,2 |
| 107 | SMPS no-PFC | 21,0 | 31,285 | 7,4 | 30,4 |
| 108 | SMPS no-PFC | 15,2 | 43,617 | 5,6 | 21,8 |
| 109 | SMPS no-PFC | 20,5 | 32,114 | 7,2 | 29,6 |
| 110 | SMPS no-PFC | 11,7 | 57,650 | 4,6 | 16,5 |
| 111 | CFL | 7,4 | 93,730 | 3,3 | 10,1 |
| 112 | SMPS p-PFC | 8,6 | 79,361 | 3,6 | 12,0 |
| 113 | SMPS p-PFC | 2,2 | 392,607 | 1,7 | 2,4 |
| 114 | CFL | 7,9 | 87,295 | 3,4 | 10,9 |
| 115 | CFL | 7,9 | 87,130 | 3,4 | 10,9 |
| 116 | SMPS p-PFC | 10,2 | 66,569 | 4,1 | 14,3 |
| 117 | SMPS p-PFC | 9,9 | 68,317 | 4,0 | 13,9 |
| 118 | SMPS no-PFC | 15,5 | 42,860 | 5,7 | 22,2 |
| 119 | SMPS p-PFC | 8,3 | 83,225 | 3,5 | 11,4 |
| 120 | CFL | 8,1 | 84,909 | 3,5 | 11,2 |

| | | | | | |
|-----|-------------|------|---------|-----|------|
| 121 | SMPS no-PFC | 18,1 | 36,529 | 6,5 | 26,0 |
| 122 | SMPS no-PFC | 24,4 | 26,842 | 8,4 | 35,4 |
| 123 | CFL | 7,1 | 98,211 | 3,2 | 9,7 |
| 124 | CFL | 7,0 | 99,034 | 3,2 | 9,6 |
| 125 | CFL | 7,9 | 87,519 | 3,4 | 10,9 |
| 126 | SMPS p-PFC | 16,3 | 40,599 | 6,0 | 23,4 |
| 127 | CFL | 7,7 | 89,668 | 3,4 | 10,6 |
| 128 | SMPS no-PFC | 15,4 | 43,058 | 5,7 | 22,1 |
| 129 | SMPS no-PFC | 13,3 | 50,351 | 5,0 | 18,9 |
| 130 | SMPS no-PFC | 17,8 | 37,101 | 6,4 | 25,6 |
| 131 | CFL | 7,4 | 93,623 | 3,3 | 10,2 |
| 132 | SMPS p-PFC | 13,1 | 51,282 | 5,0 | 18,5 |
| 133 | CFL | 7,8 | 88,966 | 3,4 | 10,7 |
| 134 | CFL | 7,9 | 87,744 | 3,4 | 10,8 |
| 135 | SMPS p-PFC | 10,9 | 61,925 | 4,3 | 15,4 |
| 136 | SMPS no-PFC | 12,6 | 53,409 | 4,8 | 17,8 |
| 137 | CFL | 7,6 | 91,058 | 3,3 | 10,4 |
| 138 | SMPS p-PFC | 10,5 | 64,411 | 4,2 | 14,8 |
| 139 | CFL | 7,7 | 90,263 | 3,4 | 10,5 |
| 140 | SMPS p-PFC | 10,5 | 64,637 | 4,2 | 14,7 |
| 141 | SMPS p-PFC | 7,4 | 93,628 | 3,3 | 10,2 |
| 142 | CFL | 8,1 | 84,783 | 3,5 | 11,2 |
| 143 | SMPS p-PFC | 13,8 | 48,540 | 5,2 | 19,6 |
| 144 | SMPS p-PFC | 15,3 | 43,556 | 5,6 | 21,8 |
| 145 | SMPS p-PFC | 8,9 | 76,382 | 3,7 | 12,4 |
| 146 | SMPS no-PFC | 13,1 | 50,946 | 5,0 | 18,7 |
| 147 | SMPS no-PFC | 19,3 | 34,160 | 6,9 | 27,8 |
| 148 | CFL | 7,8 | 88,731 | 3,4 | 10,7 |
| 149 | SMPS no-PFC | 22,8 | 28,853 | 7,9 | 33,0 |
| 150 | CFL | 7,9 | 87,689 | 3,4 | 10,8 |
| 151 | SMPS no-PFC | 16,5 | 40,184 | 6,0 | 23,7 |
| 152 | CFL | 7,8 | 88,245 | 3,4 | 10,8 |
| 153 | SMPS no-PFC | 12,0 | 56,080 | 4,7 | 17,0 |
| 154 | CFL | 7,5 | 91,788 | 3,3 | 10,4 |
| 155 | SMPS p-PFC | 6,9 | 101,682 | 3,1 | 9,4 |
| 156 | SMPS no-PFC | 21,5 | 30,580 | 7,5 | 31,1 |
| 157 | CFL | 8,0 | 85,560 | 3,5 | 11,1 |
| 158 | SMPS no-PFC | 10,2 | 66,460 | 4,1 | 14,3 |
| 159 | SMPS no-PFC | 17,2 | 38,543 | 6,2 | 24,7 |
| 160 | SMPS no-PFC | 24,5 | 26,771 | 8,4 | 35,5 |
| 161 | SMPS no-PFC | 8,0 | 85,952 | 3,5 | 11,1 |
| 162 | SMPS p-PFC | 13,1 | 50,968 | 5,0 | 18,7 |
| 163 | SMPS no-PFC | 10,6 | 63,915 | 4,2 | 14,9 |
| 164 | SMPS p-PFC | 4,9 | 147,846 | 2,5 | 6,4 |
| 165 | SMPS p-PFC | 12,1 | 55,668 | 4,7 | 17,1 |
| 166 | SMPS p-PFC | 4,1 | 181,020 | 2,3 | 5,3 |
| 167 | SMPS p-PFC | 8,8 | 77,959 | 3,7 | 12,2 |
| 168 | CFL | 7,9 | 87,150 | 3,4 | 10,9 |
| 169 | SMPS p-PFC | 13,5 | 49,630 | 5,1 | 19,2 |
| 170 | SMPS no-PFC | 15,5 | 42,799 | 5,7 | 22,2 |
| 171 | CFL | 8,0 | 85,776 | 3,5 | 11,1 |
| 172 | CFL | 7,7 | 89,774 | 3,4 | 10,6 |
| 173 | SMPS p-PFC | 11,8 | 56,869 | 4,6 | 16,7 |
| 174 | SMPS no-PFC | 20,5 | 32,123 | 7,2 | 29,6 |

| | | | | | |
|-----|-------------|------|--------|-----|------|
| 175 | SMPS p-PFC | 13,0 | 51,609 | 5,0 | 18,4 |
| 176 | SMPS p-PFC | 11,5 | 58,513 | 4,5 | 16,2 |
| 177 | CFL | 7,4 | 94,112 | 3,3 | 10,1 |
| 178 | SMPS p-PFC | 14,3 | 46,604 | 5,4 | 20,4 |
| 179 | SMPS p-PFC | 8,8 | 78,142 | 3,7 | 12,2 |
| 180 | SMPS p-PFC | 8,9 | 77,222 | 3,7 | 12,3 |
| 181 | CFL | 7,5 | 92,727 | 3,3 | 10,3 |
| 182 | SMPS p-PFC | 11,0 | 61,374 | 4,4 | 15,5 |
| 183 | CFL | 7,4 | 94,031 | 3,3 | 10,1 |
| 184 | CFL | 7,8 | 88,116 | 3,4 | 10,8 |
| 185 | CFL | 7,0 | 98,801 | 3,2 | 9,6 |
| 186 | SMPS p-PFC | 10,3 | 65,479 | 4,2 | 14,5 |
| 187 | SMPS no-PFC | 10,5 | 64,272 | 4,2 | 14,8 |
| 188 | CFL | 7,7 | 89,687 | 3,4 | 10,6 |
| 189 | SMPS p-PFC | 10,8 | 62,516 | 4,3 | 15,2 |
| 190 | SMPS no-PFC | 14,7 | 45,233 | 5,5 | 21,0 |
| 191 | SMPS p-PFC | 7,7 | 90,300 | 3,4 | 10,5 |
| 192 | CFL | 8,0 | 86,566 | 3,4 | 11,0 |
| 193 | SMPS no-PFC | 20,9 | 31,502 | 7,3 | 30,2 |
| 194 | SMPS no-PFC | 24,6 | 26,619 | 8,5 | 35,7 |
| 195 | SMPS no-PFC | 18,5 | 35,648 | 6,6 | 26,7 |
| 196 | SMPS p-PFC | 11,1 | 60,510 | 4,4 | 15,7 |
| 197 | SMPS p-PFC | 9,5 | 71,430 | 3,9 | 13,3 |
| 198 | CFL | 7,4 | 93,643 | 3,3 | 10,2 |
| 199 | SMPS p-PFC | 17,5 | 37,892 | 6,3 | 25,1 |
| 200 | SMPS no-PFC | 20,4 | 32,311 | 7,2 | 29,4 |

Referencias Bibliográficas

- Collin, A. J. (2013). *Advanced load modelling for power system studies* (Ph. D. thesis). Inst. for Energy System, Univ. Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom.
- Malagon-Carvajal, G., Almeida, C., Duarte, C., Ordonez-Plata, G., & Kagan, N. (2021). Nonintrusive Optimal Parameters Estimation for a Switch Mode Power Supply Equivalent Circuit Model: 120 V 60 Hz CFLs case study. *IEEE*, 1-10.
- Fauri, M. (1997). "Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix". *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(4), 1632-1638. doi: 10.1109/59.627869.
- Thunberg, E., y Soder, L. (1999). A Norton approach to distribution network modelling for harmonic studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(1), 272-277. doi: 10.1109/61.736738.
- Balci, M., Ozturk, D., Karacasu, O., y Hocaoglu, M. (2008). Experimental verification of harmonic load models. *Universities Power Engineering Conference. UPEC 2008. 43rd International*, 1-6. doi: 10.1109/UPEC.2008.4651607.
- Malagon-Carvajal, G. (2019). *Métodos de modelado y simulación para la evaluación de la distorsión de cargas basadas en fuentes conmutadas considerando fenómenos de diversidad y atenuación (tesis doctoral)*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Malagon-Carvajal, G., Bello-Pena, J., Ordonez, G., & Duarte, C. (2015). Analytical and experimental discussion of a circuit-based model for compact fluorescent lamps in a 60 hz power grid. *Ingeniería e Investigación*, 35, 89-97.

- Djokic, S. Z., y Collin, A. J. (2014). Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks. *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 137-141. doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842856.
- Wu, L., Lin, Y. y Pang, W. (2018). Distribution Network Topology Modelling and Automatic Mapping Based on CIM and GIS. *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 1-5. doi: 10.1109/ITOEC.2018.8740469.
- Blanco, A. M., Stiegler, R., y Meyer, J.(2013). Power Quality Disturbances caused by Modern Lighting Equipment (CFL and LED). *2013 IEEE Grenoble Conference*, 1-6. doi: 10.1109/PTC.2013.6652431.
- Suárez, J. A., Di Mauro, G. F., Anaut, D.O., y Agüero, C.A.(2005). Cancelación Parcial de Corrientes Armónicas Provocadas por Cargas Residenciales No Lineales. *Información tecnológica*, 16(3), 63-70. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642005000300009>.
- Cresswell, C. (2009). Steady-state load models for power system studies (Ph. D. thesis). Inst. for Energy System, Univ Edinburgh, United Kingdom.
- Mansoor, A., Grady, W. M., Chowdhury, A. H., y Samotyi, M. J. (1995). An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(1), 467-473. doi: 10.1109/61.368365.

Apéndices

Algunos algoritmos de MATLAB utilizados para el desarrollo del trabajo de grado se pueden encontrar en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1kxxwPqi5uKWv9iyJInr3xDH-y_oOdNU5?usp=sharing

Los archivos “SMPS_model_prob”, “SMPS_model_prob_noPFC” y “SMPS_model_pPFC” contienen los algoritmos que modelan las cargas individuales tipo CFL, SMPS no-PFC y SMPS p-PFC respectivamente, en estos se obtiene la corriente de entrada, tensión rectificadora en el *dc-link* y tensión de alimentación para cada carga trabajada a través del modelo discreto de espacio de estados.

El archivo “implementación_red” contiene el algoritmo que realiza la conexión del conjunto de cargas en un punto de acople común (PCC), en este se define los tipos de cargas a conectar, los parámetros de la resistencia de entrada, inductancia de entrada, capacitancia y potencia del *dc-link* a través de los archivos “Cargas.mat” y “Parametros.mat”, con base a estos archivos se obtiene la respuesta en corriente y la tensión en el punto de acople común del conjunto de cargas.

El archivo “fun_Vin_error” contiene el algoritmo que realiza la optimización no lineal entre las dos corrientes halladas por medio de la función objetivo (Error Medio Cuadrático), encontrando el error producido por la corriente al realizar variaciones en las magnitudes y ángulos de cada orden armónico de la tensión en el punto de acople común cumpliendo los límites de

distorsión según la norma EN 501600 del 2010 y la corriente producida por la tensión distorsionada debido a la caída de tensión en la impedancia de red.

El archivo “Optimization” contiene el algoritmo que define los parámetros iniciales del optimizador no lineal, tales como: función objetivo, punto inicial de la iteración, restricciones de desigualdad, restricciones de igualdad, límites superior e inferior de la región de búsqueda, hallando así la tensión en el punto de acople común y la corriente de entrada óptima cumpliendo con la totalidad de restricciones planteadas.