Modelado de fuentes conmutadas con tensión de alimentación controlada y no controlada usando un método de ajuste basado en álgebra matricial.

Lina Katerine Silva Vargas y Jesús Andrés Montes Ramírez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingenieros Electricistas

Director
César Antonio Duarte Gualdrón
PhD. Ingeniería Eléctrica y Computación

Codirector
Gabriel Alexis Malagón Carvajal
Dr. Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga
2021

Dedicatoria

A Dios, a mi madre Herminia Vargas por su esfuerzo, apoyo y amor que siempre me ha brindado y a mis hermanos Oscar Silva y Marcela Silva por ser mi motivación.

Lina Katerine Silva Vargas

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 9

1. Generalidades del proyecto 11

1.1 Objetivo General 11

1.2 Objetivos específicos 12

2. Marco teórico 14

2.1 Fuentes conmutadas SMPS 14

2.2 Modelos EN-Coupled Y y MAAA-Full Model 16

2.3 Límites de distorsión de tensión 16

2.4 Error total, de magnitud y de ángulo de fase 17

2.5 Diagramas Box – Plots 18

3. Procedimientos para ajustar y evaluar modelos de fuentes conmutadas en el dominio de la frecuencia 18

3.1 Modelado de fuentes conmutadas con tensión alimentación controlada 19

3.2 Modelado de fuentes conmutadas con tensión alimentación no controlada 20

3.3 Ajuste del modelo Equivalente de Norton (EN-Coupled Y) 21

3.4 Ajuste del modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (MAAA-Full Model)…… 21

4. Desempeño de los métodos de ajuste de modelos a partir de resultados de simulación 22

4.1 Evaluación de los modelos con tensión de alimentación controlada 23

4.1.1 Modelo EN – Coupled Y 24

4.1.2 Modelo MAAA 25

4.2 Evaluación de los modelos con tensión de alimentación no controlada 27

4.2.1 Modelo EN – Coupled Y 27

4.2.2 Modelo MAAA 28

4.3 Comparación entre los modelos y métodos con tensión de alimentación controlada 30

4.4 Comparación entre los modelos y los métodos con tensión de alimentación no controlada .. 31

4.5 Observaciones sobre los resultados de simulación 33

5. Conclusiones 35

Referencias bibliográficas 37

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Parámetros del circuito equivalente de SMPS 15

Tabla 2. Resultados del escenario I-A 24

Tabla 3. Resultados del escenario I-B 26

Tabla 4. Resultados del escenario II-A 27

Tabla 5. Resultados del escenario II-B 29

Tabla 6. Comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos 30

Tabla 7. Resultados de la comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos 32

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Modelo circuital equivalente SMPS 15

Figura 2. Box-Plots escenario I-A 24

Figura 3. Box-Plots escenario I-B 25

Figura 4. Box-Plots escenario II-A 27

Figura 5. Box-Plots escenario II-B 28

Figura 6. Box-Plots comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos ... 30

Figura 7. Box-Plots comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos ... 31

Resumen

Título: Modelado de fuentes conmutadas con tensión de alimentación controlada y no controlada usando un método de ajuste basado en álgebra matricial*

Autor: Jesús Andrés Montes Ramírez, Lina Katerine Silva Vargas**

Palabras Clave: Fuentes conmutadas, armónicos, matriz de admitancias, modelos.

Descripción:

Los dispositivos electrónicos con cargas no lineales basados en fuentes conmutadas (SMPS) ocasionan un posible aumento en la distorsión de tensión y corriente, generando armónicos en la red y una disminución en la calidad de la energía; por consiguiente, el modelado adecuado de este tipo de fuentes es esencial para el análisis de armónicos y lograr así la mitigación efectiva de la distorsión en la red de alimentación eléctrica. El presente trabajo de grado busca evaluar el error de desempeño para el modelo de fuentes conmutadas mediante un método basado en álgebra matricial, realizando dos experimentos, (I) Modelado de fuentes conmutadas con tensión de alimentación controlada, donde se alimenta la carga con tensión fundamental y un armónico superpuesto a la vez, variando sistemáticamente 20 pasos en magnitud y 72 pasos ángulo de fase, donde se ajusta el modelo con los límites establecidos por la norma EN50160 y (II) Modelado de fuentes conmutadas con tensión de alimentación no controlada, usando diferentes señales típicas de operación de una red de baja tensión a lo largo de un intervalo de tiempo, ajustadas a la norma EN50160 cumpliendo con los límites de distorsión armónica individual y total; basados en los resultados obtenidos se logra discutir unas modificaciones a los métodos propuestos por Nassif Young Xu presentados en (Malagón, 2020) donde se utiliza la operación Hermitian para matriz de números complejos (trasponer y conjugar).

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director César Antonio Duarte Gualdrón PhD. Ingeniería Eléctrica y Computación. Codirector Gabriel Alexis Malagón Carvajal Dr. Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Modeling of switched-mode power supplies with controlled and uncontrolled supply voltage using a matrix algebra-based fitting method*

Author: Jesús Andrés Montes Ramírez, Lina Katerine Silva Vargas**

Key Words: Switched-mode power supplies, harmonics, admittance matrix, models.

Description:

Electronic devices with non-linear loads based on switched-mode power supplies (SMPS) cause a possible increase in voltage and current distortion, generating harmonics in the network and a decrease in power quality; therefore, proper modelling of these types of sources is essential for harmonics analysis to achieve effective mitigation of distortion in the power grid. This graduate work aims to evaluate the performance error for the switched source model using a method based on matrix algebra, by performing two experiments, (I) Modeling of switched-mode power supplies with controlled supply voltage, where the load is supplied with fundamental voltage and one harmonic superimposed at the same time, systematically varying 20 steps in magnitude and 72 steps in phase angle, where the model is adjusted to the limits set by EN50160 and (II) Modeling of switched-mode power supplies with uncontrolled supply voltage, using different typical low voltage network operation signals over a time interval, complying with EN50 160 and complying with individual and total harmonic distortion limits; Based on the results obtained, it is possible to discuss some modifications to the methods proposed by Nassif Young Xu presented in (Malagón, 2020) where the Hermitian operation is used for matrix of complex numbers (transpose and conjugate).

---

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director César Antonio Duarte Gualdrón PhD. Ingeniería Eléctrica y Computación. Codirector Gabriel Alexis Malagón Carvajal Dr. Ingeniería Eléctrica.

Introducción

El análisis de la distorsión armónica es uno de los temas principales dentro del área de la calidad de la potencia. Con el uso generalizado de dispositivos electrónicos de potencia denominados a menudo como cargas generadoras de armónicos las cuales ocasionan una desviación de las magnitudes de tensión y corriente de su forma ideal que se considera como una perturbación o pérdida de calidad. La comprensión y el modelado de las cargas generadoras de armónicos han sido una parte esencial del análisis armónico y este es fundamental para determinar el rendimiento y el diseño de los equipos para la ubicación óptima de los dispositivos de mitigación de armónicos (Patidar & Singh, 2009).

El estudio de la distorsión de tensión y corriente eléctrica actualmente se ha convertido en un tema de interés debido a que la sociedad se proyecta a un futuro con diversos equipos electrónicos que faciliten el estilo de vida. Los hábitos de los usuarios haciendo uso de estos equipos pueden ocasionar un impacto significativo en cuanto a distorsión de la red de alimentación eléctrica (Ribeiro et al., 2011) y actualmente, contamos con al menos un dispositivo electrónico que contribuye en una pequeña fracción de la distorsión en la red de distribución de baja tensión.

Este trabajo de grado propone el estudio de un modelo en el dominio de la frecuencia para fuentes conmutadas, mediante los métodos basados en algebra de matrices propuestos por Nassif-Yong-Xu (Matriz de admitancias armónicamente acopladas (Full Model) y Equivalente de Norton) en (Nassif et al., 2010), así como las modificaciones propuestas por (Malagón, 2020). Se establecen dos escenarios para el ajuste y evaluación de desempeño de los modelos mediante el método basado en algebra de matrices. Para el primer escenario de análisis se utiliza uno de los dos experimentos el cual consiste en tener control de la tensión de la alimentación (barrido en

frecuencia) (Malagón, 2020) y así obtener señales que incluyan la tensión fundamental y un armónico superpuesto a la vez, variando cada nuevo orden armónico sistemáticamente en magnitud y ángulo de fase (I). El segundo escenario de ajuste y evaluación de desempeño de los modelos mediante el uso del método basado en algebra de matrices está basado en un experimento en donde no se tiene control de la tensión de alimentación, para esto, se generan señales de corriente para tensiones de operación típicas (II) mediante el uso de un modelo de carga en el dominio del tiempo implementado en el software Matlab debido a la contingencia sanitaria y la imposibilidad de realizar medidas en laboratorio. Se toma como zona de operación para el ajuste de los métodos (I y II) los límites de distorsión individual y total de tensión propuestos por la norma EN50160. Cada experimento utilizado para comparar los métodos basados en algebra de matrices y la modificación identificada por (Malagón, 2020) la cual consiste en utilizar la operación Hermitian (traspuesta y conjugada de la matriz de números complejos).

1. Generalidades del proyecto

A continuación, se presentan los objetivos planteados para este trabajo de grado con una descripción del alcance desarrollado para los mismos.

1.1 Objetivo General

Evaluar el error de desempeño del método basado en algebra matricial utilizado para el ajuste de modelos en el dominio de la frecuencia para fuentes conmutadas en los casos donde se tiene tensión de alimentación controlada y no controlada.

Este objetivo general se plantea con el fin de evaluar el error de ajuste y desempeño para el modelo equivalente de Norton (EN – Coupled Y) y el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas (MAAA – Full Model), cuando es ajustado mediante un método y una modificación de éste basados en algebra matricial. Se presentan dos alternativas para el cálculo de la matriz de admitancias, una en la cual se tiene control de la tensión de alimentación, por ejemplo, en un laboratorio con una fuente controlada y otra en la cual no se tiene control, por ejemplo, con medidas tomadas directamente de la red. Debido a la crisis sanitaria actual se ha optado por sustituir las medidas de laboratorio y las medidas obtenidas de la red por señales de tensión y corriente resultado de simulaciones de un modelo en el dominio del tiempo tomado como referencia presentada en (Malagón, 2020) para el cálculo del error.

1.2 Objetivos específicos

Objetivo específico 1: Establecer los dos procedimientos para el desarrollo de los experimentos y posterior cálculo de los modelos, el primero utilizando una fuente de tensión controlada (procedimiento con control de la tensión de alimentación) y el segundo utilizando tensiones típicas a lo largo de un intervalo de tiempo (procedimiento sin control de la tensión de alimentación), usando un método basado en álgebra matricial para ajustar el modelo en el dominio de la frecuencia.

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico se presentan dos procedimientos, el primero mediante simulación de una fuente de tensión controlada, donde se alimenta la carga con tensión fundamental y un armónico superpuesto a la vez variando sistemáticamente 20 pasos en magnitud y 72 en ángulo de fase, ajustando los límites de operación establecidos por la norma EN50160. El segundo procedimiento se establece mediante una simulación con tensión de alimentación no controlada, generando diez mil señales diferentes aleatorias de tensión ajustadas a la zona de operación establecida por la norma EN50160, cumpliendo con los límites de distorsión individual y total. Para cada uno de los procedimientos anteriormente mencionados se realiza el cálculo de la matriz de admitancias mediante métodos basados en álgebra matricial para el ajuste de los modelos en el dominio de la frecuencia.

Objetivo específico 2: Establecer los escenarios de análisis donde se desea evaluar el desempeño de los procedimientos (con o sin control de la tensión de alimentación).

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico se presentan dos escenarios de análisis, el primer escenario de análisis (I) consiste en el ajuste y posterior evaluación de los modelos (EN y MAAA) utilizando señales de ajuste (se utilizan las mismas señales tanto para el ajuste del modelo como para la evaluación de los modelos). El segundo escenario de análisis (II) consiste en el ajuste de los modelos con señales de ajuste y se evalúa el desempeño de los modelos con señales diferentes a las de ajuste (señales de evaluación de desempeño). Para estos dos escenarios se utilizan los dos procedimientos: el primero con tensión de alimentación controlada y el segundo, con tensión de alimentación no controlada, estos procedimientos son descritos en detalle en las secciones 3.1 y 3.2.

Objetivo específico 3: Estimar el error de desempeño de los modelos en el dominio de la frecuencia comparados con el modelo en el dominio del tiempo para los diferentes escenarios (tensión de alimentación controlada y no controlada).

Para el cumplimiento al tercer objetivo específico, en cada escenario (tensión de alimentación controlada y no controlada) se calcula el error de ajuste y el error de desempeño, error total, error de magnitud y error de ángulo de fase de la corriente calculada por cada uno de los modelos y métodos en el dominio de la frecuencia. Esta corriente es comparada con el modelo en el dominio en el tiempo mediante una figura de error establecida en (Malagón, 2020).

2. Marco teórico

2.1 Fuentes conmutadas SMPS

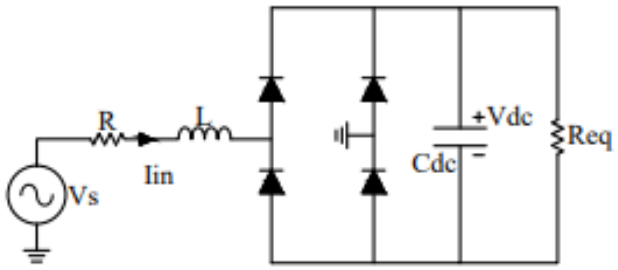
Las fuentes conmutadas o SMPS (Switched Mode Power Supplies) son dispositivos electrónicos que convierten la tensión eléctrica alterna en una tensión continua constante del valor adecuado que necesite un determinado equipo electrónico. Las fuentes conmutadas son ampliamente utilizadas en los equipos que nos rodean como computadores, televisores, impresoras, cargadores para teléfonos móviles, entre otros. Estos dispositivos no operan con una corriente sinusoidal pura, por lo tanto, se consideran cargas no lineales, que generan distorsión.

Esta distorsión puede causar perturbaciones en la red de distribución eléctrica y, por lo tanto, la disminución en la calidad de la energía, de esta forma un mejor modelado de estas fuentes conmutadas mediante un modelo en el dominio de la frecuencia y un método con tensión de alimentación controlada y no controlada puede ayudar a anticipar el comportamiento e impacto de dichas cargas y de esta forma establecer estrategias para la mitigación efectiva de la distorsión armónica en la red.

En este proyecto de grado se estudia el método de ajuste propuesto por Nassif-Yong-Xu para los modelos en el dominio de la frecuencia: Modelo equivalente de Norton y Modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas utilizando un modelo circuital equivalente (modelo en el dominio del tiempo) de un puente rectificador monofásico o SMPS representado en la Figura 1 para la generación de las medidas o señales para el método de ajuste de los modelos. Los parámetros del modelo de la carga tipo SMPS presentados en la Tabla 1 se toman a partir de (Malagón, 2020). Se define la zona de operación de la tensión, tomando como límite inferior Uh = 0,01 % y límite superior de distorsión individual conforme los propone la norma EN50160.

Figura 1.

Modelo circuital equivalente SMPS



Nota: Tomado de (Malagon-Carvajal et al., 2017)

El modelo equivalente de Norton y el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas (Ver sección 2.2) son modelos que dependen de la tensión de alimentación, a partir de modelos basados en formas de onda en el dominio del tiempo que posteriormente son transformados al dominio de la frecuencia mediante el uso de un método basado en álgebra de matrices. Para el modelado de fuentes conmutadas SMPS en el dominio del tiempo se debe hacer una estimación de los parámetros del circuito, el cual incluye un puente rectificador monofásico, resistencia equivalente (Req), una resistencia (R) e inductancia de entrada (L) y una capacitancia del dc link (Cdc). En este trabajo de grado estos parámetros son tomados de (Caicedo et al., 2017) y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Parámetros del circuito equivalente de SMPS

Vs [V]	F [Hz]	L[mH]	C[µF]	Req[Ω]
220	50	2	258	459

Nota: Parámetros del circuito equivalentes tomados de (Caicedo et al., 2017)

2.2 Modelos EN-Coupled Y y MAAA-Full Model

El modelo equivalente de Norton (Modelos EN-Coupled) descrito en (Malagón, 2020) se representa mediante la ecuación (1), en donde la corriente de operación (I) es igual a una corriente de corte (Ic) más una matriz de admitancias (Y) por la tensión de alimentación (V) y el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas (MAAA-Full Model) expresado en la ecuación (2), de manera semejante al modelo anterior, la corriente de operación (I) se iguala a la corriente de corte (Ic) más una matriz de admitancias (Y^+) por la tensión de alimentación (V), más otra matriz de admitancias (Y^-) por la tensión de alimentación conjugada (V^*).

$$I = Ic + Y\,V \tag{1}$$

$$I = Ic + Y^{+}V + Y^{-}V^{*} \tag{2}$$

2.3 Límites de distorsión de tensión

En el presente trabajo de grado se utilizan los límites de distorsión de tensión propuestos por la norma EN50160 para limitar la zona de operación de la tensión de alimentación. En este estándar se establecen los niveles de baja y media tensión que deben ser suministrados por las redes de distribución en condiciones normales de operación, mediante límites de tensión para cada orden armónico (hasta el armónico 25) en porcentajes de la tensión fundamental e indica que la distorsión armónica total de tensión no debe exceder el 3%. En la sección 3.1 del presente libro se realiza un procedimiento denominado barrido en frecuencia en el cual se toman los primeros veinte armónicos impares pues a partir del armónico 21 para los múltiplos de 3 el límite de distorsión no varía y es del 0,3%, mientras que para los no múltiplos de 3 y a partir del armónico 25 el límite de

distorsión no varía y es el 0,5%. En la sección 3.2 se generan diez mil señales típicas de tensión de operación, las cuales siguen los criterios para los límites de distorsión individual y total establecidos por la norma EN 50160.

2.4 Error total, de magnitud y de ángulo de fase

A continuación, se presentan las ecuaciones (4), (3) y (5) tomadas de (Malagón, 2020) para el cálculo de los errores (total, magnitud y ángulo, respectivamente) para la evaluación del error de ajuste (utilizando señales de barrido en frecuencia, es decir, las señales con las cuales se ajusta el modelo) y del error de desempeño (utilizando 10.000 señales generadas aleatoriamente, señales diferentes a las del ajuste del modelo). Estos errores, describen el error de los modelos en el dominio de la frecuencia y por lo tanto de los métodos basados en algebra de matrices.

MSE Total

$$MSE^{m}\,[\%] = \sum_{\mu=1}^{h} \frac{[|I_\mu| - |I_{F\mu}|]^2}{\sum_{\mu=1}^{h}|I_\mu|^2} \times 100\ \% \tag{3}$$

MSE magnitud

$$MSE\,[\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^{h}|I_\mu - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^{h}|I_\mu|^2} \times 100\ \% \tag{4}$$

MSE ángulo

$$MSE^{\Delta\theta}[\%] = \sum_{\mu=1}^{h} \frac{|I_\mu - I_{F\mu}|^2 - [|I_\mu| - |I_{F\mu}|]^2}{\sum_{\mu=1}^{h}|I_\mu|^2} \times 100 \tag{5}$$

Donde, $I_{F\mu}$ representa la corriente calculada de los modelos Equivalente de Norton y Matriz de Admitancias Armónicamente acopladas (Ver sección 2.2), utilizando métodos de ajuste

propuesto por Nassif-Yong-Xu en el dominio de la frecuencia y la respuesta de corriente I_{μ} proporcionada por el modelo equivalente circuital en el dominio del tiempo (modelo SMPS), para cada orden armónico μ.

2.5 Diagramas Box – Plots

Los diagramas Box – Plots representan de forma gráfica agrupaciones de datos, las cuales se dividen de la siguiente manera, el punto más bajo que representa el mínimo sin valores atípicos, el primer cuartil (q1) que representa el 25% de los datos, el segundo cuartil (q2) que representa el 50% de los datos, con una línea dentro de la caja (que corresponde a la mediana), y el tercer cuartil (q3) que representa el 75%, luego el punto más alto simboliza el máximo sin valores atípicos y el rango intercuartílico (iqr) que es la diferencia entre el valor del tercer y el primer cuartil.

En este trabajo de grado se hace uso de los diagramas Box – Plots para representar de manera gráfica los errores de ajuste y desempeño del método basado en algebra matricial utilizado para el ajuste de los modelos: EN-Coupled Y y MAAA-Full Model para fuentes conmutadas en los procedimientos con control de la tensión y sin control de la tensión de alimentación que se describen a continuación.

3. Procedimientos para ajustar y evaluar modelos de fuentes conmutadas en el dominio de la frecuencia

En esta sección se describen los procedimientos para el modelado de fuentes conmutadas con y sin tensión de alimentación controlada, utilizando el método propuesto por Nassif-Yong-Xu y una modificación del método para el ajuste de los modelos equivalente de Norton y matriz de

admitancias armónicamente acopladas identificada en (Malagón, 2020), estableciendo como zona de operación de la tensión de alimentación los límites propuestos por la Norma EN50160, para la distorsión armónica individual y total.

3.1 Modelado de fuentes conmutadas con tensión alimentación controlada

Para la estimación de las señales de tensión y de corriente se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se hace una variación de 20 pasos en la magnitud de la tensión fundamental (220V) con una variación inicial de la regulación de tensión de 0.01% hasta un 5% de acuerdo con los límites propuestos por Std ANSI C84.1 y 72 pasos de variación en ángulo de fase de cero a trecientos sesenta grados para cada una de las variaciones.
2. El valor de la tensión fundamental se toma como referencia sin realizar variaciones y con ángulo de fase de cero grados. Posteriormente se superpone un armónico a la vez sobre la tensión fundamental de referencia, tomando armónicos impares “h” (3, 5…, 37,39), cada uno con 20 pasos “p” de variación en magnitud y 72 en ángulo “a” de fase, teniendo en cuenta los límites establecidos en la norma EN50160 para la distorsión individual.
3. Los datos en el dominio de la frecuencia obtenidos en el paso 2 se almacenan en la matriz V presentada en (Malagón, 2020) de dimensiones ((h x h), (p x a)), los cuales posteriormente son transformados al dominio del tiempo para la simulación del modelo circuital equivalente (Figura 1).
4. Para la obtención de las señales de corriente se evalúan estas señales de tensión en el dominio del tiempo en el modelo circuital equivalente, se obtienen las señales en el dominio del tiempo y posteriormente son transformadas al dominio de la frecuencia y

almacenadas. La matriz de corriente obtenida se caracteriza por poseer las mismas dimensiones de la matriz V.

3.2 Modelado de fuentes conmutadas con tensión alimentación no controlada

Para la estimación de las señales de tensión y de corriente se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se genera un vector (1x20) que contiene la magnitud de la tensión fundamental en la primera posición (por ejemplo, 220V), en la segunda posición el tercer armónico, en la tercera el quinto armónico, y así sucesivamente, hasta la posición veinte la cual contiene el orden armónico 39. Cada magnitud de orden armónico es generada aleatoriamente con una distribución uniforme de tal manera que elige cualquier valor que se encuentre en el intervalo que propone la norma EN50160 para así cumplir con límites de distorsión individual y total. El ángulo de fase de cada orden armónico se varía al azar en un intervalo de cero a trescientos sesenta grados.
2. Se generan 10.000 vectores o señales y se almacenan en una matriz concatenada (20x10.000) que se caracteriza por concatenar las señales formadas en el paso 1 y en donde todos los vectores concatenados son diferentes entre sí.
3. Al igual que en el anterior procedimiento, para la obtención de las señales de corriente se evalúan las señales de tensión, previamente convertidas al dominio del tiempo, en el modelo circuital equivalente (modelo en el dominio del tiempo) de un puente rectificador monofásico SMPS (Figura 1). Estas señales de corriente obtenidas son trasformadas al dominio de la frecuencia y almacenadas.

3.3 Ajuste del modelo Equivalente de Norton (EN-Coupled Y)

Una vez obtenida la respuesta de corriente proporcionada por el modelo en el dominio del tiempo (modelo SMPS) en los procedimientos con tensión de alimentación controlada y no controlada, la matriz (V) se sustituye en (6) para formar la matriz concatenada A, luego en la ecuación (7) propuesta en el artículo de Nassif-Yong-Xu (Nassif et al., 2010) y posteriormente en su modificación presentada en la ecuación (8) (Malagón, 2020), para obtener la matriz concatenada [Ic,Y] que contiene el vector corriente de corte Ic y la matriz de admitancias Y que describe el comportamiento de la carga. Luego es utilizada la ecuación (1), la cual define el modelo Equivalente de Norton y permite calcular la corriente estimada por el modelo en el dominio de la frecuencia.

$$A = [1;\ V] \tag{6}$$

$$[Ic, Y] = I.A^{T}.(A.A^{T})^{-1} \tag{7}$$

$$[Ic, Y] = I.A^{H}.(A.A^{H})^{-1} \tag{8}$$

Donde T representa la operación traspuesta y H corresponde a la operación Hermitian (conjugar y trasponer).

3.4 Ajuste del modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (MAAA-Full Model)

De igual manera, se sustituyen las señales de tensión V, su conjugada y la respuesta en corriente I del modelo en el dominio del tiempo (modelo SMPS) en el experimento con y sin tensión de alimentación controlada, en las ecuaciones (10) y (11), las cuales representan el método

propuesto por Nassif-Yong-Xu y su modificación (Malagón, 2020), para obtener la matriz concatenada [Ic, Y^+, Y^-] que contiene el vector corriente de corte Ic y las matrices de admitancias que describen el comportamiento de la carga. Luego es utilizada la ecuación (2), la cual define el modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas y permite calcular la corriente estimada por el modelo en el dominio de la frecuencia.

$$A = [1;\ V;\ V^*] \tag{9}$$

$$[Ic,\ Y^+, Y^-] = I.A^T.(A.A^T)^{-1} \tag{10}$$

$$[Ic\ , Y^+\ , Y^-] = I.A^H.(A.A^H)^{-1} \tag{11}$$

Donde T representa la operación traspuesta y H corresponde a la operación Hermitian (conjugar y trasponer).

4. Desempeño de los métodos de ajuste de modelos a partir de resultados de simulación

En este capítulo se presentan los resultados de los dos procedimientos presentados en este trabajo de grado, el primero con tensión de alimentación controlada y el segundo, con tensión de alimentación no controlada. Para cada uno de estos se evalúan dos métodos, el propuesto por Nassif-Yong-Xu (Nassif et al., 2010) para el modelo Equivalente de Norton (EN-coupled Y), para cada uno de los procedimientos, identificados como I-A y II-A, y el propuesto para el modelo de Matriz de Admitancias Armónicamente Acopladas (MAAA-Full Model), para cada

procedimiento, identificados como I-B y II-B. Asimismo, se presentan los correspondientes resultados para las, modificaciones identificadas por (Malagón, 2020).

Las figuras presentadas en este capitulo denominadas Box-Plots (Caja de bigotes) brindan información acerca de los resultados obtenidos en la evaluación del error de ajuste y desempeño para cada uno de los modelos (EN-Coupled Y, MAAA-Full Model), y por tanto para los métodos y sus modificaciones permitiendo organizar y comparar los resultados en porcentajes de error total de magnitud y de ángulo (MSE-total, MSE-magnitud, MSE-ángulo). En las tablas seguidas a cada conjunto de Box-Plots se presentan los parámetros estadísticos obtenidos de los resultados como los valores máximo, mínimo, cuartiles (q1, q2, q3) y el rango intercuartílico (iqr), los cuales permiten dividir los datos en cuatro partes iguales para evaluar la dispersión y tendencia de la información, de manera que, q1 determina el primer cuartil en donde el 25% de los datos son menores o igual a este valor calculado, q2 al 50% y q3 al 75%, el rango intercuartil es la diferencia entre el tercer cuartil y el primero de tal manera que permite abarcar el 50% central de los datos. En cada tabla se presentan dos métodos, el propuesto por NYX para los modelos (EN-Coupled Y, MAAA-Full Model) y su modificación.

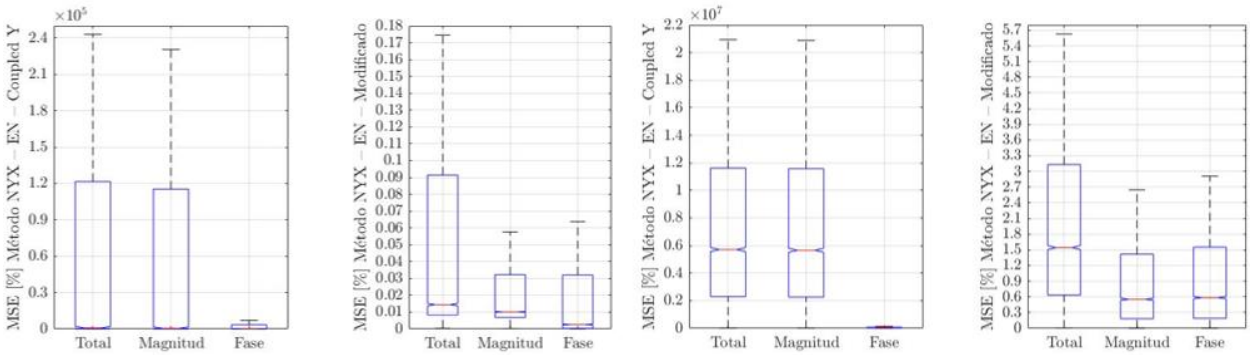
4.1 Evaluación de los modelos con tensión de alimentación controlada

A continuación, se presentan los resultados del escenario I-A y I-B para la evaluación de error de ajuste y desempeño del modelo Equivalente de Norton (EN-Coupled Y) ajustado mediante el método propuesto por Nassif-Yong-Xu y la modificación propuesta por (Malagón, 2020).

4.1.1 Modelo EN – Coupled Y

Figura 2.

Box-Plots escenario I-A



a) Error de ajuste ***b) Error de desempeño***

Nota: Evaluación de ajuste y desempeño para el modelo EN ajustado mediante el método propuesto por NYX y su modificación.

Tabla 2.

Resultados del escenario I-A

MODELO EQUIVALENTE DE NORTON (COUPLED Y)												
	ERROR DE AJUSTE						ERROR DE DESEMPEÑO					
	MSE [%]						MSE [%]					
Método NYX	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**Iqr**	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**
EN-Coupled Y	0,0077	46,518	851,5	1,21E+05	2,43 E+05	1,21 E+05	1,59 E+04	2,29 E+06	5,71 E+06	1,16 E+07	2,09 E+07	9,32 E+06
EN-Modificado	0,0004	0,0082	0,0144	0,0914	0,1745	0,0832	0,0052	0,6358	1,5432	3,1325	5,6279	2,4967
	MSEm [%]						MSEm [%]					
EN-Coupled Y	0,0	15,3	543,4	1,15E+05	2,3 E+05	1,15 E+05	1,46 E+05	2,26 E+06	5,65 E+06	1,15 E+07	2,08 E+07	9,32 E+06
EN-Modificado	0,0002	0,0068	0,0101	0,0322	0,0576	0,0254	0,0010	0,1847	0,5549	1,4165	2,6472	1,2318
	MSEp [%]						MSEp [%]					
EN-Coupled Y	0,0	10,8	155,2	3494,7	6978,4	3483,9	48,0	1,17 E+04	34325,5	67391,5	1,23 E+05	5,56 E+04
EN-Modificado	0,0000	0,0004	0,0026	0,0321	0,0637	0,0317	0,0019	0,1900	0,5860	1,5513	2,9103	1,3613

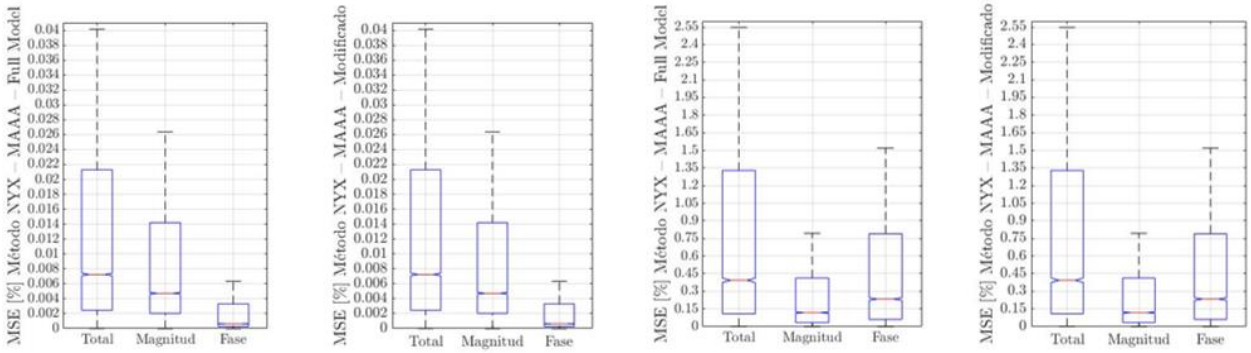
Nota: Evaluación de ajuste y desempeño del modelo EN ajustado mediante el método propuesto por NYX y su modificación.

En la Figura 2 y Tabla 2 se observa el error total (MSE), magnitud (MSE^{m}) y ángulo (MSE^{Θ}) de la evaluación de ajuste y desempeño para el modelo equivalente de Norton (Coupled Y). En el método propuesto por NYX en el tercer cuartil (q3) se presentan errores de ajuste del orden 10^{5} y de desempeño 10^{7} para MSE y MSE^{m}, mientras que, el error MSE^{Θ} maneja orden 10^{3} para el error de ajuste y de 10^{4} para el error de desempeño; la modificación de este método presenta errores del orden de 10^{-2} para tercer cuartil respecto al propuesto por NYX en la evaluación de ajuste y desempeño, en donde no supera un 0,0914% para el error de ajuste y un 3,1325% para el error de desempeño, tomando como referencia el dato más grande en porcentaje dado en el tercer cuartil (75% de los datos).

4.1.2 Modelo MAAA

Figura 3.

Box-Plots escenario I-B



a) Error de ajuste ***b) Error de desempeño***

Nota: Evaluación de ajuste y desempeño del modelo MAAA-Full Model. Método NYX y su modificación.

Tabla 3.

Resultados del escenario I-B

	MODELO MATRIZ DE ADMITANCIAS ARMÓNICAMENTE ACOPLADAS (FULL MODEL)											
	ERROR DE AJUSTE						ERROR DE DESEMPEÑO					
	MSE [%]						MSE [%]					
Método NYX	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**
MAAA-Full Model	0,0000	0,0025	0,0073	0,0213	0,040121	0,0188	0,0005	0,1087	0,3942	1,3294	2,5477	1,2207
MAAA-Modificado	0,0000	0,0025	0,0073	0,0213	0,040121	0,0188	0,0005	0,1087	0,3942	1,3294	2,5477	1,2207
	MSEm [%]						MSEm [%]					
MAAA-Full Model	0,0000	0,0020	0,0047	0,0142	0,02636	0,0122	0,0002	0,0339	0,1188	0,4141	0,79402	0,3802
MAAA-Modificado	0,0000	0,0020	0,0047	0,0142	0,02636	0,0122	0,0002	0,0339	0,1188	0,4141	0,79402	0,3802
	MSEp [%]						MSEp [%]					
MAAA-Full Model	0,0000	0,0003	0,0006	0,0033	0,0063424	0,0030	0,0001	0,0611	0,2342	0,7907	1,5195	0,7297
MAAA-Modificado	0,0000	0,0003	0,0006	0,0033	0,0063424	0,0030	0,0001	0,0611	0,2342	0,7907	1,5195	0,7297

Nota: Evaluación de ajuste y desempeño del modelo MAAA-Full Model. Método NYX y su modificación.

En la Figura 3 y Tabla 3 se muestran los errores de ajuste y desempeño del modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas (Full Model), los cuales presentan semejanza en los parámetros calculados en el método que propone NYX y su modificación presentando errores para el tercer cuartil (q3) MSE, MSE^{m} y MSE^{Θ} en una proporción de 1:62,41, 1:29,16 y 1:239,61, siendo 1 el valor calculado para la evaluación de ajuste y, por ejemplo, 62,41 el correspondiente a la evaluación de desempeño, donde el incremento más significativo está dado en el cálculo de todos los parámetros del error de ángulo de fase.

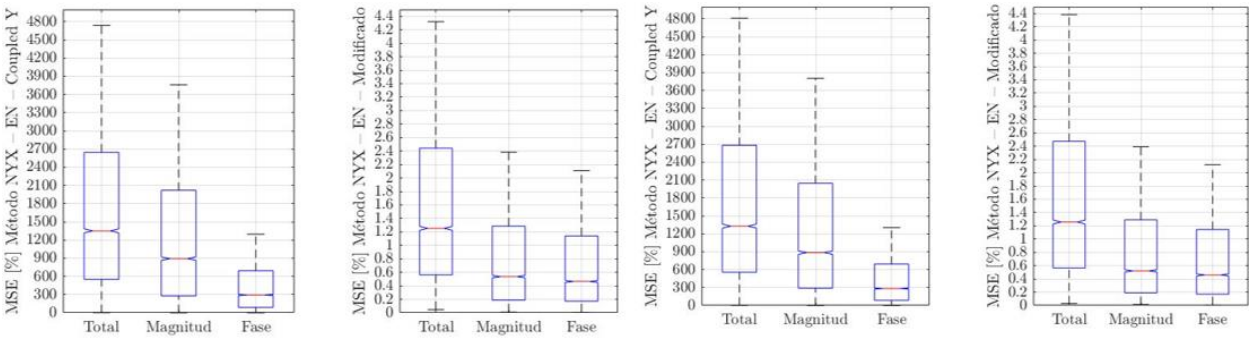
4.2 Evaluación de los modelos con tensión de alimentación no controlada

A continuación, se presentan los resultados del escenario II-A y II-B para la evaluación de error ajuste y desempeño del modelo Equivalente de Norton (EN-Coupled Y) ajustado mediante el método propuesto por Nassif-Yong-Xu y la modificación propuesta (Malagón, 2020).

4.2.1 Modelo EN – Coupled Y

Figura 4.

Box-Plots escenario II-A



a) Error de ajuste ***b) Error de desempeño***

Nota: Evaluación de ajuste y desempeño del modelo EN-Coupled Y. Método NYX y su modificación.

Tabla 4.

Resultados del escenario II-A

	MODELO EQUIVALENTE DE NORTON (COUPLED Y)											
	ERROR DE AJUSTE						ERROR DE DESEMPEÑO					
	MSE [%]						MSE [%]					
Método NYX	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**
EN-Coupled	1,8962	551,3	1350,1	2645,5	4737,5066	2094,1	1,6	555,2	1327,8	2682,3	4809,2808	2127,1
EN-Modificado	0,0477	0,5622	1,2527	2,4427	4,3193	1,8805	0,0284	0,5639	1,2570	2,4735	4,382	1,9096
	MSEm [%]						MSEm [%]					
EN-Coupled	0,3944	279,2	892,7	2020,2	3762,0182	1740,9	0,5	289,5	884,9	2045,6	3801,6522	1756,1

EN-Modificado	0,0090	0,1867	0,5362	1,2856	2,382	1,0989	0,0131	0,1900	0,5209	1,2905	2,3908	1,1005
	MSEp [%]						**MSEp [%]**					
EN-Coupled	0,1942	89,6	293,4	693,0	1296,0864	603,3	0,7	83,9	282,6	693,2	1302,4483	609,3
EN-Modificado	0,0068	0,1716	0,4646	1,1408	2,109	0,9693	0,0063	0,1699	0,4594	1,1454	2,1207	0,9756

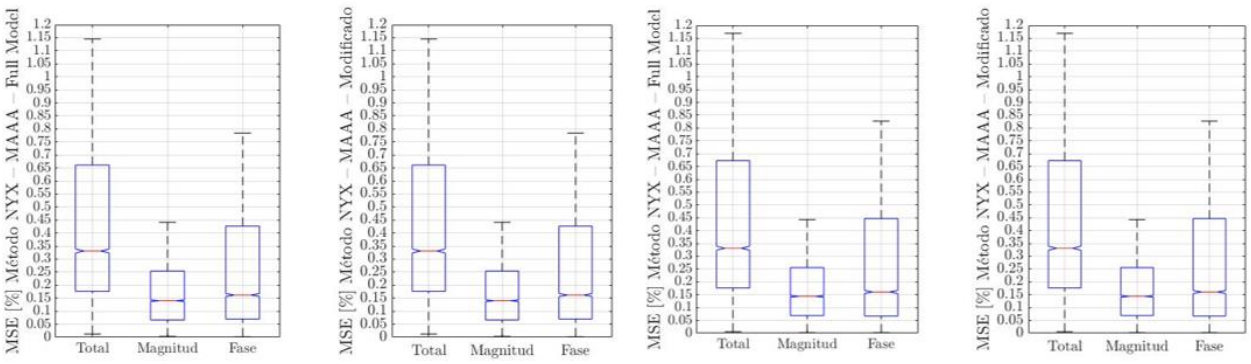
Nota: Evaluación de ajuste y desempeño del modelo EN-Coupled Y. Método NYX y su modificación.

En la Figura 4 se aprecian los diagramas Box-Plots, los cuales presentan los resultados del uso del método que propone NYX y su modificación para el modelo EN-Coupled Y, gráficamente se observa que la evaluación de ajuste y desempeño son iguales, sin embargo, la Tabla 4 determina que existe una diferencia entre estas, tomando como referencia el tercer cuartil (q3) de la modificación del método de NYX, la evaluación de ajuste toma un MSE total q3=2,4427% y la evaluación de desempeño un error total de q3=2,4735% indicando una proporción de 1:1,01, mientras que, los errores de magnitud y ángulo presentan una proporción de 1:1,004. El método propuesto por NYX tiene porcentajes de error del orden de 10^3 para el error total y de magnitud, y del orden de 10^2 para los errores de fase, sin embargo, el cambio entre la evaluación de ajuste y desempeño no varía de manera significativa.

4.2.2 Modelo MAAA

Figura 5.

Box-Plots escenario II-B



a) Error de ajuste ***b) Error de desempeño***

Nota: Evaluación de ajuste y desempeño del modelo MAAA-Full Model. Método NYX y su modificación.

Tabla 5.

Resultados del escenario II-B

	MODELO MATRIZ DE ADMITANCIAS ARMÓNICAMENTE ACOPLADAS (FULL MODEL)											
	ERROR DE AJUSTE						ERROR DE DESEMPEÑO					
	MSE [%]						MSE [%]					
Método NYX	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**
MAAA-Full Model	0,0126	0,1763	0,3313	0,6613	1,1453	0,4850	0,0060	0,1762	0,3314	0,6731	1,1692	0,4969
MAAA-Modificado	0,0126	0,1763	0,3313	0,6613	1,1453	0,4850	0,0060	0,1762	0,3314	0,6731	1,1692	0,4969
	MSEm [%]						MSEm [%]					
MAAA-Full Model	0,0033	0,0664	0,1405	0,2541	0,44164	0,1878	0,0026	0,0690	0,1438	0,2563	0,44309	0,1874
MAAA-Modificado	0,0033	0,0664	0,1405	0,2541	0,44164	0,1878	0,0026	0,0690	0,1438	0,2563	0,44309	0,1874
	MSEp [%]						MSEp [%]					
MAAA-Full Model	0,0021	0,0700	0,1622	0,4271	0,78391	0,3570	0,0024	0,0671	0,1609	0,4471	0,82719	0,3801
MAAA-Modificado	0,0021	0,0700	0,1622	0,4271	0,78391	0,3570	0,0024	0,0671	0,1609	0,4471	0,82719	0,3801

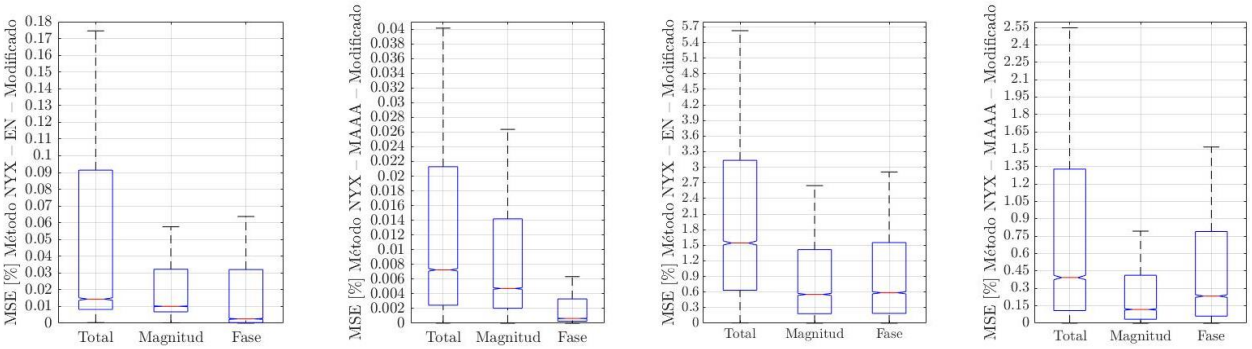
Nota: Resultados del escenario 2.2. Matriz de admitancias armónicamente acopladas y su modificación, Error de ajuste y desempeño.

Para el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas en la Figura 5 y Tabla 5, existe el mismo comportamiento que en el procedimiento con control de la tensión de alimentación para el modelo MAAA-Ful Model, donde, los valores arrojados por el modelo dado el uso del método propuesto por NYX y su modificación son semejantes. Los resultados en la evaluación de ajuste para el tercer cuartil (q3) toma valores de 0,6613%, 0,2541% y 0,4271% en el error total, magnitud y ángulo de fase, respectivamente, mientras la evaluación de desempeño tiene una proporción 1:1,02, 1:1,01 y 1:1,05 para cada uno de los errores.

4.3 Comparación entre los modelos y métodos con tensión de alimentación controlada

Figura 6.

Box-Plots comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos



a) Error de ajuste ***b) Error de desempeño***

Nota: comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos EN-Coupled Y y MAAA-Full Model.

Tabla 6.

Comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos

COMPARACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LOS MODELOS TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN CONTROLADA												
	ERROR DE AJUSTE						ERROR DE DESEMPEÑO					
	MSE [%]						MSE [%]					
Método NYX	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**Iqr**	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**
EN-Modificado	0,0004	0,0082	0,0144	0,0914	0,1745	0,0832	0,0052	0,6358	1,5432	3,1325	5,6279	2,4967
MAAA-Modificado	0,0000	0,0025	0,0073	0,0213	0,0401	0,0188	0,0005	0,1087	0,3942	1,3294	2,5477	1,2207
	MSEm [%]						MSEm [%]					
EN-Modificado	0,0002	0,0068	0,0101	0,0322	0,0576	0,0254	0,0010	0,1847	0,5549	1,4165	2,6472	1,2318
MAAA-Modificado	0,0000	0,0020	0,0047	0,0142	0,0264	0,0122	0,0002	0,0339	0,1188	0,4141	0,7940	0,3802
	MSEp [%]						MSEp [%]					
EN-Modificado	0,0000	0,0004	0,0026	0,0321	0,0637	0,0317	0,0019	0,1900	0,5860	1,5513	2,9103	1,3613
MAAA-Modificado	0,0000	0,0003	0,0006	0,0033	0,0063	0,0030	0,0001	0,0611	0,2342	0,7907	1,5195	0,7297

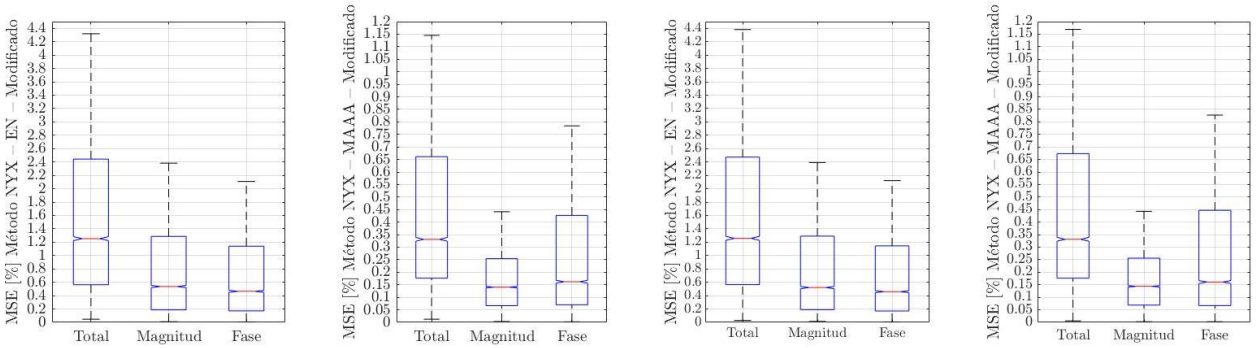
Nota: Comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos EN-Coupled Y y MAAA-Full Model.

Los datos arrojados de la Tabla 6 en la evaluación de ajuste en los modelos (EN-Coupled Y y MAAA-Full Model) dadas las modificaciones de los métodos que propone NYX, presentan valores de error total en el tercer cuartil (q3) de 0,0914% y 0,0213% respectivamente. De lo anterior, se infiere que para la evaluación de ajuste en el escenario cuando se tiene control en la tensión de alimentación el método modificado del modelo MAAA-Full Model presenta un porcentaje de error aproximadamente 4,29 veces menor al del modelo EN-Coupled Y, mientras que, la evaluación de desempeño el cambio entre los dos modelos dado el tercer cuartil es de 2,35 veces. En la evaluación de ajuste de los modelos se presenta una proporción de 1:4,29, 1:2,27 y 1:9,73 en el error total, magnitud y ángulo; para la evaluación de desempeño de los modelos se presenta una proporción de 1:2,36, 1:3,42 y 1:1,96 en el error total, magnitud y ángulo. Donde 1 representa el valor para el MAAA-Modificado y el otro valor el EN-Modificado. El modelo MAAA-Full Model presenta menor dispersión tanto en magnitud como en el ángulo de fase que el modelo EN-Cupled Y.

4.4 Comparación entre los modelos y los métodos con tensión de alimentación no controlada

Figura 7.

Box-Plots comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos



a) Error de ajuste ***b) Error de desempeño***

Nota: comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos EN-Coupled Y y MAAA-Full Model.

Tabla 7.

Resultados de la comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos

	COMPARACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LOS MODELOS TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN NO CONTROLADA											
	ERROR DE AJUSTE						ERROR DE DESEMPEÑO					
	MSE [%]						MSE [%]					
Método NYX	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**Iqr**	**min**	**q1**	**q2**	**q3**	**max**	**iqr**
EN-Modificado	0,0477	0,5622	1,2527	2,4427	4,3193	1,8805	0,0284	0,5639	1,2570	2,4735	4,382	1,9096
MAAA-Modificado	0,0126	0,1763	0,3313	0,6613	1,1453	0,4850	0,0060	0,1762	0,3314	0,6731	1,1692	0,4969
	MSEm [%]						MSEm [%]					
EN-Modificado	0,0090	0,1867	0,5362	1,2856	2,382	1,0989	0,0131	0,1900	0,5209	1,2905	2,3908	1,1005
MAAA-Modificado	0,0033	0,0664	0,1405	0,2541	0,44164	0,1878	0,0026	0,0690	0,1438	0,2563	0,4431	0,1874
	MSEp [%]						MSEp [%]					
EN-Modificado	0,0068	0,1716	0,4646	1,1408	2,109	0,9693	0,0063	0,1699	0,4594	1,1454	2,1207	0,9756
MAAA-Modificado	0,0021	0,0700	0,1622	0,4271	0,78391	0,3570	0,0024	0,0671	0,1609	0,4471	0,8272	0,3801

Nota: Resultados de comparación entre las modificaciones de los métodos para los modelos EN-Coupled Y y MAAA-Full Model.

En la anterior Tabla 7 y Figura 7 la información suministrada de la evaluación de ajuste y desempeño de los modelos para la modificación de los métodos cuando no hay control de la tensión de alimentación, los errores en la evaluación de ajuste y desempeño no representan un cambio significativo en comparación a los anteriores casos del presente capítulo. El modelo MAAA-Full Model presenta error total de q3=0,6613% para la evaluación de ajuste y de q3=0,6731% para la evaluación de desempeño, de lo anterior, se presenta un aumento de aproximadamente 1,018 para la evaluación de desempeño respecto a la de ajuste. En el modelo EN-Coupled Y un q3=2,4427 para la evaluación de ajuste y un incremento de 1,013 para la evaluación de desempeño. De lo

anterior se observa que para cuando no hay control de la tensión de alimentación, la modificación de los métodos no representa cambios considerables entre la evaluación de ajuste y de desempeño. El modelo MAAA-Full Model para cuando se tiene control de la tensión de alimentación presenta errores menores que el modelo EN-Coupled Y en la evaluación de error de ajuste y desempeño de la magnitud y ángulo de fase.

4.5 Observaciones sobre los resultados de simulación

A lo largo de este capítulo se abordan los resultados de la evaluación de error de ajuste y desempeño de los métodos propuestos por NYX y sus modificaciones para los dos modelos tratados (EN y MAAA) los cuales se someten a dos escenarios, siendo el primero (I) cuando se tiene control de la tensión de alimentación (4.1) y el segundo (II) cuando no existe control de esta (4.2) y en cada sección se evalúan los dos modelos A (EN) y B (MAAA). En la sección 4.3 y 4.4 se presentan los gráficos y resultados de la comparación de la modificación de los métodos.

El método NYX para el modelo EN-Coupled Y presenta por un lado porcentajes de error de más de un 100% en el error de ajuste y desempeño para el escenario I y II; por otro lado, la modificación del método en comparación al propuesto por NYX tiene porcentajes de error que no exceden un 3,5% tomando como referencia el valor más elevado en todos los parámetros de las tablas.

El modelo MAAA-Full Model presenta similitud en los resultados calculados para el método que propone NYX y la modificación de este en los escenarios I y II. Para el escenario IB En la evaluación de ajuste la dispersión de la distribución (tercer cuartil “q3”) de datos con las señales de barrido en frecuencia toma un valor menor al 0,0213% y en la evaluación de desempeño presenta un aumento de 64,93 veces el rango intercuartílico respecto a la evaluación de ajuste

cuando se utilizaron las 10.000 señales, esto muestra que los resultados se encuentran más dispersos para el caso donde se tiene control de la tensión de alimentación que para cuando no hay control de la tensión de alimentación. Por otro lado, en el escenario cuando no se tiene control de la tensión de alimentación IIB para el modelo MAAA-Full Model no existe un cambio significativo en el rango intercuartílico cuando se realiza la evaluación de ajuste y desempeño, y este valor es menor a un 0,5%.

En la comparación de los métodos modificados se tiene que el modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas (MAAA) presenta errores del orden de 10^{-1} en comparación al modelo equivalente de Norton (EN) que presenta errores del orden de 10^{0} en los escenarios presentados, posiblemente esta diferencia se deba a la forma de la estructura que posee el ajuste y cálculo de cada modelo (capítulo 3). En donde de acuerdo con los resultados el error de ángulo, se describe de mejor manera con el modelo MAAA-Full Model que con el modelo EN-Coupled Y.

5. Conclusiones

A lo largo del trabajo de grado se abordaron dos modelos (EN y MAAA) los cuales fueron sometidos a dos experimentos, el primero con tensión de alimentación controlada y el segundo con tensión de alimentación no controlada, utilizando señales que cumplen con los límites que propone la norma EN50160 de distorsión individual y total, a estos modelos se les realizó un ajuste denominado ajuste del modelo mediante arreglos matriciales que propusieron los autores Nassif-Yong-Xu en (Nassif et al., 2010) permitiendo obtener los parámetros de la carga como lo son la matriz de admitancia Y que describe el comportamiento de la carga y la corriente de corte Ic, además, se realizó un ajuste adicional a los métodos mediante la implementación de la modificación identificada por (Malagón, 2020). Esta modificación busca comparar los resultados, en la evaluación de error de ajuste donde se utilizaron las mismas señales con las cuales se ajustan los modelos, este error permite comparar la corriente obtenida con estos modelos en el dominio de la frecuencia con la corriente del modelo en el dominio del tiempo. Se observó que el modelo equivalente de Norton dada la modificación en el método identificado por (Malagón, 2020) presentó resultados de orden 10^0 para el tercer cuartil en los dos escenarios de evaluación en comparación al método propuesto por Nassif-Yoong-Xu que presentó resultados de orden superior a diez a la 3 (10^3). Para el caso del modelo de matriz de admitancias armónicamente acopladas los resultados fueron del orden de 10^0 y estos fueron iguales al utilizar el método propuesto por Nassif-Yong-Xu o la modificación propuesta por (Malagón, 2020).

Para los modelos estudiados cuando se tiene control de la tensión de alimentación se observa un aumento donde en el menor de los casos es de aproximadamente 29 veces mayor la evaluación de desempeño tomando como referencia la evaluación de ajuste, cuando se ajusta con

señales del barrido en frecuencia y se evalúa el desempeño con el uso de 10000 señales diferentes, mientras que, Cuando no se tiene control de la tensión de alimentación, el ajuste de los modelos con 10000 señales y se evalúa el error de desempeño con 10000 señales diferentes a las utilizadas en el ajuste, en el error de ajuste versus el error de desempeño no se notó una variación considerable en los resultados.

Referencias Bibliográficas

Caicedo, J. E., Romero, A. A., & Zini, H. C. (2017). Frequency domain modeling of nonlinear loads, considering harmonic interaction. 2017 3rd IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2017 - Proceedings. https://doi.org/10.1109/PEPQA.2017.7981641

Malagon-Carvajal, G., Bello-Pena, J., Ordonez-Plata, G., & Duarte, C. (2017). Time-to-frequency domain SMPS model for harmonic estimation: Methodology. Renewable Energy and Power Quality Journal, 1(15), 825–830. https://doi.org/10.24084/repqj15.485

Malagón, G. (Universidad I. de S. (2020). Métodos de modelado y simulación para la evaluación de la distorsión de cargas basadas en fuentes conmutadas considerando los fenómenos de diversidad y Métodos de modelado y simulación para la evaluación de la distorsión de cargas basadas en fuentes conmu.

Nassif, A. B., Yong, J., & Xu, W. (2010). Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. IET Generation, Transmission and Distribution, 4(3), 363–375. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0240

Patidar, R. D., & Singh, S. P. (2009). Harmonics estimation and modeling of residential and commercial loads. 2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09. https://doi.org/10.1109/ICPWS.2009.5442731

Ribeiro, P. F., Leitão, J. J. A. L., Lira, M. M. S., Macedo, J. R., Grandi, A. L. Z., Testa, A., Langella, R., Cobben, J. F. G., & Browne, N. R. (2011). Harmonic distortion during the 2010 FIFA World Cup. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1–8. https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039369